

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO



SEDE LATACUNGA

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

***“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOTOR PROTOTIPO DE
CICLO STIRLING A BASE DE ENERGÍA SOLAR.”***

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

**EDWIN GEOVANI CACUANGO ALBA
MANUEL ARTURO FALCONI BORJA**

Latacunga, Febrero del 2009.

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por Edwin Geovani Cacuango Alba y Manuel Arturo Falconi Borja, bajo nuestra supervisión.

Ing. Luis Mena
DIRECTOR

Ing. Oscar Arteaga
CODIRECTOR

**ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

NOSOTROS:

EDWIN GEOVANI CACUANGO ALBA

MANUEL ARTURO FALCONI BORJA

DECLARAMOS QUE:

El proyecto de grado titulado “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOTOR PROTOTIPO DE CICLO STIRLING A BASE DE ENERGÍA SOLAR**” ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Latacunga, Febrero del 2009.

EDWIN G. CACUANGO ALBA
CI. 1716395387

M. ARTURO FALCONI BORJA
CI. 1720162179

**ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

AUTORIZACIÓN

NOSOTROS:

EDWIN GEOVANI CACUANGO ALBA
MANUEL ARTURO FALCONI BORJA

Autorizamos a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación, en la Biblioteca Virtual de la Institución del trabajo **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOTOR PROTOTIPO DE CICLO STIRLING A BASE DE ENERGÍA SOLAR”** cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Latacunga, Febrero del 2009.

EDWIN G. CACUANGO ALBA
CI. 1716395387

M. ARTURO FALCONI BORJA
CI. 1720162179

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

CERTIFICADO

ING. LUIS MENA (DIRECTOR)
ING. OSCAR ARTEAGA (CODIRECTOR)

CERTIFICAN:

Que el trabajo “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOTOR PROTOTIPO DE CICLO STIRLING A BASE DE ENERGÍA SOLAR**” realizado por los señores: EDWIN GEOVANI CACUANGO ALBA Y MANUEL ARTURO FALCONI BORJA ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el Reglamento de Estudiantes de la Escuela Politécnica del Ejército.

Debido a que constituye un trabajo de excelente contenido científico que coadyuvará a la aplicación de conocimientos y al desarrollo profesional, Si recomiendan su publicación.

El mencionado trabajo consta de UN empastado y UN disco compacto el cual contiene los archivos en formato portátil de Acrobat. Autorizan a los señores: EDWIN GEOVANI CACUANGO ALBA Y MANUEL ARTURO FALCONI BORJA que lo entreguen al ING. JUAN CASTRO, en su calidad de Coordinador de Carrera.

Latacunga, Febrero del 2009.

Ing. Luis Mena
DIRECTOR

Ing. Oscar Arteaga
CODIRECTOR

DEDICATORIA

La presente tesis la dedico a mi papito Dios, a mi virgencita María, a mis padres y a mis hermanos. Quienes han sido mi inspiración con el pasar del tiempo.

A mi madre, por ser la persona más emprendedora que he conocido, que me ha enseñado a ser el mejor, cada día de mi vida.

A mi padre, el hombre más trabajador que me inculco el amor por los vehículos.

ED.

DEDICATORIA

A mis padres Manuel y Esmeralda que con todo su afán y sacrificio me permitieron llegar a la cumbre de mi etapa estudiantil, a mi segundo padre el doctor Julio Falconí quien con sus consejos ha sido mi guía para triunfar y conseguir mis metas, al ingeniero Diego Garcés al que considero mi hermano mayor por todo el apoyo brindado cuando más lo necesitaba.

Arturo

AGRADECIMIENTO

A mi Dios por darme a mis padres quienes me dieron la vida.

A mis padres por confiar en mí y apoyarme incondicionalmente en mis estudios.

A mi hermano Danny por apoyarme y enseñarme cosas valiosas que me las llevo en el alma.

A mi hermanita Jenniffer por ser mi orgullo.

A Bolívar por ser más que mi amigo mi hermano mayor, apoyarme en las buenas, malas y sobre todo en las peores.

A Susy mi mejor amiga y a todos mis amigos y compañeros de la U.

A Lili una persona súper especial que siempre la llevare en mi corazón, que me enseñó que al final siempre sale el sol.

ED.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por haberme permitido culminar con éxito esta etapa de mi vida, a la persona que me extendió la mano cuando lo necesite Javier.

Edwín, Bolívar mis sinceros y queridos amigos que confiaron siempre en mí.

De igual manera el reconocimiento imperecedero al ingeniero Esteban López, Karina, Edgar, Anahí, Tatiana, Daniel, y a todos mis amigos quienes con tesón y confianza contribuyeron a mi formación, y a aquella persona especial que estando cerca o lejos guió mi camino hasta la consecución de este sueño.

A mi tío político quien me guió a la elección de mi carrera Rodrigo.

Arturo.

RESUMEN

Para el desarrollo del proyecto de tesis se partió de varios puntos como son:

- Alimentación del motor (Energía solar).
- Forma y diseño del Motor.
- Sistema de Captación.

El motor Stirling solar utiliza como fuente de energía la radiación solar por lo que se realizó un análisis de Irradiación, temperatura, humedad y velocidad del viento en la ciudad de Latacunga, se realizaron toma de datos de campo, métodos matemáticos y programas como el ISOL y CENSOLAR.

Se realiza el diseño del concentrador solar con la utilización de varios parámetros como la temperatura requerida para el funcionamiento del motor, con la Radiación solar obtenida en la ciudad de Latacunga, de acuerdo con estos parámetros el tamaño del concentrador.

Posteriormente a estos datos se modela el motor Stirling con ayuda del programa SOLIDWORKS se realizan los análisis térmicos del motor para diseñar y elegir los materiales que se utilizaran para la construcción, en un inicio se van pasando de modelo en modelo hasta encontrar el mas óptimo.

Con el modelo óptimo resultante del análisis térmico se procede al análisis mecánico y de esfuerzos que soportara el motor Stirling, se van analizando los componentes más propensos a fatigarse por los esfuerzos producidos por el ciclo cerrado.

Se procede a la construcción del motor Stirling solar. El concentrador es fabricado de fibra de vidrio con refuerzos metálicos (estructura tubular), se pule la superficie de trabajo para colocar películas anti solares. El motor es construido de varios materiales como: dura aluminio, acero de plata, broce fosfórico acero de transmisión y acero ST 37.

Adicional al concentrador y el motor se construye un sistema manual para el seguimiento del sol, se lo construye de estructura tubular cuadrada.

Finalmente se realizan las pruebas de funcionamiento obteniendo resultados favorables.

Concluimos con varios aspectos para el funcionamiento del motor Stirling.

- El motor Stirling solar funciona con radiación directa.
- El motor debe tener una diferencia de temperatura mayor a 250 °C entre la zona de calentamiento y enfriamiento.
- La distancia del foco para el funcionamiento es de 480 mm.

El proyecto de tesis diseño y construcción de un motor prototipo de ciclo Stirling solar no genera ninguna emisión de gases contaminantes convirtiéndose en el motor más ecológico.

PRESENTACIÓN

En la actualidad el incremento del parque automotor a traído consigo un riesgo muy alto para las personas, debido a la gran cantidad de gases contaminantes que expulsa el vehículo, estas emisiones perjudican al medio ambiente ocasionando la destrucción de la capa de ozono y enfermedades mortales a los seres humanos como cáncer , asfixia, entre otras. Es por esto que nuestra tesis tiene el afán de evitar estos gases nocivos mediante una energía limpia como la solar.

Una de las alternativas para hacer funcionar motores es la energía solar ya que no tiene gases contaminantes como los combustibles fósiles y su costo es significativamente menor. Estos combustibles son menos contaminantes que los derivados del refinado de petróleo pero aun no son comerciales, por que se encuentran en etapas de investigación.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente presentamos el proyecto denominado

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOTOR PROTOTIPO DE CICLO STIRLING A BASE DE ENERGÍA SOLAR”

Para llevar a cabo el proyecto analizamos la heliofania en la ciudad de Latacunga para saber si nuestro prototipo funciona. Tomados estos datos y dando resultados alentadores comenzamos con la construcción de planos en solidworks.

En cuanto se contaba con los planos se realizo un análisis de materiales para saber cuáles eran los apropiados para la construcción del mismo. Luego se inicio la construcción y la realización de pruebas teniendo un prototipo Stirling funcionando con energía solar.

La construcción y pruebas realizadas es trabajo de sus autores, a través de las investigaciones requeridas para el desarrollo, para luego culminar con su proyecto.

ÍNDICE

	PÁG.
Carátula.....	i
Certificación.....	ii
Declaración de responsabilidad.....	iii
Autorización.....	iv
Certificado.....	v
Dedicatorias.....	vi
Agradecimientos.....	viii
Resumen.....	x
Presentación.....	xii
Índice.....	xiii
Índice de figuras.....	xviii
Índice de tablas.....	xxii
Índice de gráficas.....	xxiv

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Ciclo Térmico.....	2
1.1.1. Historia del motor Stirling.....	3
1.1.2. Principio térmico de los gases.....	4
1.1.3. Principio de funcionamiento del ciclo Stirling.....	5
1.1.4. Tipos de motor Stirling.....	8
1.1.4.1. Motor Stirling alfa.....	9
1.1.4.2. Motor Stirling beta.....	10
1.1.4.3. Motor Stirling gamma.....	11
1.1.5. Ventajas del motor de ciclo Stirling.....	12
1.2. Energía solar.....	12
1.2.1. Radiación solar.....	12

1.2.2. Tipos de radiación.....	13
1.2.2.1. Radiación solar ultravioleta.....	13
1.2.2.2. Radiación solar sensible.....	14
1.2.2.3. Radiación solar infrarroja.....	14
1.2.3. Captación de la energía solar.....	14
1.2.3.1. Captación fotónica.....	14
1.2.3.2. Captación térmica.....	15
1.2.3.3. Principio de funcionamiento.....	15
1.2.3.4. Efecto invernadero.....	16
1.2.4. Colectores concentradores.....	16
1.2.5. Tipos de concentradores.....	17
1.2.5.1. Concentradores de enfoque.....	18
1.2.5.1.1. Concentradores parabólicos.....	19
1.2.5.2. Concentradores fijos o semifijos.....	19
1.2.5.2.1. Concentrador parabólico compuesto.....	20
1.2.6. Receptores.....	21
1.2.7. Materiales reflectivos para concentradores solares.....	21
1.3. Beneficios ambientales de los motores Stirling vs. los motores Otto.....	22

CAPÍTULO II

2. DISEÑO TÉRMICO DEL MOTOR

2.1. Parámetros de preliminares	23
2.2. Determinación de las condiciones iniciales y de frontera.....	24
2.3. Modelado previo en SolidWorks del sistema térmico del motor.....	25
2.4. Diseño y análisis térmico del motor.....	27
2.5. Diseño de transferencia de calor del motor mediante Cosmos FloWorks.....	30
2.6. Diseño del sistema de captación solar.....	36
2.6.1. Determinación del recurso.....	36
2.6.2. Análisis del recurso solar.....	37
2.7. Diseño del concentrador solar.....	43
2.7.1. Ecuaciones para el concentrador solar.....	43

2.7.2. Análisis geométrico.....	45
---------------------------------	----

CAPÍTULO III

3. DISEÑO MECÁNICO DEL MOTOR

3.1. Parámetros de diseño del motor.....	49
3.2. Calculo de fuerza y torque inicial.....	50
3.2.1. Fuerza.....	50
3.2.2. Torque.....	50
3.3. Modelado previo del prototipo del motor Stirling en SolidWorks.....	51
3.4. Simulación y análisis dinámico del motor mediante CosmosMotion.....	54
3.4.1. Desplazamientos.....	55
3.4.2. Velocidades.....	57
3.4.3. Aceleraciones.....	59
3.4.4. Torque aplicado.....	61
3.5. Calculo de esfuerzos en el motor mediante CosmosWorks Designer.....	62
3.5.1. Pistón superior.....	62
3.5.1.1. Tensiones Von Mises del pistón superior.....	64
3.5.1.2. Desplazamiento estático del pistón superior.....	65
3.5.1.3. Deformaciones unitarias del pistón superior.....	66
3.5.1.4. Verificación del diseño del pistón superior.....	67
3.5.2. Pistón inferior.....	68
3.5.2.1. Tensiones Von Mises del pistón inferior.....	69
3.5.2.2. Desplazamiento estático del pistón inferior.....	70
3.5.2.3. Deformaciones unitarias del pistón inferior.....	71
3.5.2.4. Verificación del diseño del pistón inferior.....	72
3.5.3. Brazo de biela.....	73
3.5.3.1. Tensiones Von Mises del brazo de biela.....	74
3.5.3.2. Desplazamiento estático del brazo de Biela.....	75
3.5.3.3. Deformaciones unitarias del brazo de biela.....	76
3.5.3.4. Verificación de diseño del brazo de biela.....	77

3.5.4. Biela del pistón superior.....	78
3.5.4.1. Tensiones Von Mises de la biela del pistón superior.....	79
3.5.4.2. Desplazamiento estático de la biela del pistón superior.....	80
3.5.4.3. Deformaciones unitarias de la biela del pistón superior.....	81
3.5.4.4. Verificación del diseño de la biela del pistón superior.....	82
3.5.5. Biela del pistón inferior.	83
3.5.5.1. Tensiones Von Mises de la biela del pistón inferior.....	84
3.5.5.2. Desplazamiento estático de la biela del pistón inferior.	85
3.5.5.3. Deformaciones unitarias de la biela del pistón inferior.	86
3.5.5.4. Verificación del diseño de la biela del pistón inferior.....	87

CAPÍTULO IV

4. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE LOS COMPONENTES

4.1. Planos constructivos.....	88
4.2. Construcción y montaje del concentrador solar.....	89
4.3. Construcción y montaje de los componentes mecánicos.....	94
4.4. Construcción de la base del concentrador solar.....	99
4.5. Ensamblaje total del motor Stirling solar.....	102

CAPÍTULO V

5. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

5.1. Calibración y puesta a punto del motor Stirling solar.....	106
5.1.1. El motor.	106
5.1.2. Sistema de captación solar.	108
5.2. Pruebas de funcionamiento del motor Stirling solar.....	108
5.2.1. El motor.....	108
5.2.2. Concentrador.	110

5.2.3. Prueba total.....	112
5.3. Toma de datos bajo diferente régimen de funcionamiento.....	114
5.4. Análisis de resultados.....	114

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones.....	116
6.2. Recomendaciones.....	117
BIBLIOGRAFÍA.....	118
ANEXOS.....	121

ÍNDICE DE FIGURAS

PÁG.

CAPÍTULO I

Figura 1.1. Sir Robert Stirling.....	3
Figura 1.2. Ciclo de Carnot.....	4
Figura 1.3. Funcionamiento del ciclo Stirling.....	5
Figura 1.4. Ciclo Stirling.....	6
Figura 1.5. Compresión isotérmica.....	7
Figura 1.6. Adición de calor a volumen constante.....	7
Figura 1.7. Expansión isotérmica.....	8
Figura 1.8. Extracción de calor a volumen constante.....	8
Figura 1.9. Motor Stirling alfa	9
Figura 1.10. Motor Stirling beta.....	10
Figura 1.11. Motor Stirling gamma.....	11
Figura 1.12 Captación térmica.....	15
Figura 1.13. Colectores concentradores.....	17
Figura 1.14. Concentradores de enfoque.....	18
Figura 1.15. Concentradores parabólicos.....	19
Figura 1.16. Concentrador fijos o semifijo.....	20
Figura 1.17. Concentrador parabólico compuesto.....	20
Figura 1.18. Receptores.....	21

CAPÍTULO II

Figura 2.1. Motor Stirling perspectiva estallada.....	25
Figura 2.2. Cilindro de calor.....	26
Figura 2.3. Modelo de motor Stirling transparencia.....	26
Figura 2.4. Modelo de motor Stirling.....	27
Figura 2.5. Ciclo Stirling.....	27
Figura 2.6. Análisis térmico.....	34

Figura 2.7. Análisis térmico en corte.....	35
Figura 2.8. Análisis térmico panorama de arriba.....	36
Figura 2.9. Mapa de irradiación solar del Ecuador.....	38
Figura 2.10. Mapa de irradiancia máxima directa al medio día anual.....	39
Figura 2.11. Mapa de irradiancia máxima global al medio día anual.....	39
Figura 2.12. Irradiación programa Censol 4.0.....	40
Figura 2.13. Temperatura programa Censol 4.0.....	41
Figura 2.14. Perfil de la parábola.....	46
Figura 2.15. Diámetro del concentrador.....	47
Figura 2.16. Altura del concentrador.....	47
Figura 2.17. Modelado del concentrador.....	48

CAPÍTULO III

Figura 3.1. Ensamble del motor Stirling.....	51
Figura 3.2. Ensamble del cigüeñal.....	51
Figura 3.3. Ensamble del block.....	52
Figura 3.4. Ensamble de rodamiento.....	52
Figura 3.5. Ensamble de volante.....	53
Figura 3.6. Motor ensamblado.....	53
Figura 3.7. Simulación del motor en COSMOSMotion.....	54
Figura 3.8. Desplazamiento del pistón 1.....	55
Figura 3.9. Desplazamiento del pistón 2.....	56
Figura 3. 10. Velocidad del pistón 1.....	57
Figura 3.11. Velocidad del pistón 2.....	58
Figura 3.12. Aceleración del pistón 1.....	59
Figura 3.13. Aceleración del pistón 2.....	60
Figura 3.14. Momento de traslación.....	61
Figura 3.15. Parámetros en Cosmosworks.	62
Figura 3.16. Tensiones Von Mises del pistón superior	64
Figura 3.17. Desplazamiento estático del pistón superior.....	65
Figura 3.18. Deformaciones unitarias del pistón superior.....	66
Figura 3.19. Verificación del diseño biela pistón superior.....	67

Figura 3.20. Tensiones Von Mises del pistón inferior.....	69
Figura 3.21. Desplazamiento estático del pistón inferior.....	70
Figura 3.22. Deformaciones unitarias del pistón inferior.....	71
Figura 3.23. Verificación de diseño biela pistón inferior.....	72
Figura 3.24. Tensiones Von Mises del brazo de biela.....	74
Figura 3.25. Desplazamiento estático del brazo de biela.....	75
Figura 3.26. Deformaciones unitarias del brazo de biela.....	76
Figura 3.27. Verificación del diseño del brazo de biela.....	77
Figura 3.28. Tensiones Von Mises de la biela del pistón 1.....	79
Figura 3.29. Desplazamiento estático de la biela del pistón 1.....	80
Figura 3.30. Deformaciones unitarias de la biela del pistón 1.....	81
Figura 3.31. Verificación del diseño de la biela del pistón 1.....	82
Figura 3.32. Tensiones Von Mises de la biela del pistón 2.....	84
Figura 3.33. Desplazamiento estático de la biela del pistón 2.....	85
Figura 3.34. Deformaciones unitarias biela del pistón 2.....	86
Figura 3.35. Verificación del diseño de la biela del pistón 2.....	87

CAPÍTULO IV

Figura 4.1. Construcción del molde.....	89
Figura 4.2. Planchas de tol para el molde.....	89
Figura 4.3. Preparación del molde.....	90
Figura 4.4. Molde del concentrador.....	90
Figura 4.5. Concentrador en fibra de vidrio.....	91
Figura 4.6. Anillo para soporte del concentrador.....	91
Figura 4.7. Retoque del anillo soporte del concentrador.....	92
Figura 4.8. Retoque de la superficie interna.....	92
Figura 4.9. Secado de la pintura.....	93
Figura 4.10. Planos del motor.....	94
Figura 4.11. Maquinado del acero ST37.....	95
Figura 4.12. Maquinado del acero bonificado SAE 4120.....	95
Figura 4.13. Maquinado del bronce fosforito.....	96
Figura 4.14. Maquinado de acero de plata.....	97

Figura 4.15. Pulido de block.....	97
Figura 4.16. Piezas de armado.....	98
Figura 4.17. Armado de la base del concentrador.....	99
Figura 4.18. Base del concentrador.....	99
Figura 4.19. Pulido de imperfecciones.....	100
Figura 4.20. Limpieza de la base del concentrador.....	100
Figura 4.21. Colocación de ruedas.....	101
Figura 4.22. Comprobación de medidas de la base.....	101
Figura 4.23. Concentrador solar armado.....	102
Figura 4.24. Ensamblaje de pistones.....	102
Figura 4.25. Ensamble de cigüeñal.....	103
Figura 4.26. Ensamble del volante.....	103
Figura 4.27. Ensamble del cilindro de calor.....	104
Figura 4.28. Revisión del apriete.....	104
Figura 4.29. Motor terminado.....	105

CAPÍTULO V

Figura 5.1. Lubricación al motor Stirling.....	107
Figura 5.2. Motor totalmente lubricado.....	107
Figura 5.3. Comprobación del mecanismo.....	108
Figura 5.4. Prueba del motor.....	109
Figura 5.5. Funcionamiento del motor.....	109
Figura 5.6. Gafas.....	110
Figura 5.7. Guantes de cuero.....	110
Figura 5.8. Obtención de la distancia del foco verdadero.....	111
Figura 5.9. Foco real del concentrador.....	111
Figura 5.10. Prueba total.....	112
Figura 5.11. Funcionamiento del motor Stirling solar.....	113
Figura 5.12. Visualización del foco.....	113

ÍNDICE DE TABLAS

PÁG.

CAPÍTULO I

Tabla I.1. Materiales reflectivos para concentrados solares.....	21
--	----

CAPÍTULO II

Tabla II.1. Ubicación geográfica de la ciudad de Latacunga.....	23
Tabla II.2. Radiación solar por el INAMHI, software Isol y medición de campo en la ciudad de Latacunga.....	23
Tabla II.3. Humedad por el INAMHI y medición de campo en la ciudad de Latacunga.....	24
Tabla II.4. Temperatura por el INAMHI y medición de campo en la ciudad de Latacunga.....	24
Tabla II.5. Velocidad del viento por el INAMHI en la ciudad de Latacunga.....	24
Tabla II.6. Materiales de los elementos del motor.....	30
Tabla II.7. Propiedades del aluminio.....	32
Tabla II.8. Propiedades del acero de plata.....	32
Tabla II.9. Propiedades del acero de transmisión.....	33
Tabla II.10. Propiedades del acero.....	33
Tabla II.11. Propiedades del bronce fosfórico.....	34
Tabla II.12. Datos ubicación ESPE – L.....	37
Tabla II.13. Cálculos de irradiación mediante métodos matemáticos por LAN gley.....	38
Tabla II.14. Irradiancia y temperatura promedio año 2008 CENSOLAR.....	40
Tabla II.15. Irradiación máxima, mínima y promedio ISOL.....	41
Tabla II.16. Irradiación medida en la ESPE-L de 9 am – 3 pm. (Prom. Día).....	42
Tabla II.17. Heliofanía en la ciudad de Latacunga.....	42
Tabla II.18. Radiación solar en la ciudad de Latacunga por el INAMHI, software Isol y medición de campo.....	43

Tabla II.19. Temperatura por relación de concentración.....	44
Tabla II. 20. Relación foco diámetro.....	45
Tabla II.21. Datos de la parábola del concentrador.....	46

CAPÍTULO III

Tabla III.1. Desplazamiento del pistón 1.....	55
Tabla III.2. Desplazamiento del pistón 2.....	56
Tabla III.3. Velocidad del pistón 1.....	57
Tabla III.4. Velocidad del pistón 2.....	58
Tabla III.5. Aceleración del pistón 1.....	59
Tabla III.6. Aceleración del pistón 2.....	60
Tabla III.7. Propiedades del material del pistón superior.....	63
Tabla III.8. Resultados del estudio del pistón superior.....	66
Tabla III.9. Propiedades del material del pistón inferior.....	68
Tabla III.10. Resultados del estudio del pistón inferior.....	71
Tabla III.11. Propiedades del material del brazo de biela.....	73
Tabla III.12. Resultados del estudio del brazo de biela.....	76
Tabla III.13. Propiedades del material de la biela del pistón superior.....	78
Tabla III.14. Resultados del estudio de la biela del pistón 1.....	81
Tabla III.15. Propiedades del material de la biela del pistón inferior.....	83
Tabla III.16. Resultados del estudio de la biela del pistón 2.....	86

CAPÍTULO V

Tabla V.1. Datos del foco.....	112
Tabla V.2. Datos de obtenidos.....	114
Tabla V.3. ΔT vs. RPM.....	114

ÍNDICE DE GRÁFICAS

PÁG.

CAPÍTULO III

Gráfica 3.1 Tensiones Von Mises del pistón superior.....	64
Gráfica 3.2 Tensiones Von Mises del pistón inferior.....	69
Gráfica 3.3 Tensiones Von Mises del brazo de biela.....	75
Gráfica 3.4 Tensiones Von Mises de la biela del pistón 1.....	80
Gráfica 3.5 Tensiones Von Mises de la biela del pistón 2.....	85

CAPÍTULO V

Gráfica 5.1. ΔT vs. RPM.....	115
--------------------------------------	-----

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la humanidad atraviesa una etapa clave para la conservación de nuestro planeta tierra y de sus recursos.

Desde el siglo XIX donde aparecen los motores a vapor, y posteriormente los motores de combustión interna, cuyos combustibles se derivan del refinado del petróleo, han ayudado al progreso de la humanidad pero a la vez con el pasar del tiempo y con el incremento de motores a diario, que utilizan combustibles como la gasolina y el diesel, han ido generando grandes cantidades de gases combustionados, que producen estragos en nuestro ambiente tanto así que la humanidad está buscando maneras de producir combustibles que no dañen a nuestro medio, como lo son los biocombustibles.

Estos combustibles son menos contaminantes que los derivados del refinado de petróleo pero, aun no son comerciales, por que se encuentran en etapas de investigación y por otra parte su costo.

Otra alternativa son los motores eléctricos, los cuales no producen contaminación pero que tienen algunas restricciones como lo es el costo, el mantenimiento y la fuente de energía. Las cuales se encuentran en procesos de investigación para la producción en serie.

Ahora conscientes en la etapa regenerativa que el mundo quiere dar para conservar nuestro planeta, nos sumamos a la investigación de alternativas de motores que no contaminen, el motor Stirling no es un invento actual pero que por su gran aporte está renaciendo como una alternativa más.

1.- MARCO TEÓRICO

1.1.- CICLO TÉRMICO

Transformar la energía calorífica en energía mecánica es una de las mayores prioridades de la ingeniería, en cualquier máquina, hace falta cierta cantidad de energía para producir trabajo; es imposible que una máquina realice trabajo sin necesidad de energía.

*“El motor térmico de Stirling es un dispositivo mediante el cual un sistema realiza un ciclo, en el que absorbe calor de un foco de temperatura alta, cede una cantidad de calor a un foco de temperatura inferior y realiza un trabajo sobre el exterior”.*¹

La conversión del trabajo en calor se puede conseguir con un rendimiento del 100 %, pero la conversión de calor en trabajo viene limitada por el Segundo principio de la Termodinámica: “No es posible un proceso cuyo único resultado sea la absorción de calor procedente de un foco y la conversión íntegra de este calor en trabajo, sin producir ningún otro efecto” (enunciado de Kelvin-Planck).²

Sin embargo el motor térmico de Stirling tiene el potencial de alcanzar el rendimiento de Carnot, lo cual le permite, teóricamente, alcanzar el límite máximo de rendimiento.

¹ CASTRO, M. Energía Solar Térmica de Baja Temperatura, Editorial Progensa, 1^{ra} Edición, Sevilla ,2000.

² SCHAUM, Termodinámica para Ingenieros, Editorail Mcgraw Hill, 1^{ra} Edición, España, 2004.

1.1.1. HISTORIA DEL MOTOR STIRLING

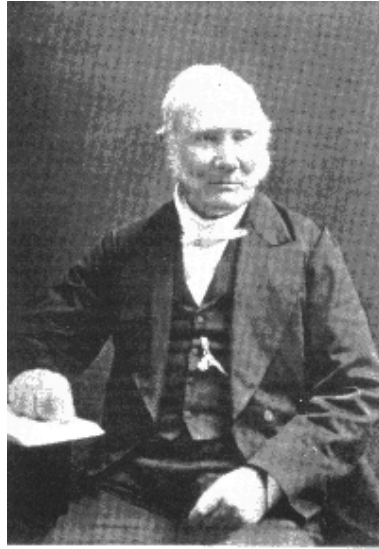


FIGURA 1.1. Sir Robert Stirling

El motor Stirling aparece en el año de 1816 patentado por Sir Robert Stirling, un fraile escocés, que se dedicaba a sus labores religiosas, pero que además se dedicó a la invención durante toda su vida.

La máquina de vapor, como fuente de energía mecánica estaba muy desarrollada y ampliamente utilizada ya en el principio del siglo XIX y era la única fuente de la energía mecánica, sin tomar en cuenta los molinos de agua o de viento.

Sir Robert Stirling consideraba demasiado complicado calentar agua en una caldera, producir vapor, expansionarlo en un motor, condensarlo y mediante una bomba introducir de nuevo el agua en la caldera, sumado a los constantes accidentes fatales causados frecuentemente por las máquinas a vapor, ya que aún no se había inventado el acero y las calderas explotaban con facilidad por la subida de presión al interior de ellas, matando a quienes se encontraban alrededor.

El motor de Stirling realizaba los mismos procesos de calentamiento y enfriamiento de un gas, pero todo dentro del motor y el gas era aire en vez de vapor de agua, por lo que el motor no necesitaba caldera.

Existían distintas maneras de denominar los motores térmicos: Motores caloríficos, Motores de aire caliente, Motores de Gas, y, por fin motores de Stirling. La historia de desarrollo de los motores de aire caliente adquirió una transformación muy peculiar, a través de la máquina de vapor, y la ingeniería de motores en general, primero convirtiéndose en el motor de aire caliente, y después en los motores de combustión interna, los de Otto, (gasolina) y Diesel, (fuel). Los últimos son mas el producto de la ola de transformación de petróleo en combustibles, que ágilmente fueron ocupando, prácticamente todo el mercado de transporte y otras aplicaciones, expulsando por completo a sus antepasados, la máquina de vapor y el motor Stirling.

1.1.2. PRINCIPIO TÉRMICO DE LOS GASES

Un concepto esencial de la termodinámica es el de sistema macroscópico, que se define como un “conjunto de materia que se puede aislar espacialmente y que coexiste con un entorno infinito e imperturbable”.³

El estado de un sistema macroscópico se puede describir mediante propiedades medibles como la temperatura, la presión o el volumen, que se conocen como variables de estado.

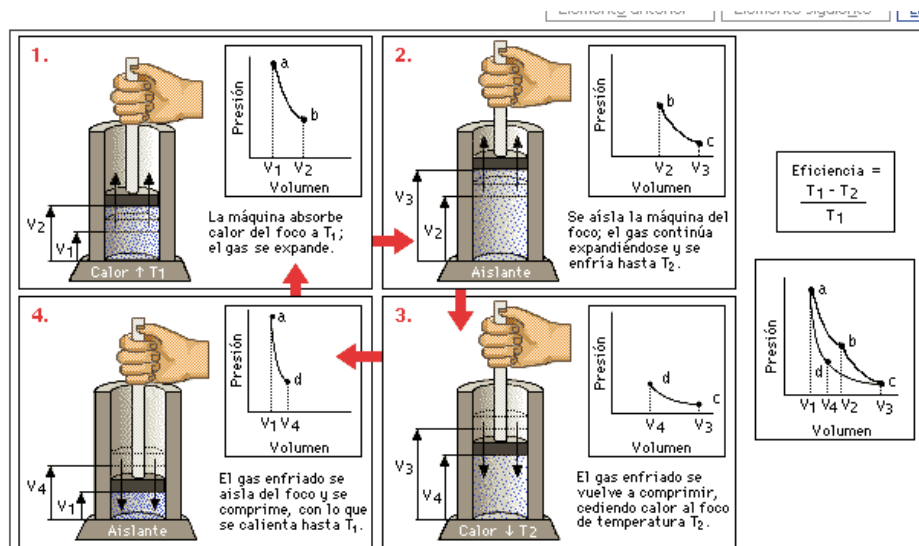


FIGURA 1.2. Ciclo de Carnot

³ SCHAUM, Termodinámica para Ingenieros, Editorail Mcgraw Hill, 1^{ra} Edición, España, 2004.

1.1.3. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL CICLO STIRLING

Los motores de ciclo Stirling son motores de "ciclo cerrado". En estos motores existe una cantidad fija de gas en el interior, que no varía, si se produjese por cualquier causa variación, el circuito no funcionaría por pérdida de compresión y por tanto de energía.

Cuando el gas se calienta éste se expande y aumenta la presión interior al no variar el espacio en el que está cerrado; este calentamiento viene seguido de un enfriamiento. El motor realiza ambas variaciones de calor y frío en cada revolución del volante.

- Calentamiento del aire → Aumento de presión.
- Enfriamiento del aire → Disminución de presión.

La variación de presión actúa en el cilindro del desplazador -zona de enfriamiento- con lo que la energía termal (calor) se convierte en energía mecánica (giro del volante y cigüeñal).

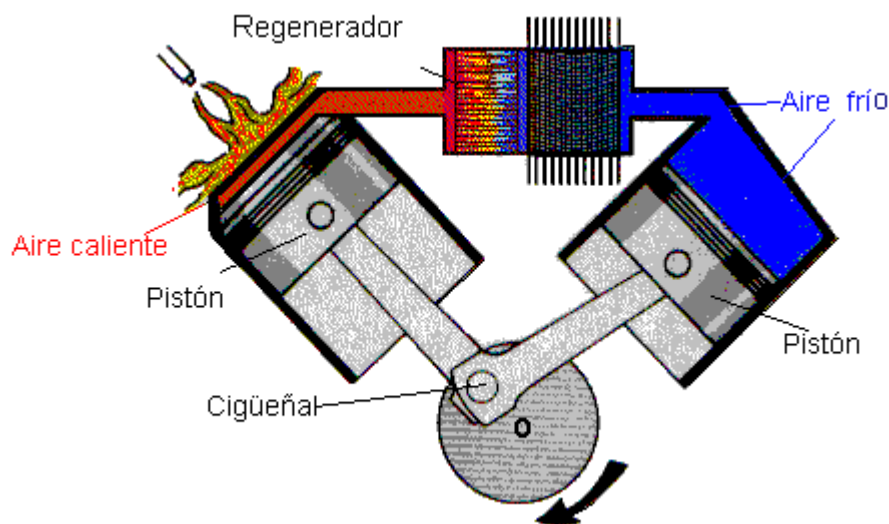


FIGURA 1.3. Funcionamiento del Ciclo Stirling

Hay algunos aspectos básicos a entender en la operación de un motor Stirling:

- El motor tiene dos pistones y el regenerador. El regenerador divide al motor en dos zonas, una zona caliente y una zona fría.

- El regenerador es un medio poroso, capaz de absorber o ceder calor y con conductividad térmica despreciable.
- El fluido de trabajo está encerrado en el motor y los pistones lo desplazan de la zona caliente a la fría o viceversa en ciertas etapas del ciclo. Por lo tanto se trata de un ciclo cerrado.
- Cuando se desplaza el fluido desde la zona caliente a la fría (o al revés), este atraviesa el regenerador.
- El movimiento de los pistones es sincronizado para que se obtenga trabajo útil.
- Se supone que el volumen muerto es cero y el volumen de gas dentro del regenerador es despreciable en el caso del ciclo teórico. Como en el ciclo real esto no ocurre, el rendimiento es algo inferior.
- En el ciclo teórico se supone que la eficiencia del regenerador es de un 100%. Es decir devuelve todo el calor almacenado y además con recuperación total de temperaturas.

El motor Stirling ideal es un motor térmico cuya sustancia de trabajo es un gas caliente (al que consideramos gas perfecto) y sigue los siguientes procesos:

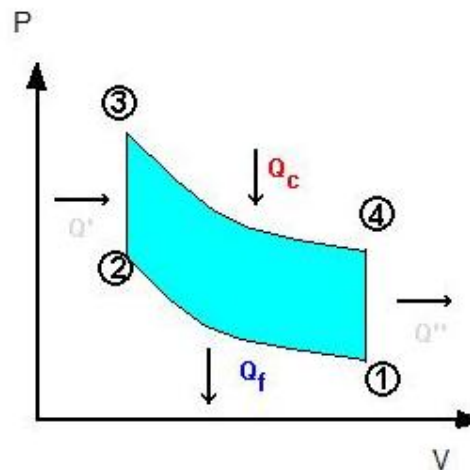


FIGURA 1.4. Ciclo Stirling

- 1-2. Compresión Isotérmica.
- 2-3. Adición de calor a volumen constante (isocórico o isócoro).
- 3-4. Expansión Isotérmica.
- 4-1. Extracción de calor a volumen constante.

- En **1** el cilindro frío está a máximo volumen y el cilindro caliente está a volumen mínimo, pegado al regenerador. El regenerador se supone está "cargado" de calor. El fluido de trabajo está a T_f a volumen máximo, V_{max} y a p_1 .

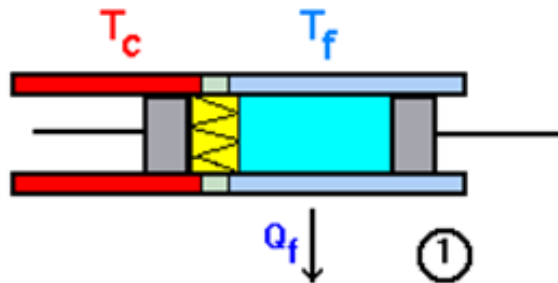


FIGURA 1.5. Compresión Isotérmica.

- Entre **1 y 2** se extrae la cantidad Q_f de calor del cilindro (por el lado frío). El proceso se realiza a T_f constante. Por lo tanto al final (en **2**) se estará a volumen mínimo, V_{min} , T_f y p_2 . El pistón de la zona caliente no se ha desplazado. En esta evolución el sistema *absorbe* trabajo.

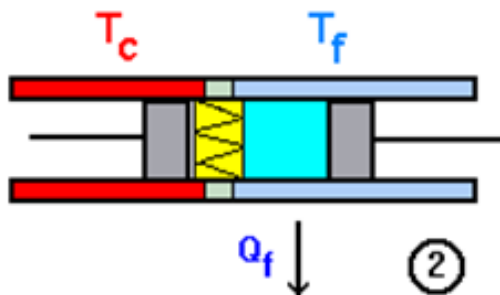


FIGURA 1.6. Adición de calor a volumen constante (isocórico o isócoro).

- Entre **2 y 3** los dos pistones se desplazan en forma paralela. Esto hace que todo el fluido atraviese el regenerador. Al ocurrir esto, el fluido absorbe la cantidad Q' de calor y eleva su temperatura de T_f a T_c . Por lo tanto al final (en **3**) se estará a T_c , V_{min} y p_3 . El regenerador queda "descargado". En esta evolución el trabajo neto absorbido es cero (salvo por pérdidas por roce al atravesar el fluido el regenerador).

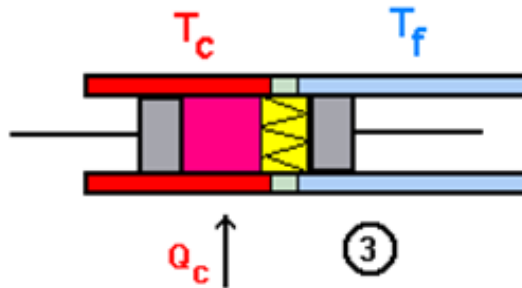


FIGURA 1.7. Expansión Isotérmica.

- Entre **3 y 4** el pistón frío queda junto al lado frío del regenerador y el caliente sigue desplazándose hacia un mayor volumen. Se absorbe la cantidad de calor Q_c y el proceso es (idealmente) isotérmico. Al final el fluido de trabajo está a T_c , el volumen es V_{max} y la presión es p_4 .

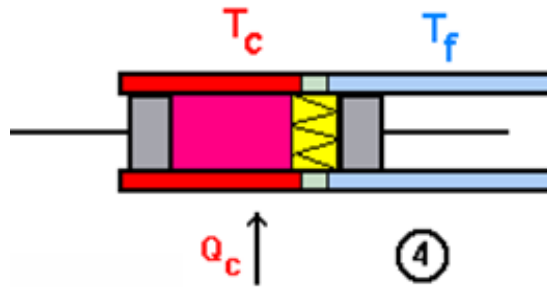


FIGURA 1.8. Extracción de calor a volumen constante.

- Finalmente los dos pistones se desplazan en forma paralela de **4 a 1**, haciendo atravesar el fluido de trabajo al regenerador. Al ocurrir esto el fluido cede calor al regenerador, este se carga de calor, la temperatura del fluido baja de T_c a T_f y la presión baja de p_4 a p_1 . Al final de la evolución el fluido está a V_{max} , p_1 y T_f . El regenerador sigue "cargado" de calor.

1.1.4. TIPOS DE MOTOR STIRLING

Básicamente los motores Stirling se clasifican en tres tipos:

1. Motor Stirling alfa.
2. Motor Stirling beta, y.
3. Motor Stirling gamma.

1.1.4.1. Motor Stirling alfa

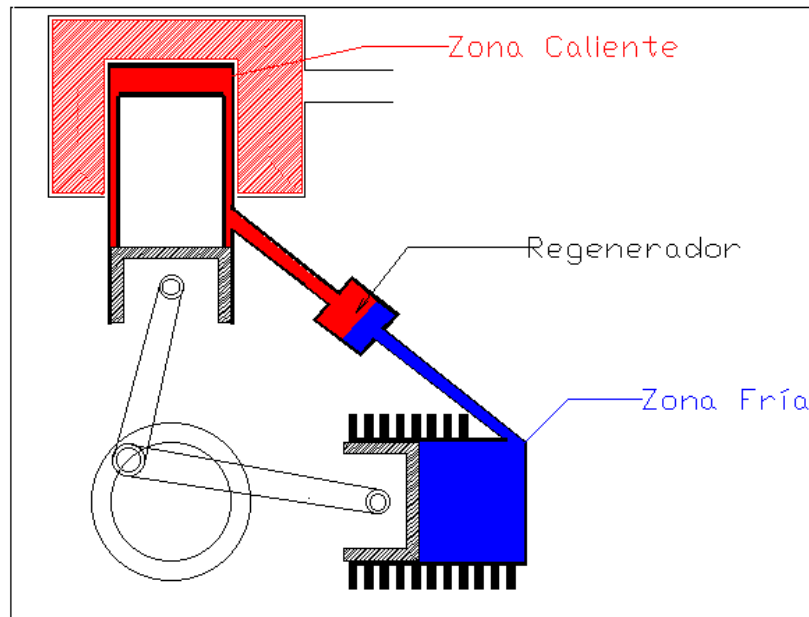


FIGURA 1.9. Motor Stirling alfa

Este tipo de motor no utiliza desplazador como en la patente original de Stirling, pero desde el punto de vista termodinámico el funcionamiento es similar. Fue diseñado por Rider en Estados Unidos, consta de dos cilindros independientes conectados por un tubo en el que se sitúa el regenerador que almacenara y cederá el calor.

En cada uno de los cilindros hay un pistón que se mueve 90 grados desfasado respecto al otro, uno de los cilindros se calienta mediante un mechero de gas o alcohol y el otro se enfría mediante aletas o agua.

El desfase entre los dos pistones hace que el aire, pase de un cilindro a otro calentándose, enfriándose y realizando el trabajo que permite el funcionamiento del motor.

1.1.4.2. Motor Stirling beta

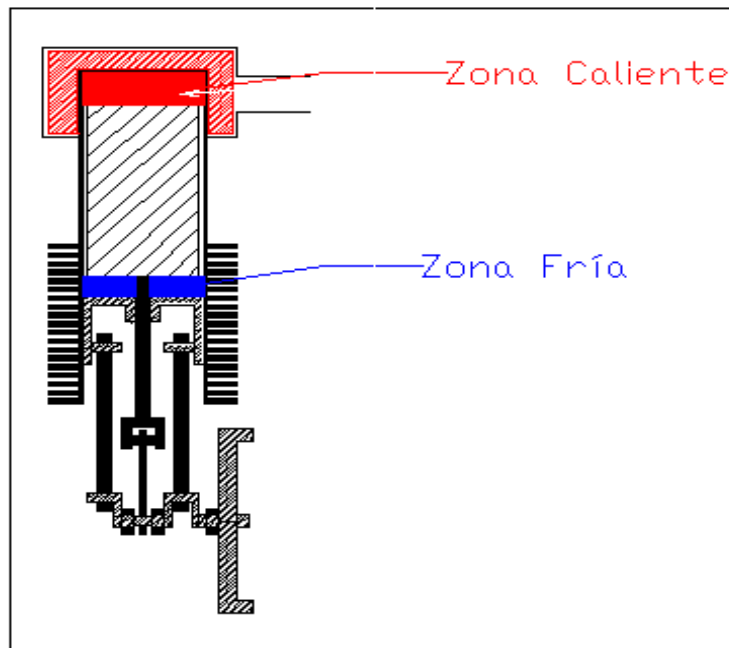


FIGURA 1.10. Motor Stirling beta

El motor original de Stirling es de este tipo, consta de un cilindro, con una zona caliente (mediante un mechero de gas, alcohol etc.), una zona fría (refrigerada por aletas, agua etc.), en el interior del cilindro esta el desplazador cuya misión es pasar el aire de la zona fría a la caliente y viceversa.

Los motores pequeños no suelen llevar regenerador, únicamente una holgura de algunas décimas de milímetro entre el desplazador y el cilindro para permitir el paso del aire.

Los motores grandes suelen llevar un regenerador externo por el que debe pasar el aire en su camino de la zona fría a la caliente y viceversa. Concéntrico con el desplazador está situado el pistón de potencia.

Mediante un cigüeñal especial el movimiento del pistón y el desplazador están desfasados 90 grados, lo que permite que el motor funcione, desde el punto de vista termodinámico es el motor más eficaz, pero su construcción es complicada

ya que el pistón debe de tener dos bielas y permitir el paso del vástago que mueve el desplazador.

1.1.4.3. Motor Stirling gamma

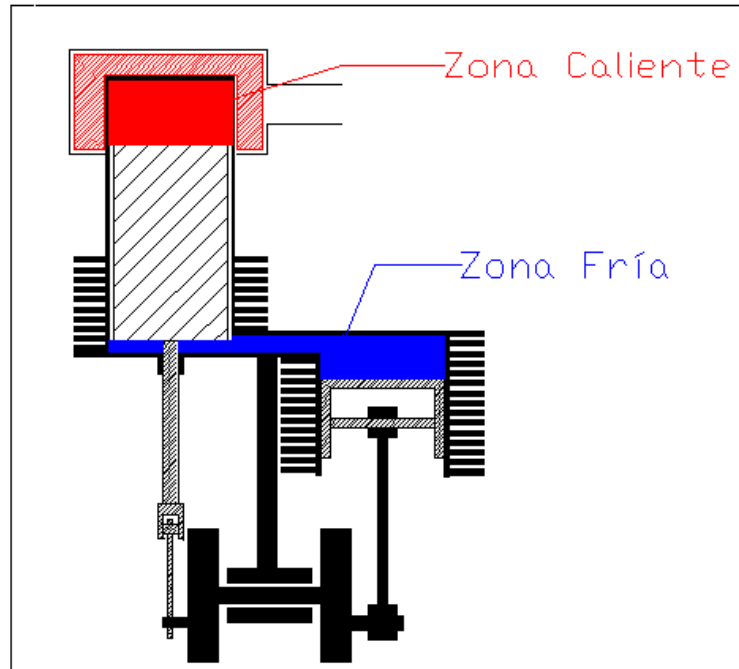


FIGURA 1.11. Motor Stirling gamma.

Este tipo de motor esta derivado del beta, consta de dos cilindros separados en uno de los cuales se sitúa el desplazador y en otro el pistón de potencia.

Los sistemas para enfriar y calentar son idénticos a los del tipo beta, en este tipo el pistón de potencia es mucho más sencillo ya que es similar al de un motor de motocicleta. Aquí el pistón y el desplazador también deben de moverse desfasados 90 grados, lo cual se consigue mediante el cigüeñal adecuado.

Desde el punto de vista termodinámico es menos eficaz que el tipo beta, puesto que la expansión de trabajo se realiza en su totalidad a menor temperatura.

1.1.5. VENTAJAS DEL MOTOR DE CICLO STIRLING

Las ventajas del motor Stirling frente a sus principales competidores los motores de combustión interna diesel y Otto:

- Alcanza un elevado rendimiento, ya que el motor Stirling puede potencialmente alcanzar el rendimiento ideal de Carnot.
- Posee una baja cantidad de elementos móviles, sobre todo en comparación con los motores de combustión interna, lo que permite pérdidas de rendimiento por fricción muy bajas.
- El hecho que el ciclo en la realidad sea cerrado hace que potencialmente se puedan obtener niveles muy bajos de emisiones.
- Como intercambia calor con el exterior, se pueden utilizar una gran cantidad de fuentes de calor, como por ejemplo energía nuclear, energía solar y combustibles fósiles, entre otras.
- El bajo nivel de ruido y la ausencia de vibraciones con que opera.

1.2. ENERGÍA SOLAR

La energía solar es la energía obtenida directamente del Sol. La radiación solar incidente en la Tierra puede aprovecharse, por su capacidad para calentar, o directamente, a través del aprovechamiento de la radiación en dispositivos ópticos o de otro tipo. Es un tipo de energía renovable y limpia, lo que se conoce como energía verde.

1.2.1. RADIACIÓN SOLAR

Se conoce por radiación solar al “conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol”⁴. El Sol se comporta prácticamente como un cuerpo negro que emite energía siguiendo la ley de Planck a una temperatura de unos 6000 K. La radiación solar se distribuye desde el infrarrojo hasta el ultravioleta.

⁴ WILSON, J. Energía Solar, Editorial Alambra, 1^{ra} Edición, Madrid 1982.

La magnitud que mide la radiación solar que llega a la Tierra es la irradiancia, que mide la energía que, por unidad de tiempo y área, alcanza a la Tierra. Su unidad es el W/m² (vatio por metro cuadrado).

La mayoría de las fuentes de energía usadas por el hombre derivan indirectamente del Sol. Los combustibles fósiles preservan energía solar capturada hace millones de años mediante fotosíntesis, la energía hidroeléctrica usa la energía potencial del agua que se condensó en altura después de haberse evaporado por el calor del Sol, etc.

1.2.2. TIPOS DE RADIACIÓN

1.2.2.1. Radiación solar ultravioleta

“La radiación solar ultravioleta o radiación UV es una parte de la energía radiante (o energía de radiación) del sol, se transmite en forma de ondas electromagnéticas en cantidad casi constante (constante solar), su longitud de onda fluctúa entre 100 y 400 nm y constituye la porción más energética del espectro electromagnético que incide sobre la superficie terrestre”.⁵

La radiación UV desempeña un papel importante en la determinación de las condiciones climáticas, el balance energético y el equilibrio natural del planeta. La medición continua de este parámetro permite estudiar su comportamiento y relación con el estado de la biosfera y la salud humana.

La radiación UV se clasifica con relación a su comportamiento en la atmósfera terrestre:

Radiación solar ultravioleta tipo A (UV-A). Su longitud de onda fluctúa entre 320 y 400 nm. Alcanza totalmente la superficie terrestre, no es retenida por la atmósfera.

⁵ CASTRO, M. Energía Solar Térmica de Baja Temperatura, Editorial Progensa, 1^{ra} Edición, Sevilla ,2000.

Radiación solar ultravioleta tipo B (UV-B). Su longitud de onda fluctúa entre 280 a 320 nm. El 90% se bloquea por el ozono y el oxígeno de la atmósfera. Es más energética y dañina para la biosfera que la radiación UV-A.

Radiación solar ultravioleta tipo C (UV-C). Su longitud de onda fluctúa entre 100 y 280 nm constituye la fracción más energética. Este tipo de radiación y otras partículas energéticas (rayos X, rayos gamma y rayos cósmicos) son retenidas totalmente en la región externa de la atmósfera y no alcanzan la superficie terrestre.

1.2.2.2. Radiación solar visible (espectro visible o luz visible)

Representa el 40% de la energía solar total que llega a la Tierra, su ventana espectral está limitada entre los 0.400 y 0.770 μm .

1.2.2.3. Radiación solar infrarroja

Aproximadamente aporta el 51% de la energía que llega a la tierra.

1.2.3. CAPTACION DE LA ENERGÍA SOLAR

Como rasgos generales podemos decir que la energía solar es de elevada calidad energética, de pequeño o nulo impacto ecológico e inagotable a escala humana; sin embargo existen algunos problemas a la hora de su aprovechamiento: la energía llega a la Tierra de manera dispersa y semialeatoria, estando sometida a ciclos día-noche y estacionales invierno-verano.

Dicho aprovechamiento puede hacerse de dos maneras: por captación térmica y por captación fotónica.

1.2.3.1. Captación fotónica

Capaz de aprovechar los fotones energéticos de la luz y convertirlos directamente en otra forma energética, responsable por tanto de las transformaciones tanto fotoquímicas, biomasa como fotoeléctricas (energía eléctrica fotovoltaica).

1.2.3.2. Captación Térmica

Se entiende por captación térmica de la energía solar al “procedimiento de transformación de la energía radiante del sol en calor o energía térmica”.⁶

Nos referimos a aplicaciones de la energía solar a baja temperatura cuando la energía térmica que se obtiene se utiliza para temperaturas inferiores a 80 °C.

Se pretende de esta forma obtener a partir del sol una energía que podemos utilizar en aplicaciones térmicas: calentar agua sanitaria, usos industriales, calefacción de espacios, calentamiento de piscinas, secaderos, etc.

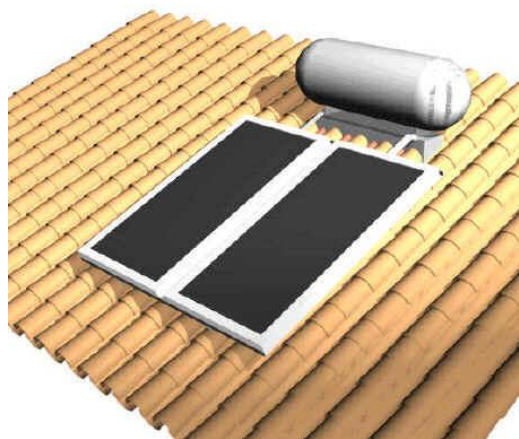


FIGURA 1.12 Captación Térmica

1.2.3.3. Principio de funcionamiento

Cuando se expone una placa metálica al sol, se calienta, pero si además esta placa es negra, la energía radiante del sol es absorbida en mayor medida. Cuando se calienta la placa negra ésta aumenta su temperatura con lo cual empieza a perder calor por los distintos mecanismos: por conducción a través de los soportes que lo sujetan, por convección a través del aire que le rodea y por radiación.

6

JUTGLAR,L. Energía Solar, Editorial Ceac, 1^{ra} Edición, Barcelona 2004

1.2.3.4. Efecto invernadero

Al colocar un cristal entre la placa absorbidora y el sol ocurre que, como el cristal es transparente a la radiación solar pero es opaco a la radiación infrarroja, no deja pasar la radiación de mayor longitud de onda que emite la placa al calentarse.

De esta forma se produce una “trampa energética de radiaciones” que impide que la energía radiante que ha atravesado el vidrio vuelva a salir; esta trampa constituye el denominado efecto invernadero. El vidrio también evita el contacto directo de la placa con el aire ambiente con lo que, además, se evitarán las pérdidas por convección antes referidas.

1.2.4. COLECTORES CONCENTRADORES

Existen muchas aplicaciones, sobre todo a nivel industrial, donde se necesita que la energía sea liberada a altas temperaturas, esto no se puede lograr con los colectores solares planos debido a las características propias de este tipo de colectores y a que la radiación solar es una energía de baja intensidad. En consecuencia, para obtener temperaturas altas (arriba de los 100 °C), se hace necesario incrementar la intensidad de la energía solar. Esto se puede lograr disminuyendo el área por donde ocurren las pérdidas de calor, e interponiendo un dispositivo óptico entre la fuente de radiación (sol) y la superficie absorbidora, que debe ser pequeña comparada con la del dispositivo óptico. Esta es precisamente la función que desempeñan los colectores concentradores. De esta manera, en el absorbedor, podemos tener densidades de energía que van desde 1.5 hasta varios miles de veces la radiación solar que llega al sistema óptico.

Con los colectores concentradores de energía solar, se pueden obtener temperaturas entre 100 y 500 °C si se usan colectores focales rudimentarios, entre 500 y 1500 °C si el sistema óptico de los colectores tiene un buen acabado y entre 1500 y 3500 °C si el sistema óptico tiene un acabado perfecto.

Aunque con este tipo de colectores se pueden obtener altas temperaturas de operación, estos presentan varios problemas técnicos desde el punto de vista

ingenieril comparados con los colectores solares planos. Deben orientarse continuamente al sol de manera precisa mediante un mecanismo apropiado debido a que este tipo de colectores utilizan únicamente la energía solar directa.

Por otra parte, el acabado de las superficies que constituyen el sistema óptico no sólo debe ser de buena calidad, sino que debe mantener sus propiedades por largos períodos de tiempo sin ser deterioradas por el polvo, lluvia y medio ambiente, donde generalmente existen componentes oxidantes y corrosivos. También las demandas de los materiales utilizados en el receptor (aislante térmico, fluido de trabajo, tubos absorbedores y cubiertas) son mayores en este tipo de colectores, debido a que es ahí donde se obtienen las altas temperaturas.

En resumen podemos decir que los problemas de operación que acabamos de mencionar, junto con los costos elevados de los materiales utilizados en este tipo de colectores focales, ha hecho que su uso no sea muy generalizado. Esto ha dado cabida a que se trabaje en los colectores concentradores fijos. Estos no tienen las desventajas de los de enfoque, aunque sólo permiten incrementos moderados de la intensidad de la radiación solar.



FIGURA 1.13. Colectores Concentradores

1.2.5. TIPOS DE CONCENTRADORES

Los tipos de concentradores se pueden clasificar de acuerdo a diferentes tópicos. Una clasificación se refiere a si el concentrador es reflector o refractor. El primero

utiliza una superficie reflejante para concentrar la radiación solar, mientras que el segundo lo hace mediante superficies apropiadas que hacen la refracción de la luz solar.

También se puede obtener una clasificación respecto a donde se enfoca la luz reflejada o refractada en el concentrador solar. Los concentradores cilíndricos o lineales, afocan sobre una línea, mientras que los que son superficies de revolución o circulares, afocan sobre un punto. Finalmente, podemos hacer una clasificación respecto al tipo de sección que presente el concentrador. Los más comunes son de sección parabólica, sección esférica y de sección plana.

1.2.5.1. Concentradores de enfoque.

Existen diversos tipos de concentradores de enfoque. En esta parte haremos un análisis de los más comunes. Para poder obtener las más altas temperaturas posibles, el concentrador debe tener la capacidad de formar una imagen nítida del disco solar en el receptor y este debe ser del tamaño mínimo que pueda contener esa misma imagen del sol.



FIGURA 1.14. Concentradores de Enfoque

1.2.5.1.1. Concentradores parabólicos

Los concentradores parabólicos también pueden ser lineales o circulares. Los circulares pueden tener razones de concentración máximas muy grandes (45,000), comparada con los lineales.



FIGURA 1.15. Concentradores Parabólicos

1.2.5.2 Concentradores fijos o semifijos

Es bueno considerar este tipo de colectores concentradores debido a que requieren un mínimo de seguimiento al sol e incluso pueden permanecer definitivamente en forma estacionaria. Además, tienen la capacidad de también aprovechar la radiación difusa. Las temperaturas que podemos obtener con estos dispositivos son moderadas, pero aún así son de interés debido a que un gran porcentaje del calor requerido en los procesos industriales y comerciales, requieren de temperaturas relativamente bajas. A continuación se describe un tipo de concentrador que puede estar fijo o semifijo y que presenta aspectos muy interesantes.



FIGURA 1.16. Concentrador Fijos o Semifijo

1.2.5.2.1. Concentrador parabólico compuesto (CPC)

Este tipo de colectores concentradores también es conocido como colector de Winston. Este tipo de colectores concentradores pueden ser lineales o circulares, aunque son potencialmente más útiles los lineales.

Tenemos que cada lado del CPC es una parábola, donde en la parábola del lado derecho hay el foco y su eje. Cada parábola se extiende hasta que su superficie sea paralela con el eje del CPC. El ángulo entre el eje del CPC y la línea que conecta el foco de una de las parábolas con la orilla opuesta de la apertura es el ángulo medio de aceptación. Si el reflector es perfecto, cualquier radiación que entre en la apertura, será reflejado hacia el receptor ubicado en la base del concentrador por reflexiones entre las dos secciones parabólicas.

En este tipo de colectores concentradores, la razón de concentración queda en función del ángulo de aceptación.



FIGURA 1.17. Concentrador Parabólico Compuesto

1.2.6. RECEPTORES

“El receptor es la parte donde la energía solar se convierte en calor”⁷. Este incluye el absorbedor y en ocasiones cubiertas y aislante. Los tipos de receptores pueden ser cóncavos, convexos, planos, hemisféricos, cilíndricos, elípticos y concavidades. Cada uno de estos puede ser lineal o puntual.



FIGURA 1.18. Receptores

1.2.7. MATERIALES REFLECTIVOS PARA CONCENTRADORES SOLARES

La siguiente tabla nos aporta información sobre la reflectancia de distintos materiales. El estudio de la reflectancia espectral de los materiales nos permite aplicar una mayor precisión al balance térmico, seleccionando adecuadamente los materiales

TABLA I.1. Materiales reflectivos para concentrados solares

PVC blanco	0,871	fibra de vidrio pintada de blanco	0,709
aluminio de alta reflectividad (verde)	0,839	espejo de vidrio de 2 mm	0,795
aluminio de alta reflectividad (rosado)	0,853	espejo de vidrio de 3 mm	0,754
aluminio de alta reflectividad (celeste)	0,820	espejo de vidrio de 4 mm	0,712
chapadur prepintado blanco	0,741	acero inoxidable	0,572
chapa galvanizada	0,588	mylar	0,833
chapa pintada de blanco nueva	0,582	papel de aluminio	0,799
chapa pintada de blanco envejecida	0,656		

⁷ MILLS, A, Transferencia de Calor, Editorial Irwin, 1^{ra} Edición, España, 1995.

1.3. BENEFICIOS AMBIENTALES DE LOS MOTORES STIRLING VS. LOS MOTORES OTTO

En un motor de ciclo Otto que realiza combustión tenemos tres elementos que se encuentran presentes, un combustible, aire y una chispa. Toda combustión da como resultado agua, CO monóxido de carbono y CO₂ dióxido de carbono.

Estos dos últimos son los gases contaminantes generadores del efecto invernadero que al planeta tierra lo están desestabilizando. La humanidad entera a buscado alternativas para reducir estas emisiones y lo ha encontrado con los biocombustibles que reducen al máximo estos gases. Pero que al igual siguen generando emisiones de gases pero en menor proporción y otra restricción que limita la utilización de estos biocombustibles es el costo y la introducción al mercado que en nuestro país es nula.

El motor Stirling utiliza una fuente de calor externa, como la energía solar por lo que no genera ninguna emisión de gases combustionados y peor aun gases contaminantes, siendo un motor solidario a nuestro planeta en la difícil situación que se encuentra.

CAPÍTULO II

2. DISEÑO TERMICO

INTRODUCCIÓN

La radiación solar es tomada como energía calorífica, ésta energía la transformaremos en trabajo a través del motor Stirling. La eficiencia del motor Stirling se encuentra en la mayor diferencia de temperaturas que se pueda alcanzar entre la zona de calor y la zona de enfriamiento. Para ello se diseñara un concentrador que enfoque todos los rayos solares en un punto para calentarlo, y a las vez una zona de refrigeración por aletas que permita el paso de aire y mantenga la diferencia de temperaturas.

2.1.PARÁMETROS PRELIMINARES.

Ubicación geográfica de la ciudad de Latacunga.

Tabla II.1. Ubicación geográfica de la ciudad de Latacunga

Latitud	0° 56' 07,26" Sur
Longitud	78° 36' 33,59 " Oeste
Altitud	2772 m. s. n. m.

Tabla II.2. Radiación solar por el INAMHI, software Isol y medición de campo en la ciudad de Latacunga

	tabla global	W/m2
INAMHI	Imax	300
	Imax Global	600
Isol	Imax	733
	Ipro	469
	Amgstrong page	847
I medido	I Promedio	688

Tabla II.3. Humedad por el INAMHI y medición de campo en la ciudad de Latacunga.

H promedio medido	31,2142857%
H INAMHI	37%

Tabla II.4. Temperatura por el INAMHI y medición de campo en la ciudad de Latacunga

T promedio medido	24,2809524 °C
T INAMHI	12 °C

Tabla II.5. Velocidad del viento por el INAMHI en la ciudad de Latacunga.

V INAMHI	21,23 km / h
----------	--------------

2.2.DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES INICIALES Y DE FRONTERA

Para que el motor Stirling funcione debe tener una temperatura en la zona de calentamiento superior a los 300 °C y una diferencia de temperaturas entre la zona de calentamiento y la zona de enfriamiento mayor a los 250 °C.

Mientras mayor sea la diferencia de temperaturas entre la zona de calentamiento y la zona de enfriamiento mayor va a ser la eficiencia del motor, por lo que obtendremos revoluciones mayores de 1000 RPM.

El movimiento de los pistones debe ser sincronizado en el cigüeñal con un desfase a 90° de tal manera que los volúmenes no se vean afectados por dicho desfase.

2.3.MODELADO PREVIO EN SOLIDWORKS DEL SISTEMA TÉRMICO DEL MOTOR

Solidworks, es un paquete computacional de diseño asistido, el cual permite crear diseños a partir de planos.

Usando este programa vamos a modelar el motor Stirling para posteriormente realizar los diversos análisis como: térmico, dinámico, estático, etc.

A partir de estos análisis obtendremos resultados que nos permitirán orientar a un óptimo diseño y finalmente un motor Stirling solar eficiente.

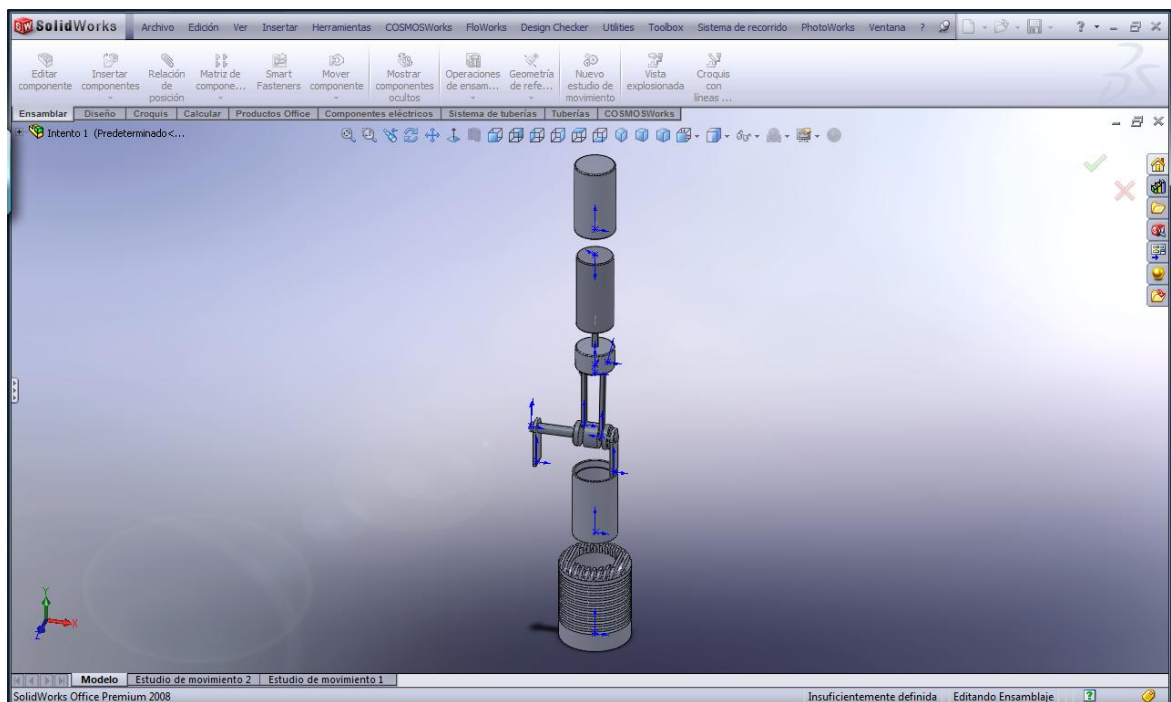


Figura 2.1. Motor Stirling perspectiva estallada

La figura muestra al motor stirling en perspectiva estallada, en la cual se puede apreciar las bielas, pistones y cigüeñal.

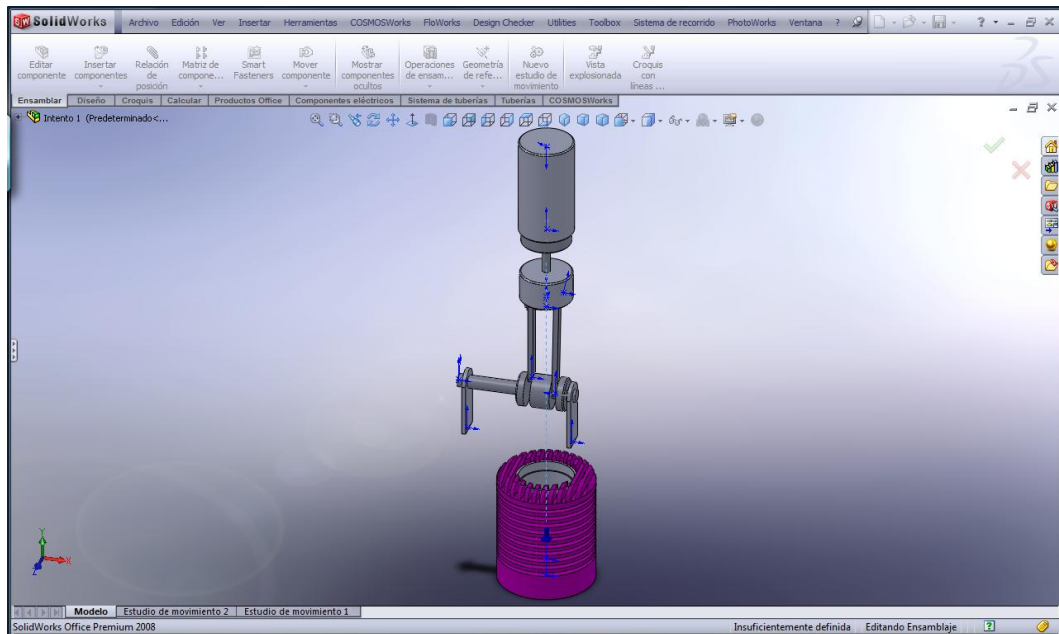


Figura 2.2. Cilindro de calor

En la parte superior se puede observar el cilindro de trabajo que soportará la radiación solar que reflejará el concentrador. En la parte inferior se muestra el cilindro de enfriamiento con sus aletas para conseguir una mayor diferencia de temperaturas entre la zona de calentamiento y la de enfriamiento.

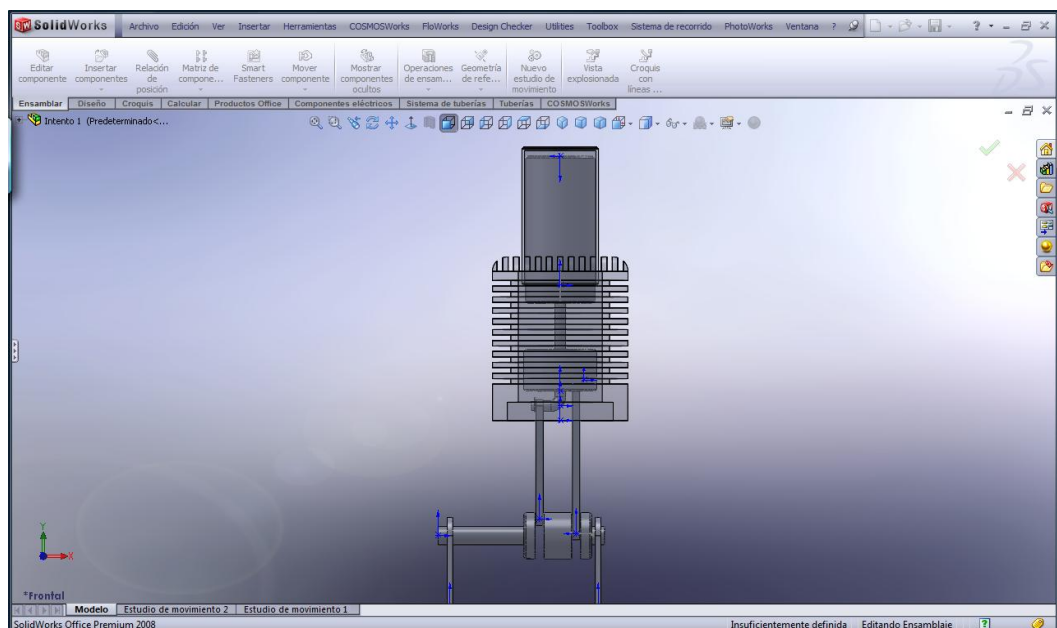


Figura 2.3. Modelo de motor Stirling Transparencia

La figura 2.3 muestra el ensamblaje del motor con los cilindros en transparencia para identificar a los componentes internos del motor.

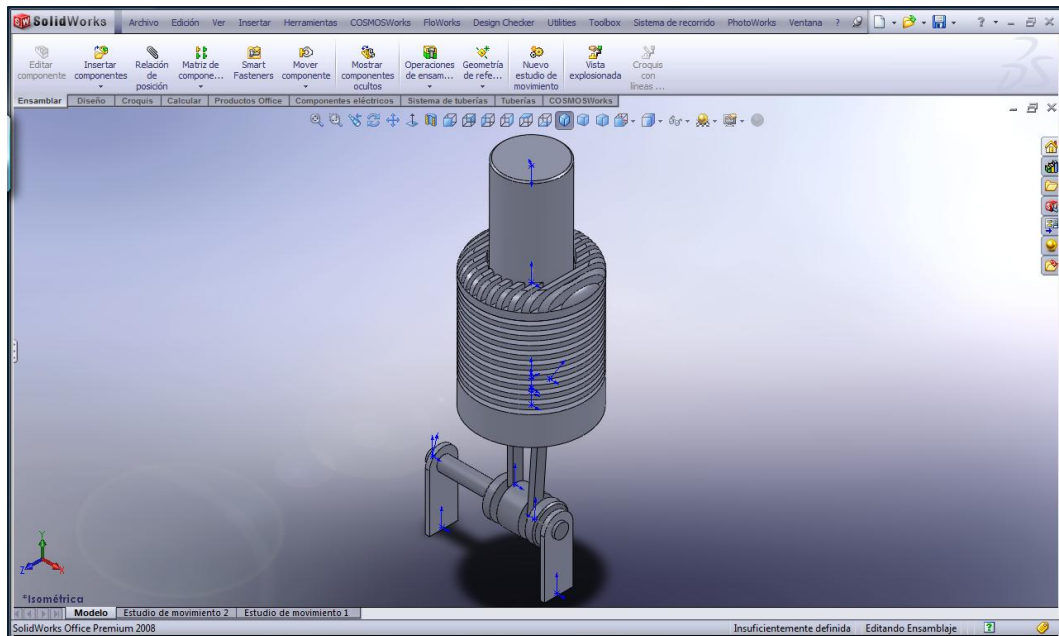


Figura 2.4. Modelo de motor Stirling

La figura 2.4 muestra el modelo de motor stirling ensamblado y en perspectiva.

2.4.DISEÑO Y ANÁLISIS TÉRMICO DEL MOTOR.

Para los diversos análisis que posteriormente se van a realizar vamos a calcular ciertos parámetros que son necesarios.

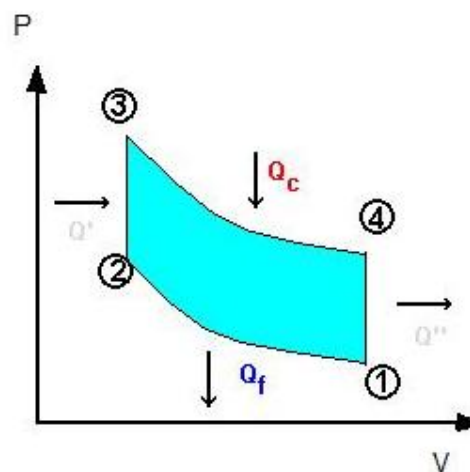


Figura 2.5. Ciclo Stirling

- ✚ 1-2. Compresión Isotérmica.
- ✚ 2-3. Adición de calor a volumen constante (isocórico o isócoro).
- ✚ 3-4. Expansión Isotérmica.
- ✚ 4-1. Extracción de calor a volumen constante.

A partir de la ecuación de gas ideal y de procesos a volumen constante y a temperatura constante calcularemos presión, temperatura y volumen en los cuatro puntos del ciclo Stirling.

- Para 1 – 2 Isotérmico $T = \text{cte}$

$$P_1 = 101325 \text{ N/m}^2$$

$$V_1 = 21,38 \text{ cm}^3 = 2,138 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$T_1 = 80 \text{ }^\circ\text{C} = 353 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$P_2 = ?$$

$$V_2 = 5,2 \text{ cm}^3 = 5,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$T_2 = 80 \text{ }^\circ\text{C} = 353 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$P_1 * V_1 = P_2 * V_2$$

$$P_2 = \frac{P_1 * V_1}{V_2}$$

$$P_2 = \frac{101325 \text{ N/m}^2 * 2,138 \times 10^{-5} \text{ m}^3}{5,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3}$$

$$P_2 = 416601,63 \text{ N/ m}^2$$

$$Q_{\text{ced}} = P_1 * V_1 \ln V_2 / V_1$$

$$Q_{\text{ced}} = 101325 \text{ N/m}^2 * 2,138 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \ln 5,2 \times 10^{-6} / 2,138 \times 10^{-5}$$

$$Q_{\text{ced}} = -3,06 \text{ N*m}$$

$$\Delta S = Q / T = -3,06 \text{ N*m} / 353 \text{ }^\circ\text{K} = -8,668 \times 10^{-3} \text{ N*m/}^\circ\text{K}$$

- Para 2 – 3 $V = \text{cte}$

$$P_2 = 416601,63 \text{ N/ m}^2$$

$$V_2 = 5,2 \text{ cm}^3 = 5,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$T_2 = 80 \text{ }^\circ\text{C} = 353 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$P_3 = ?$$

$$V_3 = 5,2 \text{ cm}^3 = 5,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$T_3 = 550 \text{ }^\circ\text{C} = 823 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{P_3}{P_2}$$

$$P_3 = \frac{P_2 * T_3}{T_2}$$

$$P_3 = \frac{416601,63 \text{ N/m}^2 * 823 \text{ }^\circ\text{K}}{353 \text{ }^\circ\text{K}}$$

$$P_3 = 971283,687 \text{ N/m}^2$$

- Para 3 – 4 $T = \text{cte}$

$$P_3 = 971283,687 \text{ N/m}^2$$

$$V_3 = 5,2 \text{ cm}^3 = 5,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$T_3 = 550 \text{ }^\circ\text{C} = 823 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$P_4 = ?$$

$$V_4 = 21,38 \text{ cm}^3 = 2,138 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$T_4 = 550 \text{ }^\circ\text{C} = 823 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$P_4 = \frac{P_3 * V_3}{V_4}$$

$$P_4 = \frac{971283,687 \text{ N/m}^2 * 5,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3}{2,138 \times 10^{-5} \text{ m}^3}$$

$$P_4 = 236233,63 \text{ N/m}^2$$

$$Q_{\text{ced}} = P_3 * V_3 \text{ Ln } V_4 / V_3$$

$$Q_{\text{ced}} = 971283,687 \text{ N/m}^2 * 5,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ Ln } 2,138 \times 10^{-5} / 5,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$Q_{\text{ced}} = 7,1406 \text{ N*m}$$

$$\Delta S = Q / T = 7,1406 \text{ N*m} / 823 \text{ }^\circ\text{K} = 8,668 \times 10^{-3} \text{ N*m/}^\circ\text{K}$$

- Para 4 – 1 $V = \text{cte}$

$$P_4 = 236233,63 \text{ N/m}^2$$

$$V_4 = 21,38 \text{ cm}^3 = 2,138 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$T_4 = 550 \text{ }^\circ\text{C} = 823 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$P_1 = 101325 \text{ N/m}^2$$

$$V_1 = 21,38 \text{ cm}^3 = 2,138 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$T_1 = 80 \text{ }^\circ\text{C} = 353 \text{ }^\circ\text{K}$$

Finalmente el ciclo se completa del punto 4 al punto 1 para luego empezar de nuevo, esto se va a repetir cada revolución.

2.5.DISEÑO DE TRANSFERENCIA DE CALOR DEL MOTOR MEDIANTE COSMOS FLOWORKS.

Para el análisis térmico mediante el software FLOWORKS del programa SOLIDWORKS utilizamos como parámetros la temperatura de 550 °C que se encontrar en la zona de calentamiento y una transferencia de calor por convección en la zona de enfriamiento con una temperatura de 18°C y un $K=202 \text{ w}/(\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{K})$ para aletas de aluminio.

- **ANÁLISIS TÉRMICO**
 - **Propiedades del material**

Se en listan a continuación las propiedades de los materiales de cada elemento del motor de acuerdo con la biblioteca de materiales del FLOWORKS.

Tabla II.6. Materiales de los elementos del motor

Nº	Nombre de sólido	Material	Masa	Volumen
1	Biela Piston 1-1	7075-T6, Plate (SS)	0.00207686 kg	7.39095e-007 m ³
2	Biela Piston 2-1	7075-T6, Plate (SS)	0.00259375 kg	9.23042e-007 m ³
3	Block-2	7075-T6, Plate (SS)	0.543041 kg	0.000193253 m ³
4	Brazo de biela-1	Malleable Cast Iron	0.00345308 kg	4.73025e-007 m ³
5	Carter carc.-1	AISI 1010 Steel, hot rolled bar	1.08665 kg	0.000138074 m ³
6	Cigüeñal-1	7075-T6, Plate (SS)	0.0481861 kg	1.71481e-005 m ³

7	Cilindro de Calor-1	Gray Cast Iron (SN)	0.0418098 kg	5.80692e-006 m ³
8	Pasador Cigüeñal-1	7075-T6, Plate (SS)	0.000255585 kg	9.09556e-008 m ³
9	Pasador Piston-1	7075-T6, Plate (SS)	0.000265517 kg	9.44899e-008 m ³
10	Piston Inf.-1	Phosphor bronze 10% D, UNS C52400	0.113968 kg	1.29804e-005 m ³
11	Piston sup.-1	Malleable Cast Iron	0.284738 kg	3.90052e-005 m ³
12	Rodamiento-1	AISI 1010 Steel, hot rolled bar	0.0869431 kg	1.10474e-005 m ³
13	Rodamiento-2	AISI 1010 Steel, hot rolled bar	0.0869431 kg	1.10474e-005 m ³
14	Socket Head Cap Screw_DIN-10	AISI 1010 Steel, hot rolled bar	0.00204781 kg	2.60204e-007 m ³
15	Socket Head Cap Screw_DIN-11	AISI 1010 Steel, hot rolled bar	0.00204781 kg	2.60204e-007 m ³
16	Socket Head Cap Screw_DIN-15	AISI 1010 Steel, hot rolled bar	0.00204781 kg	2.60204e-007 m ³
17	Socket Head Cap Screw_DIN-17	AISI 1010 Steel, hot rolled bar	0.00204781 kg	2.60204e-007 m ³
18	Socket Head Cap Screw_DIN-18	AISI 1010 Steel, hot rolled bar	0.00204781 kg	2.60204e-007 m ³
19	Socket Head Cap Screw_DIN-2	AISI 1010 Steel, hot rolled bar	0.00204781 kg	2.60204e-007 m ³
20	Socket Head Cap Screw_DIN-4	AISI 1010 Steel, hot rolled bar	0.00204781 kg	2.60204e-007 m ³
21	Socket Head Cap Screw_DIN-5	AISI 1010 Steel, hot rolled bar	0.00204781 kg	2.60204e-007 m ³
22	Volante-1	7075-T6, Plate (SS)	0.246758 kg	8.78143e-005 m ³

Tabla II.7. Propiedades del aluminio

Nombre de material:	7075-T6, Plate (SS)		
Descripción:			
Origen del material:	Archivos de biblioteca		
Nombre de biblioteca de materiales:	cosmos materials		
Tipo de modelo del material:	Isotrópico elástico lineal		
Nombre de propiedad	Valor	Unidades	Tipo de valor
Módulo elástico	7.2e+010	N/m ²	Constante
Coefficiente de Poisson	0.33	NA	Constante
Módulo cortante	2.69e+010	N/m ²	Constante
Densidad	2810	kg/m ³	Constante
Límite de tracción	5.7e+008	N/m ²	Constante
Límite elástico	5.05e+008	N/m ²	Constante
Coefficiente de dilatación térmica	2.4e-005	/Kelvin	Constante
Conductividad térmica	130	W/(m.K)	Constante
Calor específico	960	J/(kg.K)	Constante
Factor de endurecimiento (0.0-1.0; 0.0=isotrópico; 1.0=cinemático)	0.85	NA	Constante

Tabla II.8. Propiedades del acero de plata

Nombre de material:	Malleable Cast Iron		
Descripción:			
Origen del material:	Archivos de biblioteca		
Nombre de biblioteca de materiales:	cosmos materials		
Tipo de modelo del material:	Isotrópico elástico lineal		
Nombre de propiedad	Valor	Unidades	Tipo de valor
Módulo elástico	1.9e+011	N/m ²	Constante
Coefficiente de Poisson	0.27	NA	Constante
Módulo cortante	8.6e+010	N/m ²	Constante
Densidad	7300	kg/m ³	Constante
Límite de tracción	4.1361e+008	N/m ²	Constante
Límite elástico	2.7574e+008	N/m ²	Constante
Coefficiente de dilatación térmica	1.2e-005	/Kelvin	Constante
Conductividad térmica	47	W/(m.K)	Constante
Calor específico	510	J/(kg.K)	Constante

Tabla II.9. Propiedades del acero de transmisión

Nombre de material:	AISI 1010 Steel, hot rolled bar		
Descripción:			
Origen del material:	Archivos de biblioteca		
Nombre de biblioteca de materiales:	cosmos materials		
Tipo de modelo del material:	Isotrópico elástico lineal		
Nombre de propiedad	Valor	Unidades	Tipo de valor
Módulo elástico	2e+011	N/m ²	Constante
Coefficiente de Poisson	0.29	NA	Constante
Módulo cortante	8e+010	N/m ²	Constante
Densidad	7870	kg/m ³	Constante
Límite de tracción	3.25e+008	N/m ²	Constante
Límite elástico	1.8e+008	N/m ²	Constante
Coefficiente de dilatación térmica	1.22e-005	/Kelvin	Constante
Conductividad térmica	51.9	W/(m.K)	Constante
Calor específico	448	J/(kg.K)	Constante

Tabla II.10. Propiedades del acero

Nombre de material:	Gray Cast Iron (SN)		
Descripción:			
Origen del material:	Archivos de biblioteca		
Nombre de biblioteca de materiales:	cosmos materials		
Tipo de modelo del material:	Isotrópico elástico lineal		
Nombre de propiedad	Valor	Unidades	Tipo de valor
Módulo elástico	6.6178e+010	N/m ²	Constante
Coefficiente de Poisson	0.27	NA	Constante
Módulo cortante	5e+010	N/m ²	Constante
Densidad	7200	kg/m ³	Constante
Límite de tracción	1.5166e+008	N/m ²	Constante
Límite de compresión	5.7217e+008	N/m ²	Constante
Coefficiente de dilatación térmica	1.2e-005	/Kelvin	Constante
Conductividad térmica	45	W/(m.K)	Constante
Calor específico	510	J/(kg.K)	Constante

Tabla II.11. Propiedades del Bronce Fosfórico

Nombre de material:	Phosphor bronze 10% D, UNS C52400		
Descripción:			
Origen del material:	Archivos de biblioteca		
Nombre de biblioteca de materiales:	cosmos materials		
Tipo de modelo del material:	Isotrópico elástico lineal		
Nombre de propiedad	Valor	Unidades	Tipo de valor
Módulo elástico	1.1e+011	N/m ²	Constante
Módulo cortante	4.1e+010	N/m ²	Constante
Densidad	8780	kg/m ³	Constante
Límite de tracción	4.55e+008	N/m ²	Constante
Límite elástico	1.93e+008	N/m ²	Constante
Coefficiente de dilatación térmica	1.84e-005	/Kelvin	Constante
Conductividad térmica	50	W/(m.K)	Constante

○ **Análisis**

Con los datos de materiales y los parametros realizamos el analisis.

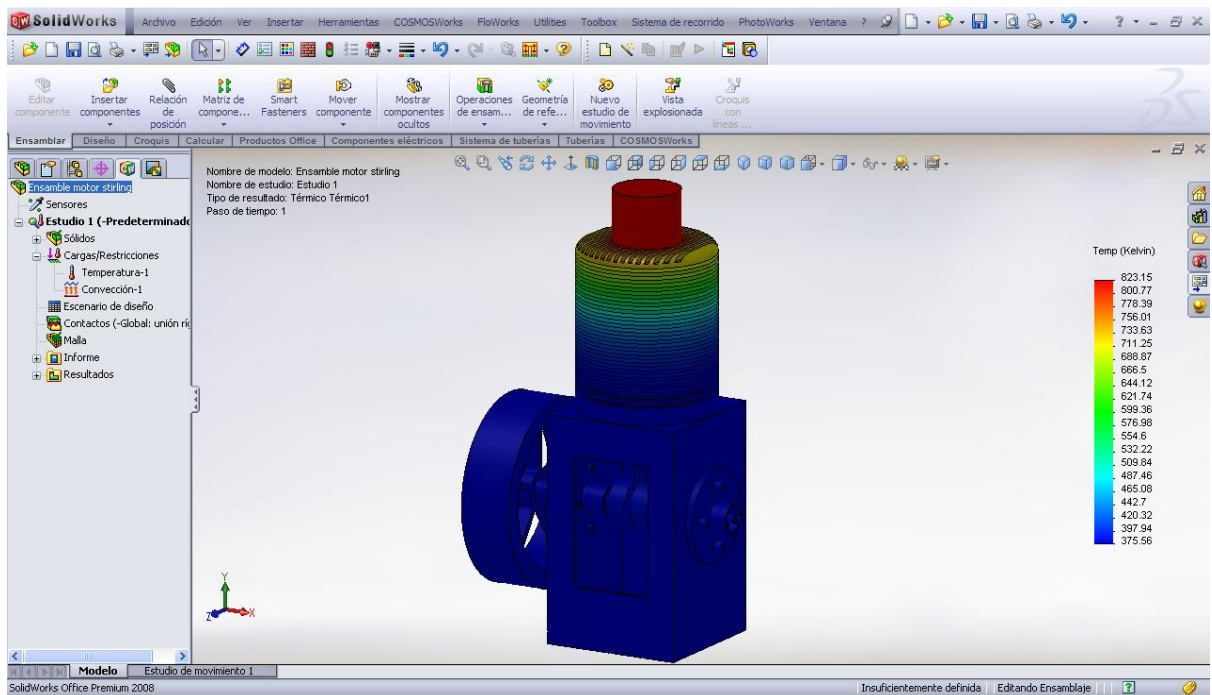


Figura 2.6. Análisis térmico

A través de de la figura podemos apreciar como la zona de calentamiento se encuentra a 823 °K por el color rojo, en la zona de enfriamiento va disminuyendo la temperatura se aprecia por la atenuación del color rojo hasta llegar al azul que se encuentra en 323 °K (50°C).

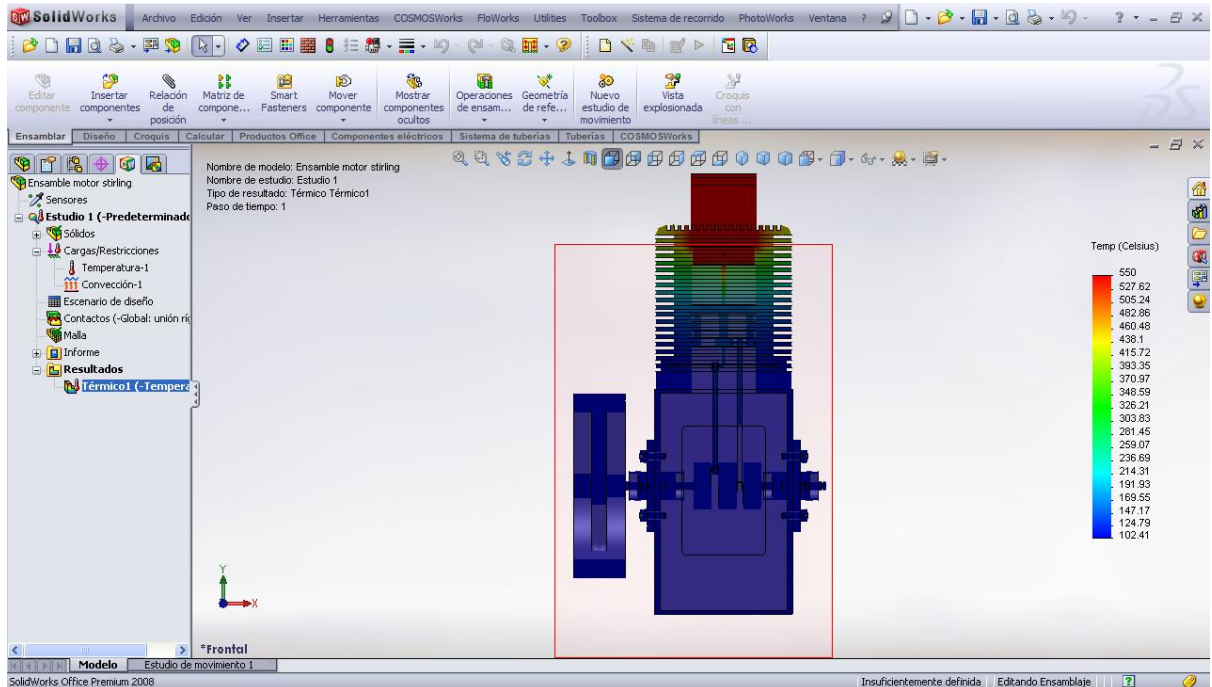


Figura 2.7. Análisis térmico en corte

Con la vista en corte se puede observar que el pistón de la zona de calentamiento alcanza la misma temperatura que su cilindro, como va avanzando en a la zona de enfriamiento esta disminuye.

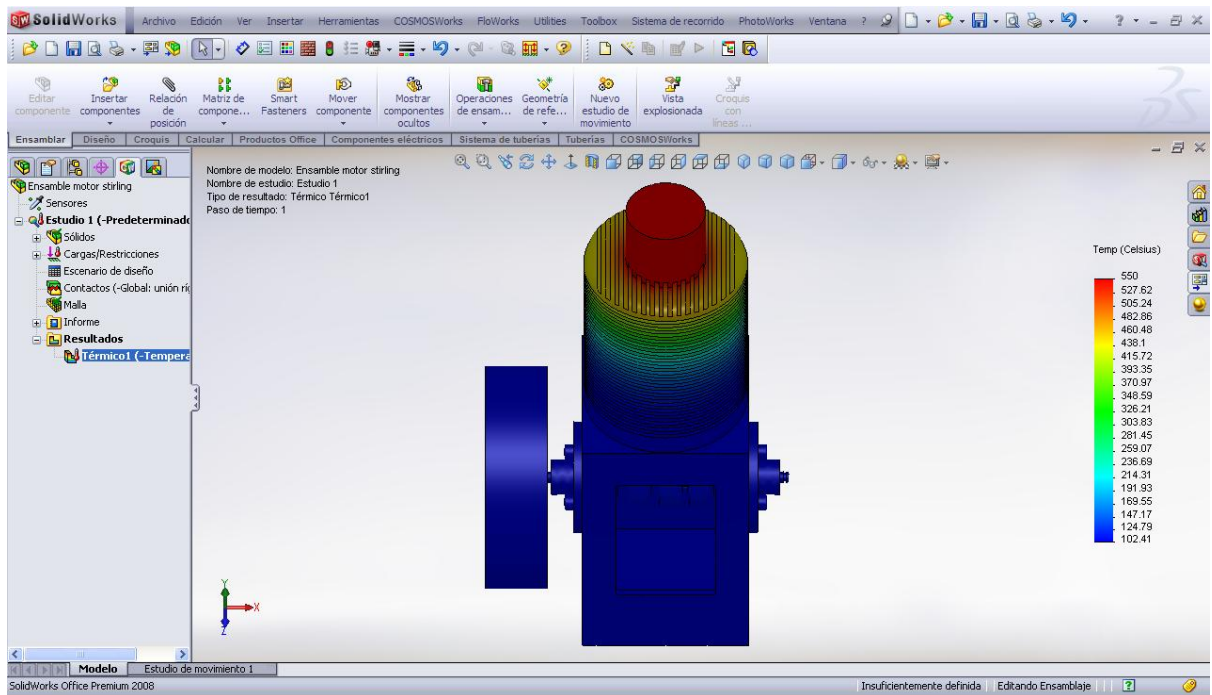


Figura 2.8. Análisis térmico panorama de arriba

En la parte superior de la zona de enfriamiento se calienta a unos 400 °C.

2.6.DISEÑO DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN SOLAR.

2.6.1. DETERMINACIÓN DEL RECURSO

Antes de proceder a diseñar el sistema térmico compuesto por un concentrador y regenerador se requiere determinar con la mayor aproximación posible el valor de Irradiación Solar local debido a que el accionamiento mediante energía térmica del motor Stirling es complejo por las perturbaciones en las ondas electromagnéticas que provienen del sol. Las anomalías que se procesan en el paso de irradiación, reduciendo su incidencia son:

- Índice de claridad
- Nubosidad
- Contaminación Ambiental
- Vapor de agua
- Sombras y suciedad

Otros factores que son necesarios a tomar en cuenta y que repercuten en la eficiencia de captación y absorción de la radiación solar térmica, están relacionados con los siguientes aspectos:

- Ángulo de incidencia
- Ángulo de reflexión
- Concentricidad entre la boca del paraboloide y el observador
- Imperfecciones superficiales del concentrador
- Material reflectante utilizado
- Desborde

Con las consideraciones indicadas anteriormente y con el propósito de evitar pérdidas que pueden ser corregidas tanto en el estudio de campo como el sistema de diseño y construcción se procede a determinar y analizar con aceptable aproximación el recurso solar en la ESPEL.

Datos Ubicación ESPE - L

Tabla II.12. Datos Ubicación ESPE - L

Latitud=	0°56'7,26" Sur
Longitud=	78°36'33,59" Oeste
Altitud=	2772 msnm
Temp. Prom.=	12 °C
Vel. Viento=	21,23 Km/h

2.6.2. ANÁLISIS DEL RECURSO SOLAR

Varias son las alternativas para estimar la irradiancia solar entre los más importantes se utiliza los siguientes:

- Cálculos de irradiación mediante métodos matemáticos por LAN gley
- Utilización de datos del INAMHI
- Uso del programa CENSOLAR
- Uso del programa ISOL
- Cálculos de irradiación medido

- Cálculos de irradiación mediante métodos matemáticos por LAN gley

Tabla II.13. Cálculos de irradiación mediante métodos matemáticos por LAN gley

Mes	Promedios
Enero	364,41
Febrero	375,67
Marzo	378,78
Abril	366,76
Mayo	346,23
Junio	333,30
Julio	338,01
Agosto	356,08
Septiembre	371,98
Octubre	374,11
Noviembre	365,36
Diciembre	359,09

- Utilización de datos del INAMHI

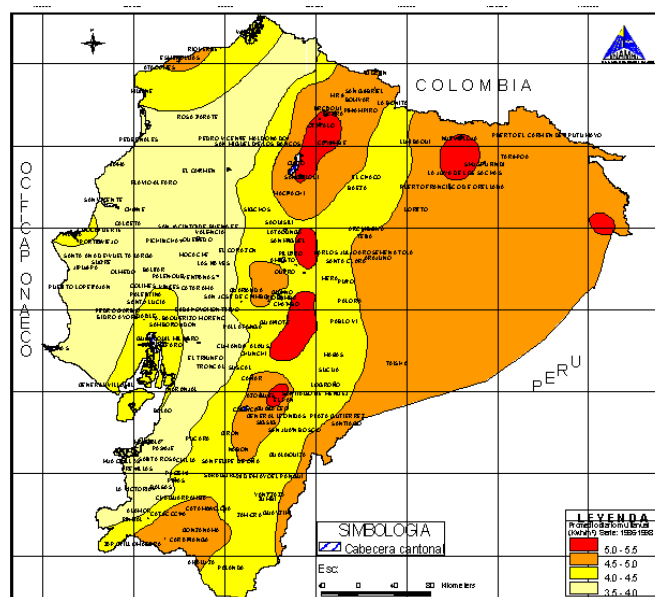


Figura 2.9. Mapa de irradiación solar del Ecuador

Latacunga= 4000 – 4500 (w. h. / m² día)

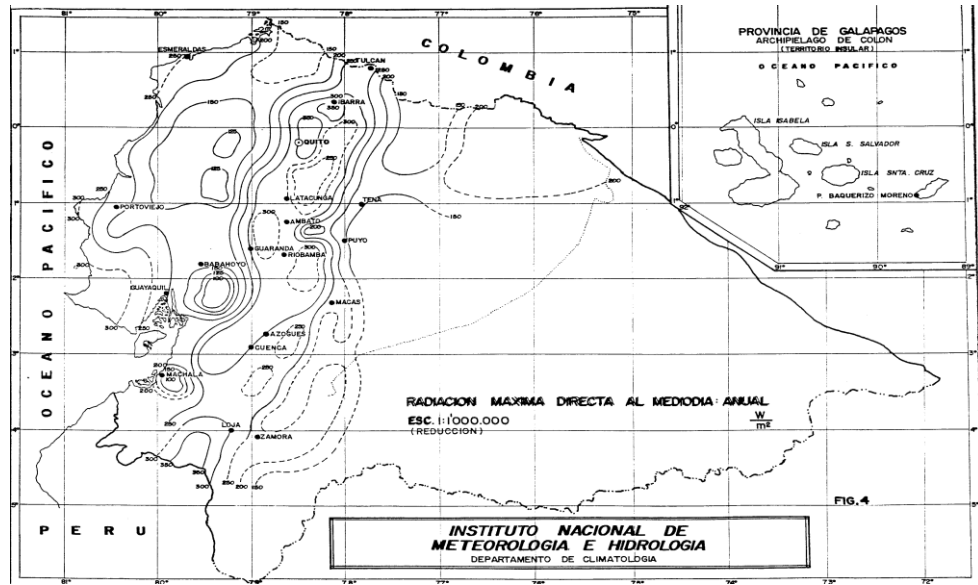


Figura 2.10. Mapa de irradiancia máxima directa al medio día anual

Latacunga= 300 (w. / m²)

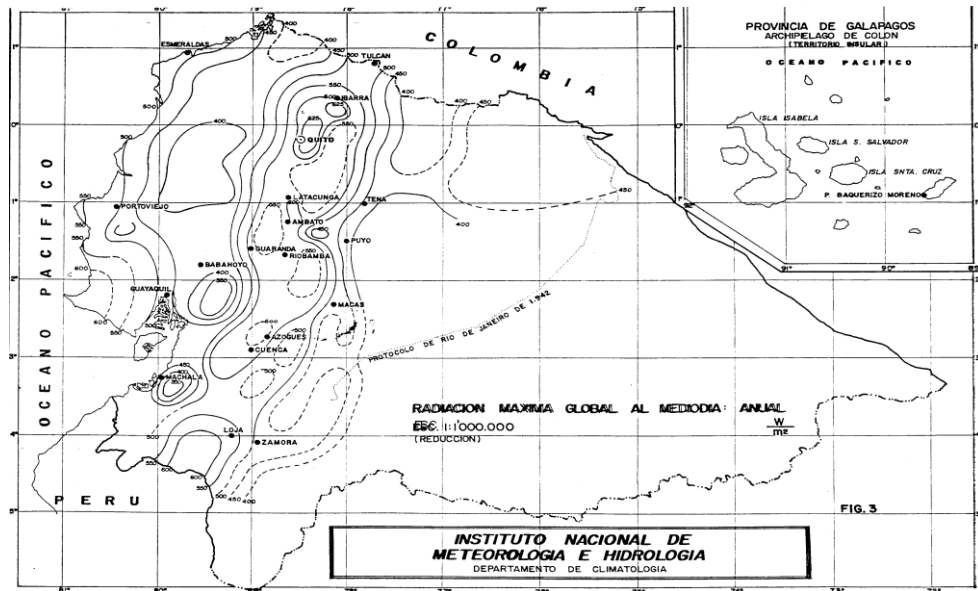


Figura 2.11. Mapa de irradiancia máxima global al medio día anual

Latacunga= 600 (w. / m²)

- Uso del programa CENSOLAR

Tabla II.14. Irradiancia y Temperatura promedio año 2008 CENSOLAR

Mes	Imax (MJ / m2)	Temp. °C
Enero	4,6	7
Febrero	6,9	7
Marzo	11,2	11
Abril	13	12
Mayo	14,8	15
Junio	16,6	19
Julio	18,1	21
Agosto	17,3	21
Septiembre	14,3	19
Octubre	9,5	15
Noviembre	5,5	10
Diciembre	4,1	7

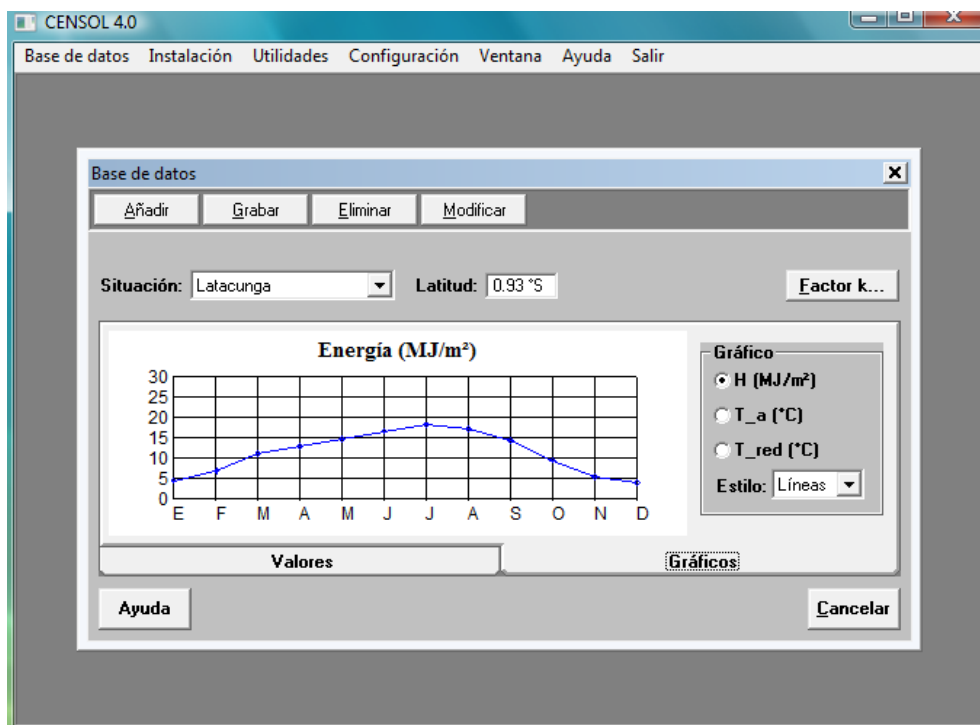


Figura 2.12. Irradiación Programa Censol 4.0.

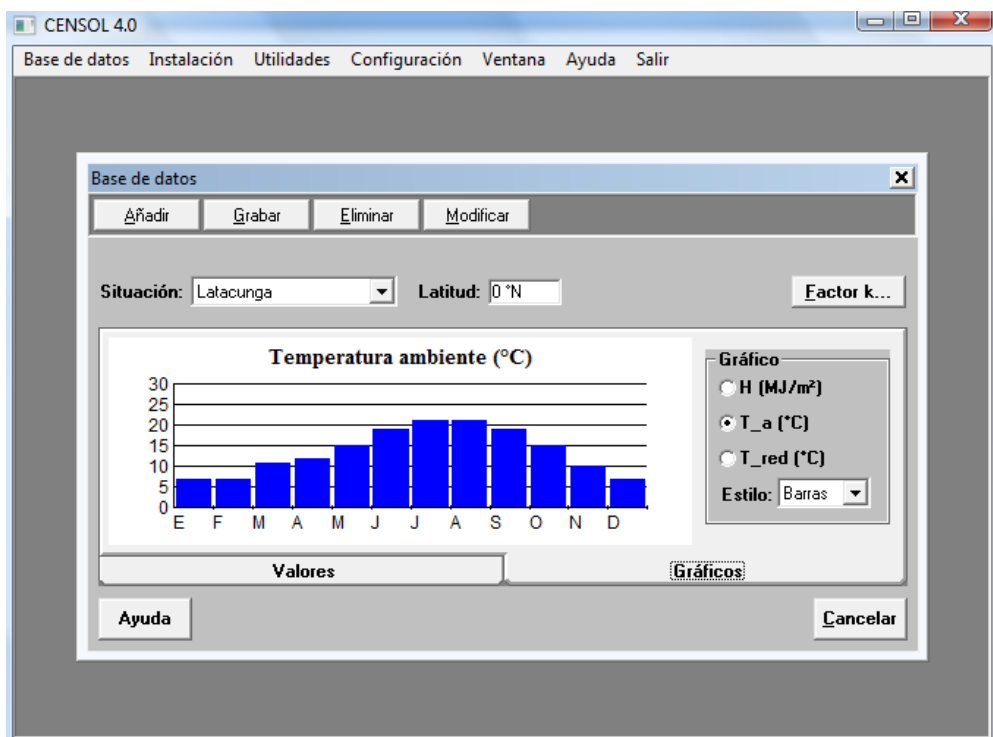


Figura 2.13. Temperatura Programa Censol 4.0.

- Uso del programa ISOL

Tabla II.15. Irradiación máxima, mínima y promedio ISOL

Mes	I _{max} (W/m ²)	I _{min} (W/m ²)	I _{prom} (W/m ²)
Enero	717	201	459
Febrero	752	210	481
Marzo	766	214	490
Abril	749	209	479
Mayo	717	200	458,5
Junio	699	195	447
Julio	714	199	456,5
Agosto	747	208	477,5
Septiembre	766	214	490
Octubre	752	210	481
Noviembre	721	202	461,5
Diciembre	706	197	451,5

- Cálculos de irradiación medido en Latacunga

Tabla II.16. Irradiación medida en la ESPE-L de 9 am – 3 pm. (Promedio día)

Fecha	Rad. W/m ²
Lunes 15/09	Lluvia
Martes 16/09	619,868336
Miércoles 17/09	693,005028
Jueves 18/09	572,538733
Viernes 19/09	654,663067
Lunes 22/09	Lluvia
Martes 23/09	Lluvia
Miércoles 24/09	667,197939
Jueves 25/09	813,471322
Viernes 26/09	643,725922
Lunes 29/09	642,055125
Martes 30/09	657,4
Miércoles 01/10	564,8756
Jueves 02/10	611,1378
Viernes 03/10	689,173461

Tabla II.17. Heliofanía en la ciudad de Latacunga

MES	1996	1997	1998	1999	2000	Suma	Promedio Anual	Promedio Diario (nr)
ENERO	119,70	165,10	159,20	128,10	151,20	723,30	144,66	4,67
FEBRERO	104,40	149,90	124,30	87,90	127,10	593,60	118,72	4,24
MARZO	120,50	111,00	132,30	37,00	119,30	520,10	104,02	3,36
ABRIL	131,70	147,70	126,60	141,00	111,20	658,20	131,64	4,39
MAYO	168,40	157,10	133,30	134,50	89,70	683,00	136,60	4,41
JUNIO	139,70	148,20	182,20	124,90	162,60	757,60	151,52	5,05
JULIO	220,50	246,10	179,50	198,10	183,40	1027,60	205,52	6,63
AGOSTO	223,30	231,30	190,70	198,20	160,70	1004,20	200,84	6,48
SEPTIEMBRE	199,40	161,70	184,60	130,30	137,00	813,00	162,60	5,42
OCTUBRE	168,80	170,80	170,00	156,00	201,50	867,10	173,42	5,59
NOVIEMBRE	240,00	105,90	175,50	169,20	178,10	868,70	173,74	5,79
DICIEMBRE	191,50	179,70	216,80	128,80	166,00	882,80	176,56	5,70
							Suma	61,72
							Promedio	5,14

 **Heliofanía:** número de horas sol.

- **Tabla general del análisis del recurso solar en la Latacunga**

Tabla II.18. Radiación solar en la ciudad de Latacunga por el INAMHI, software Isol y medición de campo

Fuentes	tabla global	W/m2
INAMHI	Imax	300
	Imax Global	600
Isol	Imax	733
	Ipro	469
Calculados	Langley	847
I medido	I Promedio	688
Promedio		767

2.7.DISEÑO DEL CONCENTRADOR SOLAR.

2.7.1. ECUACIONES PARA EL CONCENTRADOR SOLAR

$$R_c = (D/d)^2$$

F/D = relación foco diámetro

R_c = relación de concentración
 F = Foco
 D = Diámetro

Los reflectores con muy baja relación foco diámetro exigen mayor precisión en la concentración que aquellos con mayor concentración relación foco diámetro.

Una buena alternativa para el diseño es determinar la relación foco diámetro dentro del siguiente rango.

$$0,25 < f/D < 0,6$$

$$Y^2 = 4fX \quad \text{ecuación de la parábola}$$

$$(D/2)^2 = 4fc$$

$$C = D/ (16(F/D))$$

$$T = \frac{\sqrt[4]{Rc * Tc * \alpha a * E * Fg * n}}{Ea * G}$$

$$T = \frac{\sqrt[4]{(0,2)(8,57 \times 10^{-6})(0,95)(0,8)(767)(0,8)(0,7)(0,80)}}{(0,2)(8,57 \times 10^{-6})}$$

Tc = Transmitancia del concentrador

αa = absorptancia del absorbedor

E = Irradiancia

Fg = Factor de ganancia

n = eficiencia óptica

Ea = emisividad del absorbedor

G = constate de Esteban Boltzman

Para un D = 1500 mm.

Tabla II.19. Temperatura por relación de concentración

D mm.	r _c	T (°C)
20	5625	676,78
30	2500	502,49
36	1736	444.16
40	1406	398,57
45	1111	360,1
50	900	327,7
60	625	275,3

2.7.2. ANÁLISIS GEOMÉTRICO

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

Relación foco diámetro

$$Rc = \left(\frac{D}{d}\right)^2 \left(\frac{1500}{36}\right)^2 \rightarrow \text{Relación concentración}$$

Tabla II. 20. Relación foco diámetro

$\frac{f}{D}$	C mm.	f mm.
0,25	0,375	0,375
* 0,30	0,3125	0,45
0,35	0,267	0,525
0,40	0,234	0,6
0,45	0,208	0,675
0,50	0,1877	0,75
0,60	0,156	0,9

$$Rc = 1736$$

$$\frac{f}{D} = 0,3$$

$$D = 1500 \text{ mm}$$

$$f = 450 \text{ mm}$$

$$C = 312 \text{ mm}$$

$$y^2 = 4fx \Rightarrow \text{ecuación de la parábola}$$

$$y^2 = 4(450)x$$

$$y^2 = 1800x$$

$$y = \pm\sqrt{1800x}$$

Tabla II.21. Datos de la parábola del concentrador

X	Y
0	0
20	189,73666
40	268,328157
60	328,633535
80	379,473319
100	424,264069
120	464,758002
140	501,996016
160	536,656315
180	569,209979
200	600
220	629,285309
240	657,267069
260	684,105255
280	709,929574
300	734,846923
312	749,39976
312,5	750

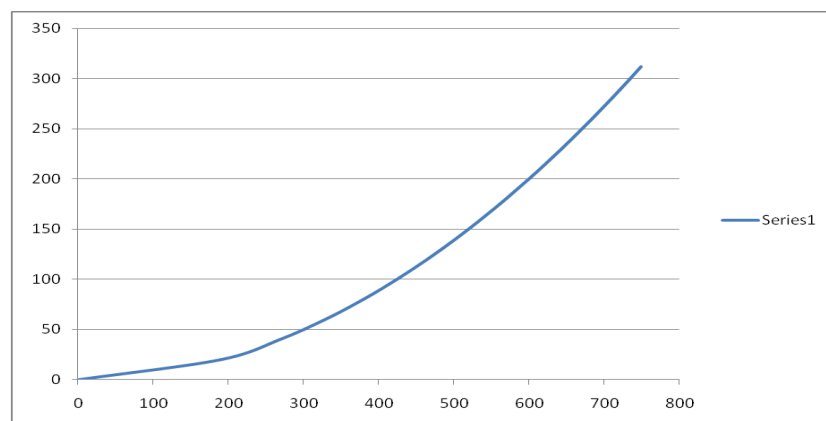


Figura 2.14. Perfil de la parábola

En el eje X se muestra el diámetro del concentrador y en el eje Y su altura, usando SolidWorks se diseña el concentrador.

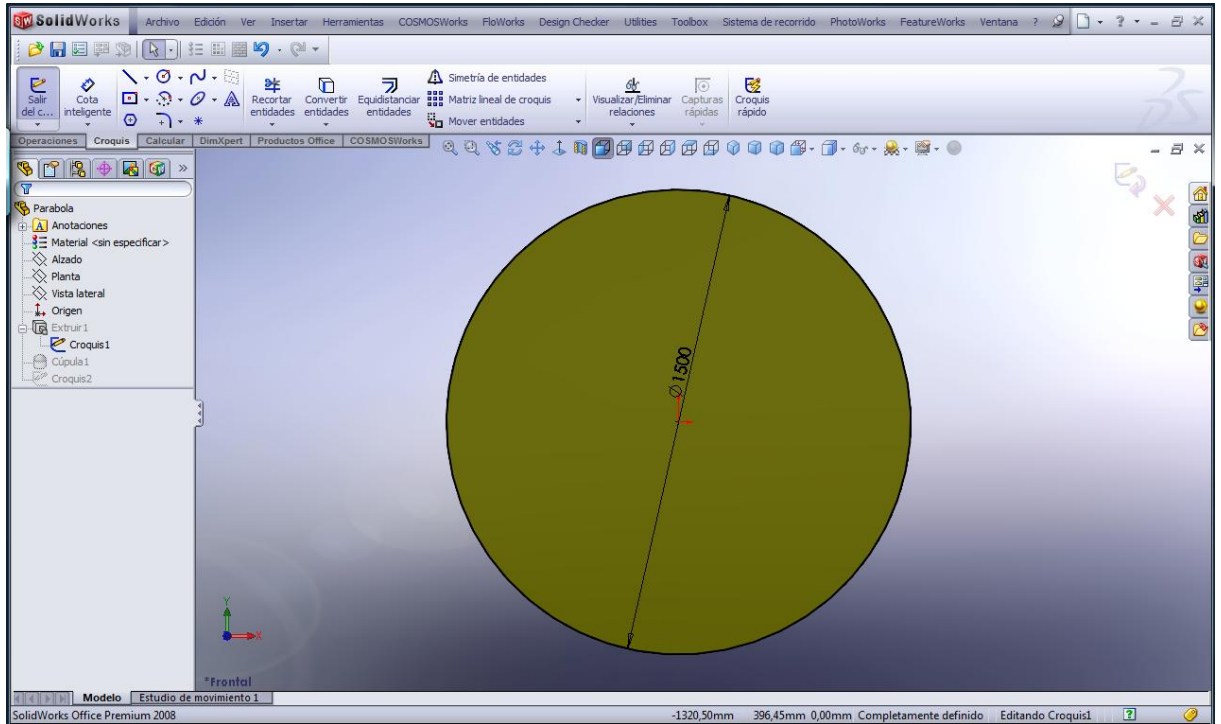


Figura 2.15. Diámetro del concentrador

De acuerdo con el diseño del concentrador tenemos en la figura 2.15 el diámetro de 1500 mm.

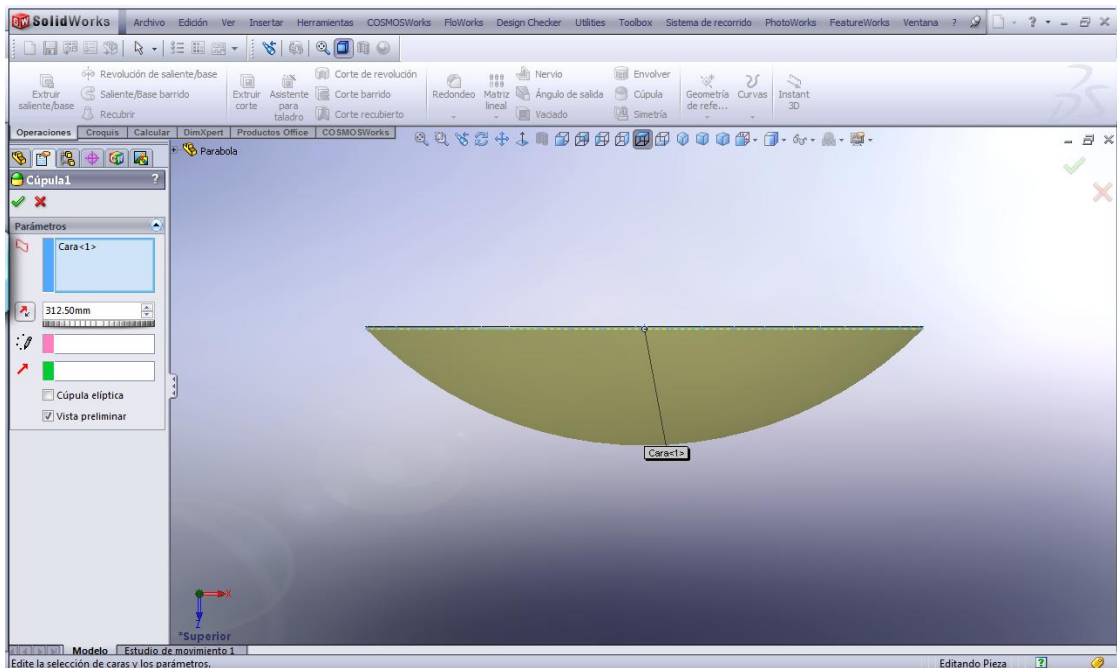


Figura 2.16. Altura del concentrador

La figura 2.16 muestra la altura del concentrador 312,5 mm.

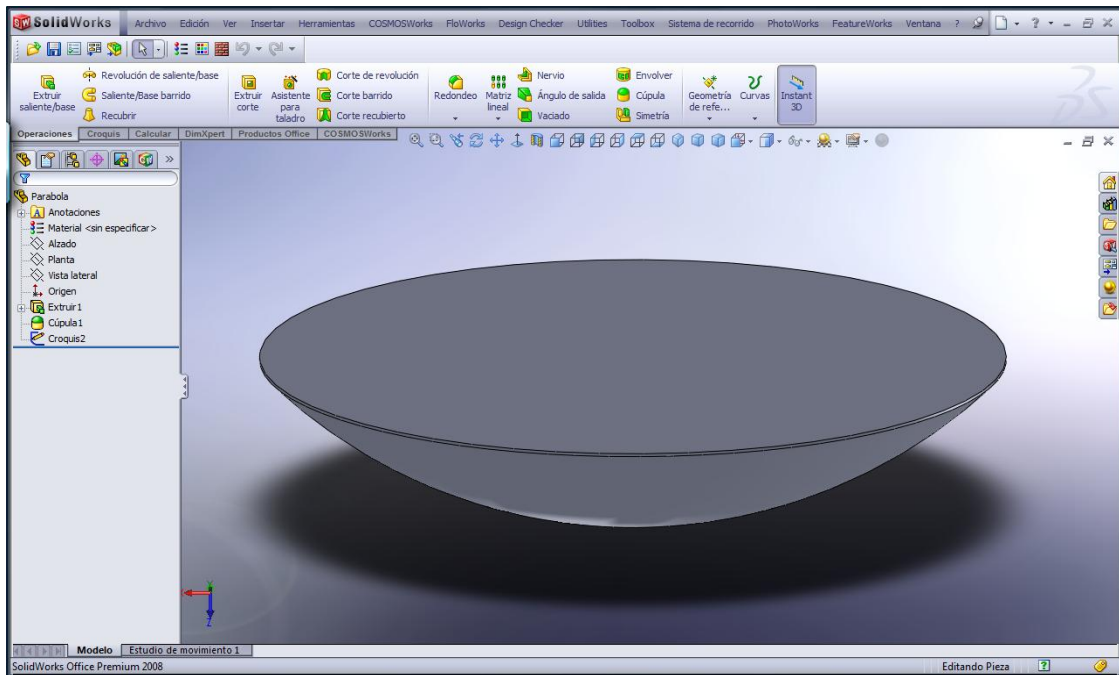


Figura 2.17. Modelado del concentrador

La figura muestra 2.17 el modelo del concentrador, la superficie en donde se reflejara la radiación solar debe ser pulida, totalmente lisa y sin deformaciones para colocar la película reflectiva.

CAPÍTULO III

3. DISEÑO MECÁNICO DEL MOTOR

INTRODUCCIÓN

Analizar los elementos mecánicos del motor Stirling mediante un software de diseño como COSMOSWORKS del programa SOLIDWORKS, permitirá un trabajo eficiente, para: elegir materiales que garanticen el buen funcionamiento del motor, la facilidad de encontrarlos en el mercado, la idoneidad en la construcción y rediseño en su forma geométrica.

3.1.PARÁMETROS DE DISEÑO DEL MOTOR.

De acuerdo a lo calculado en el capítulo II las presiones que se generan en el motor Stirling son:

Presiones:

- $P_1 = 101325 \text{ N/m}^2$
- $P_2 = 416601,63 \text{ N/ m}^2$
- $P_3 = 971283,687 \text{ N/m}^2$
- $P_4 = 236233,63 \text{ N/ m}^2$

Temperaturas:

- Máxima del foco $550 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Menor $80 \text{ }^\circ\text{C}$.

La velocidad que adquiera el motor Stirling va a depender de:

- La radiación solar, esta puede ser:
 - Radiación directa, del sol.
 - Radiación difusa, nublado. Y,
 - Radiación por albedo, la que se refleja del piso.
- La cantidad de radiación solar que el concentrador puede orientar en el foco. Y,
- La velocidad del viento. Y,

- La diferencia de temperaturas entre la zona de calentamiento y enfriamiento.

Sobre este último punto va a depender un 50% de la velocidad que adquiera el motor.

✓ 1200 RPM.

3.2.CALCULO DE FUERZA Y TORQUE INICIAL.

3.2.1. FUERZA

Para calcular la fuerza que ejercerá el aire caliente sobre la cabeza del piston superior nos valemos de la mayor presión que se va a generar en el mismo y del diámetro del pistón.

$$P = F / A$$

$$A = \pi * r^2$$

$$A = \pi * (0,017 \text{ m})^2$$

$$A = 9,079 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$F = P * A$$

$$F = 971283,687 \text{ N/m}^2 * 9,079 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$F = 881,848 \text{ N.}$$

3.2.2. TORQUE

Con la fuerza que ejerce el aire sobre la cabeza del pistón superior ahora calculamos el torque, para ello utilizaremos el radio del muñón de biela del cigüeñal.

$$T = F * d$$

$$d = r_{\text{cigüeñal}} = 8,9 \text{ mm} = 8,9 \times 10^{-3} \text{ m.}$$

$$T = 881,848 \text{ N} * 8,9 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$T = 7,848 \text{ N*m.}$$

3.3.MODELADO PREVIO DEL MOTOR STIRLING EN SOLIDWORKS.

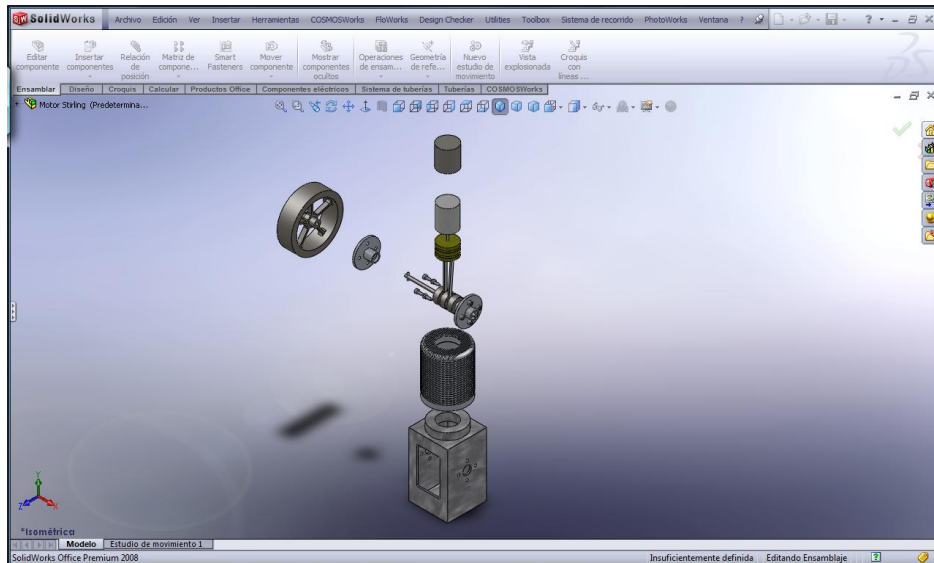


Figura 3.1. Ensamble del motor Stirling

Realizadas todas las piezas en Solidworks empezamos el ensamblaje del motor en un archivo nuevo del programa arrastramos todas las piezas en el orden como se muestra en la figura.

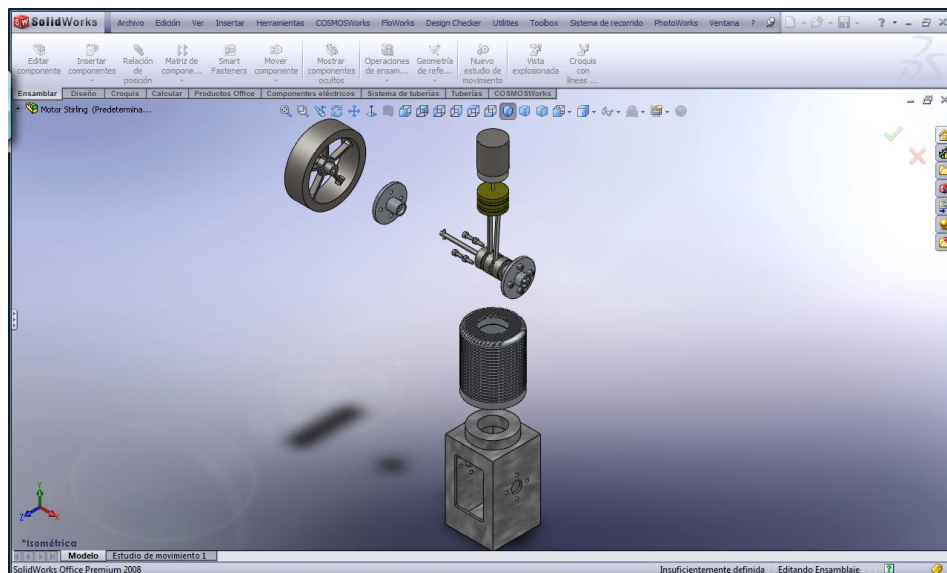


Figura 3.2. Ensamble del cigüeñal

Arrastradas todas las piezas en un archivo nuevo comenzamos con el ensamble. La primera pieza a unir es el cigüeñal con las bielas y estas a su vez acopladas a los pistones.

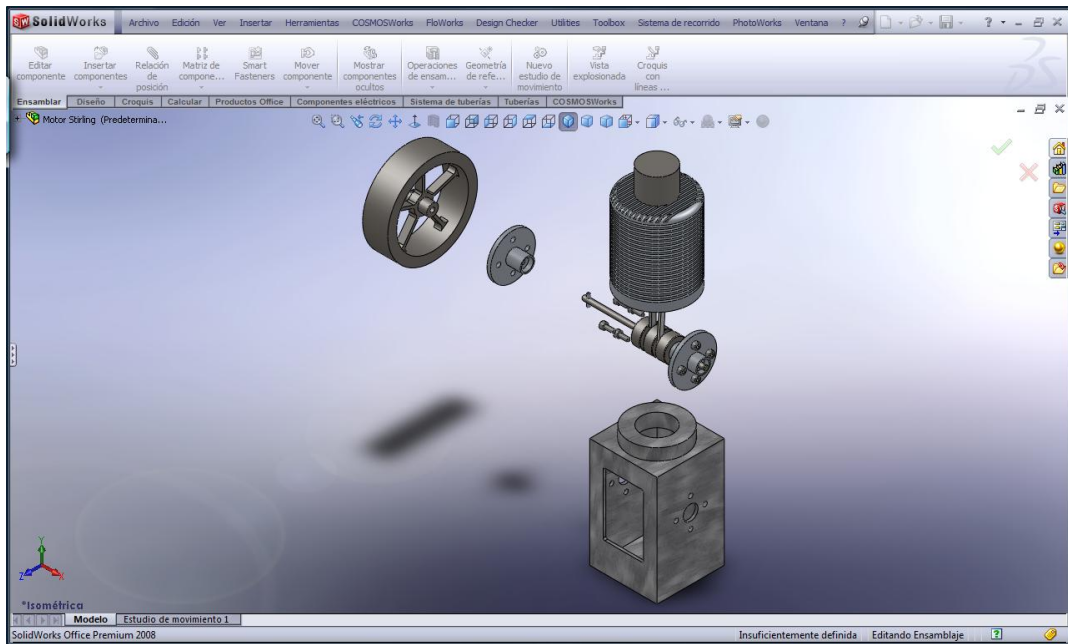


Figura 3.3. Ensamble del block

Terminado de armar el cigüeñal con los cilindros el siguiente paso es la colocación del block sobre las piezas antes descritas y enroscar el cilindro de calor.

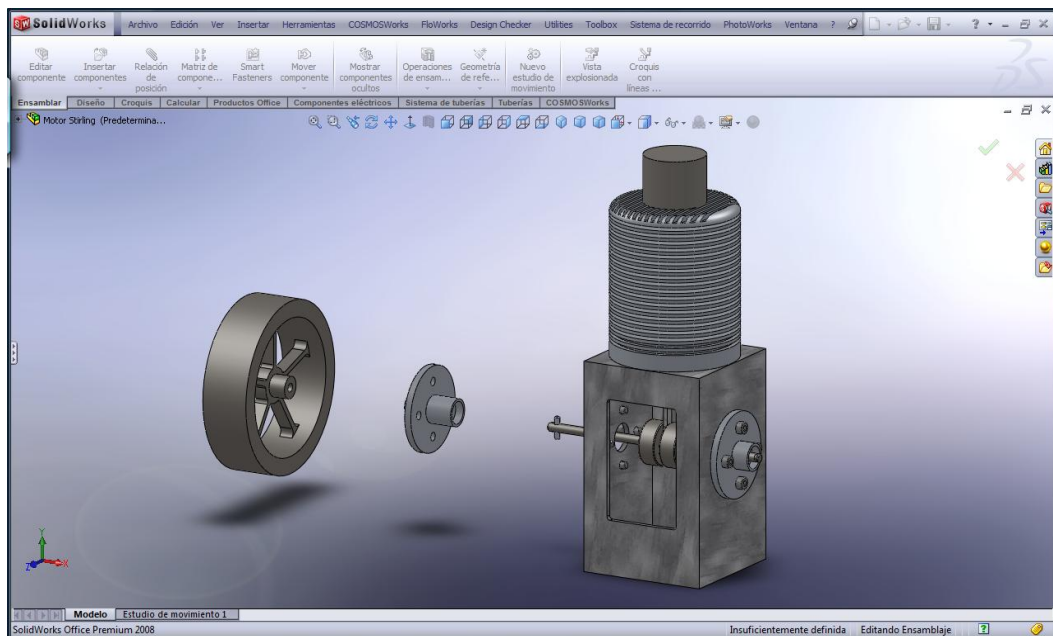


Figura 3.4. Ensamble de rodamiento

En la figura 3.4 observamos un motor armado en un ochenta por ciento donde ya está listo su cilindro de calor, block, carcasa y las respectivas partes dentro de estos, el siguiente paso es la colocación del rodamiento sobre el eje del cigüeñal.

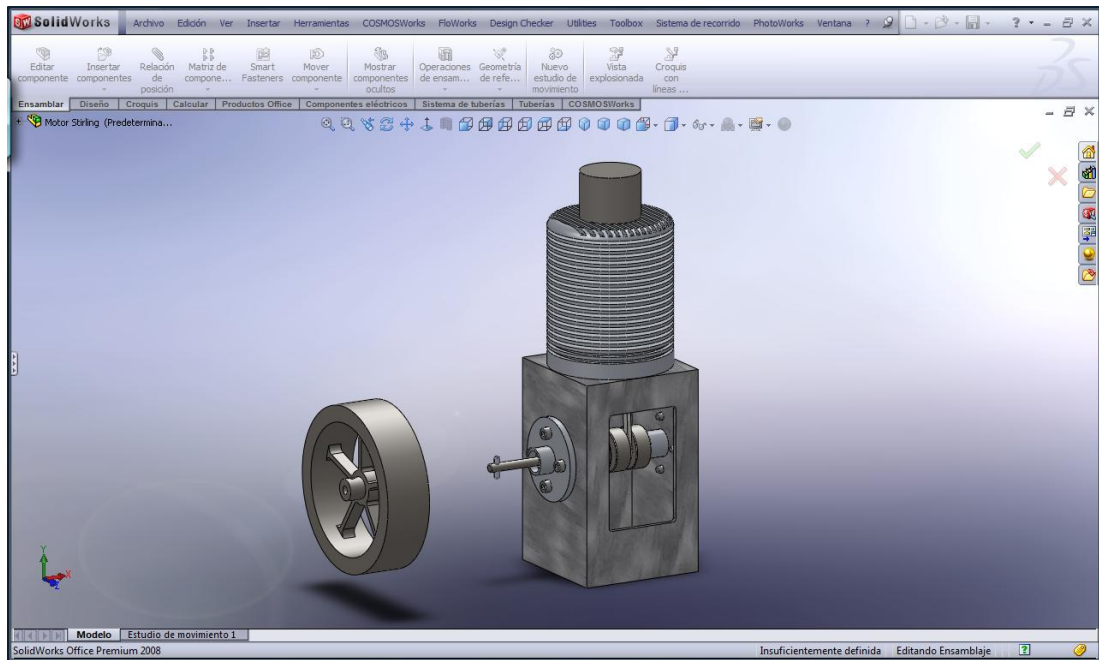


Figura 3.5. Ensamble de volante

Para dar por terminado el ensamble del motor Stirling la última pieza es el volante la cual va sobre el mismo eje del rodamiento.

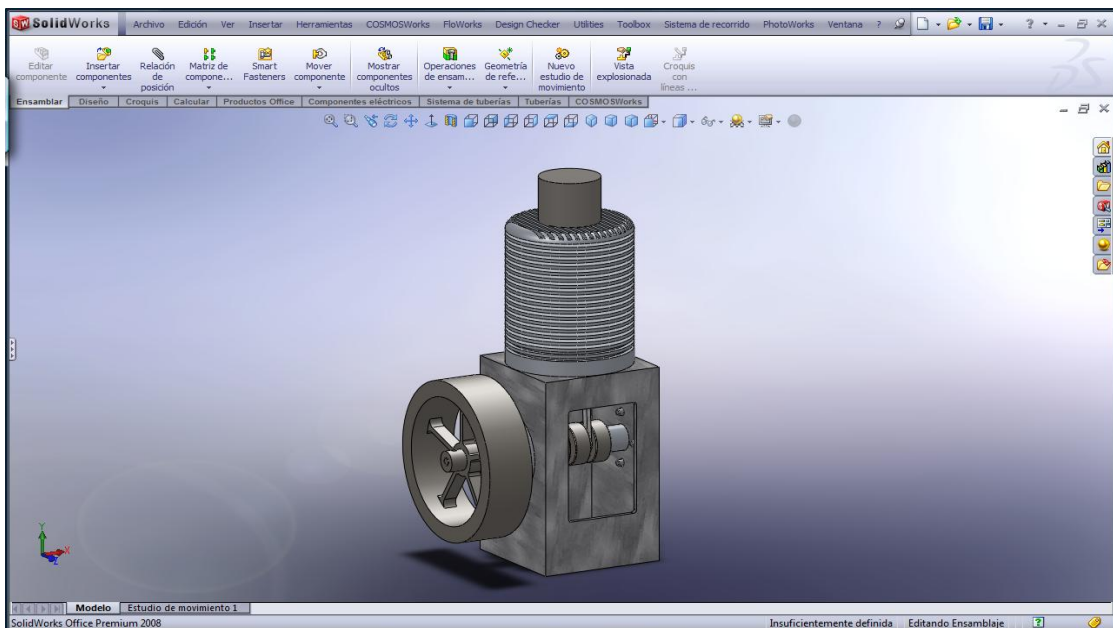


Figura 3.6. Motor ensamblado

En la figura 3,6 se muestra el motor Stirling con todas sus partes listas para los análisis dinámicos, los esfuerzos, entre otros.

3.4. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DINÁMICO DEL MOTOR MEDIANTE COSMOSMOTION.

Para la simulación y análisis dinámico del motor Stirling mediante el programa de SolidWorks, CosmosMotion, utilizamos como parámetros las revoluciones máximas del motor de 1200 RPM y la gravedad, que se encuentra en el sentido de las Y positiva.

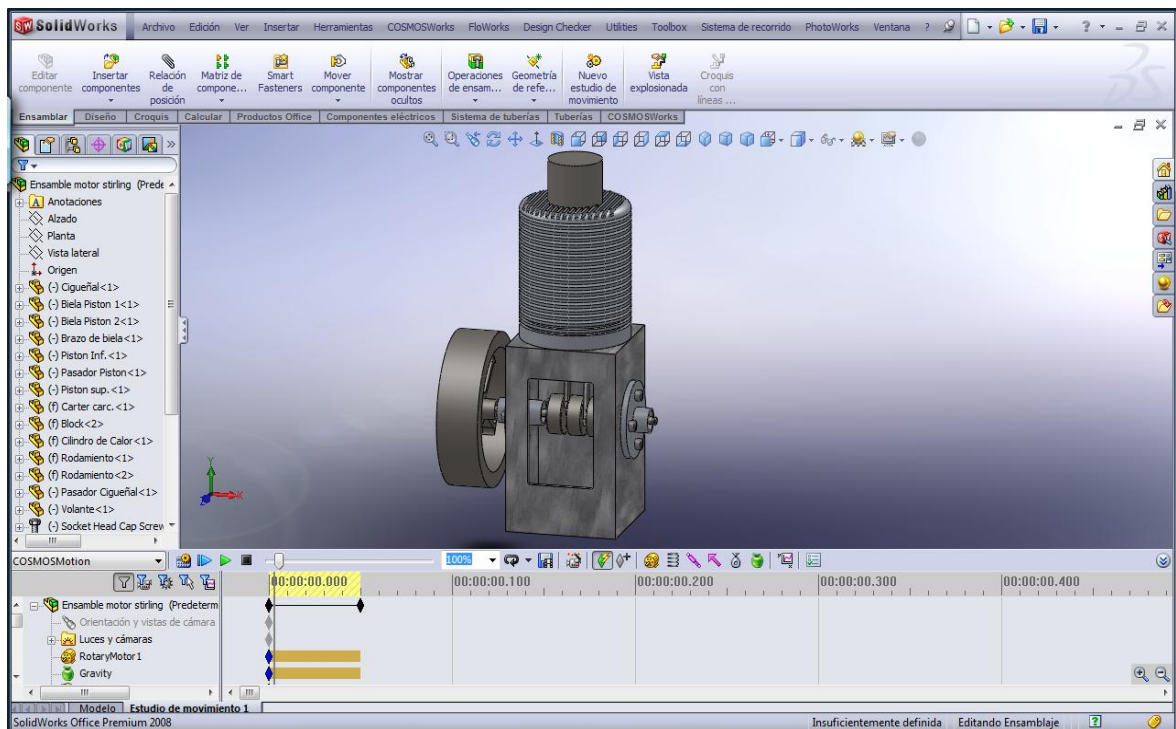


Figura 3.7. Simulación del motor en COSMOSMotion

3.4.1. DESPLAZAMIENTOS

- Desplazamiento del pistón 1 o pistón de la zona de calentamiento.

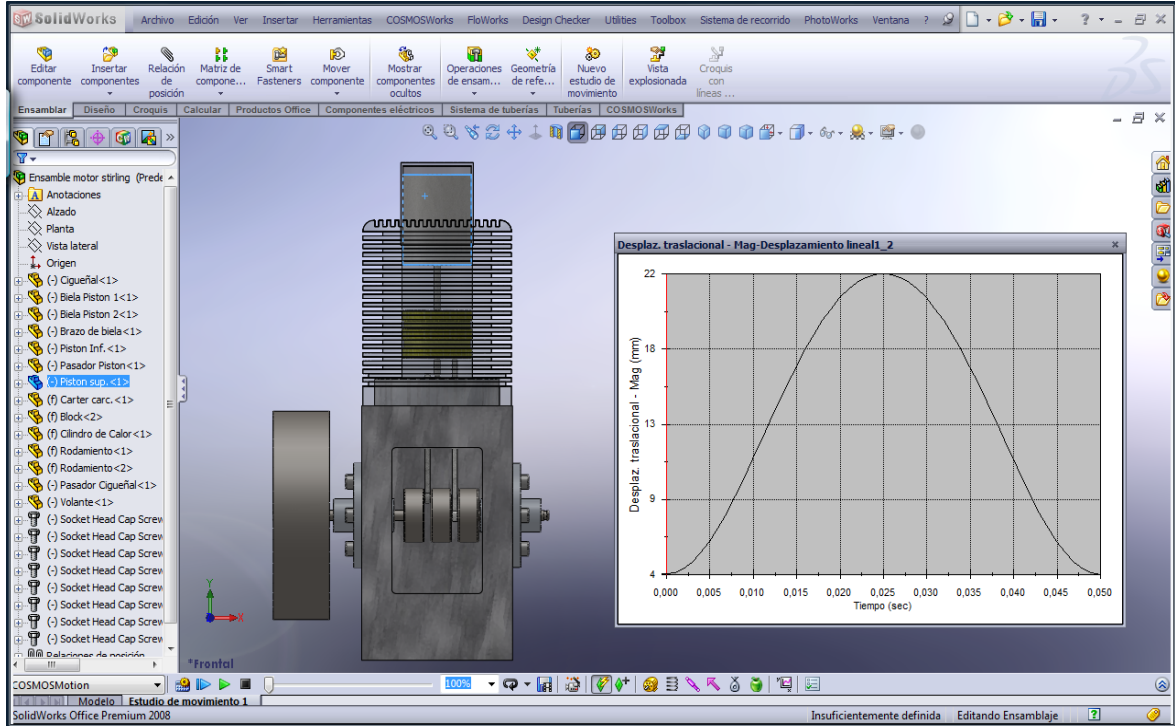


Figura 3.8. Desplazamiento del pistón 1

En la figura podemos observar que el pistón superior o el que se encuentra en la zona de calentamiento tiene un desplazamiento periódico.

Tabla III.1. Desplazamiento del pistón 1

Puntos	Tiempo (seg)	Desplazamiento (mm)
PMS	0	4,25
½ Carrera	0,012	13,302024
PMI	0,025	22,05
½ Carrera	0,038	13,302024
PMS	0,05	4,25

El desplazamiento se ha tomado en cuenta desde un punto muerto superior hasta un punto muerto inferior, el desplazamiento inicial que muestra el pistón es la altura de la cámara.

- Desplazamiento del pistón 2 o pistón de la zona de enfriamiento.

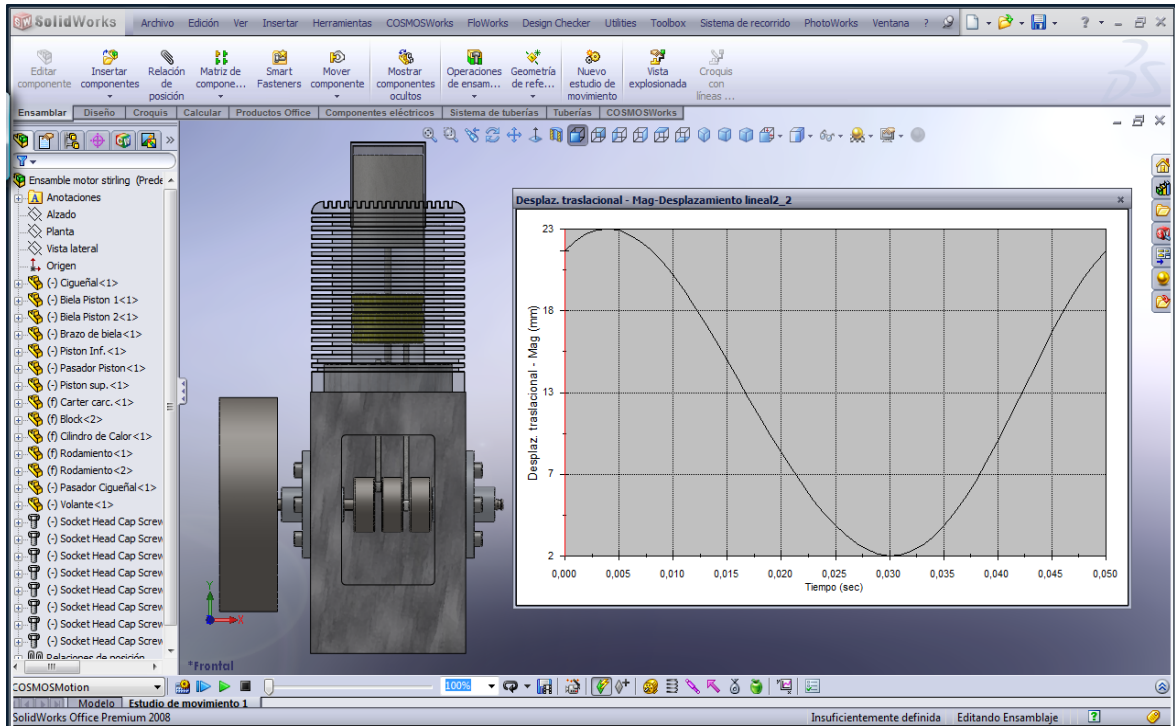


Figura 3.9. Desplazamiento del pistón 2

Como el desfase de un pistón a otro es de 90 grados, en la figura podemos observar que el desplazamiento en un inicio aumenta para luego disminuir y posteriormente ser periódico.

Tabla III.2. Desplazamiento del pistón 2

Puntos	Tiempo (seg)	Desplazamiento(mm)
	0	21,958548
	0,004	23,3903993
PMI	0,012	18,3875495
	0,03	2,19026743
PMS	0,038	5,8923735
	0,05	21,958548

La magnitud del desplazamiento del pistón de la zona de enfriamiento depende del pistón 1 ya que ambos se mueven simultáneamente.

Se ha tomado en cuenta para la magnitud del pistón 2 desde el borde inferior del pistón 1 hasta el borde superior del pistón 2.

3.4.2. VELOCIDADES

- Velocidad del pistón 1 o pistón de la zona de calentamiento.

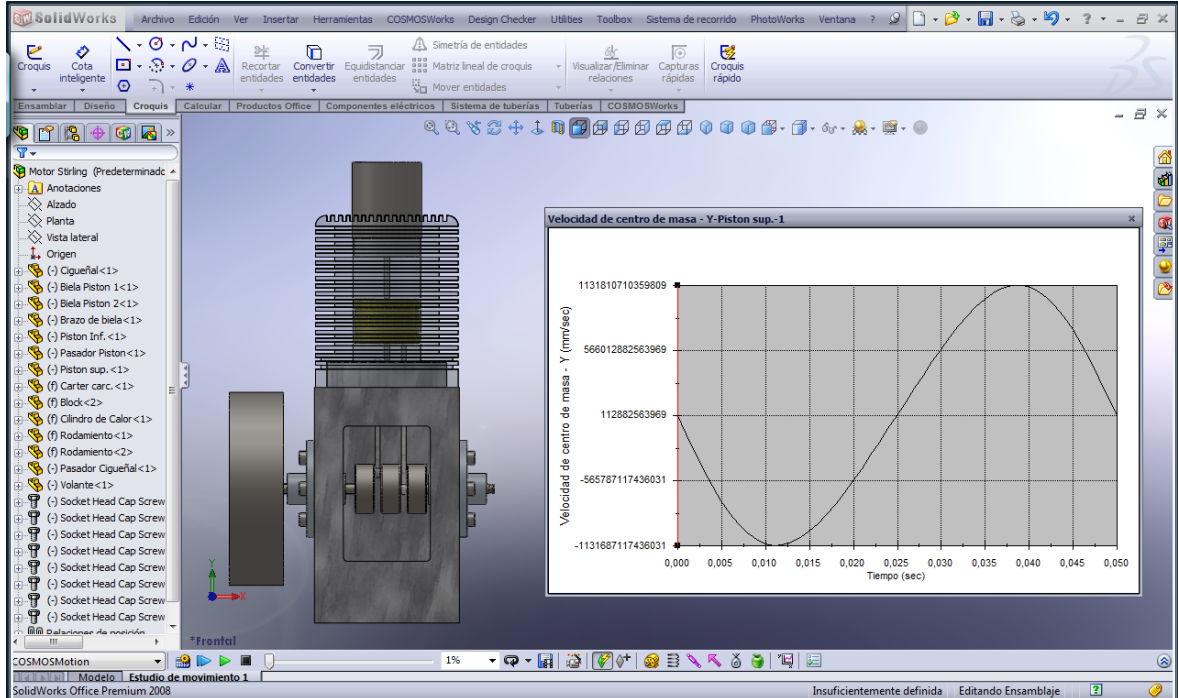


Figura 3. 10. Velocidad del pistón 1

La figura muestra la velocidad del pistón 1, esta velocidad es lineal en sentido de las Y.

Tabla III.3. Velocidad del pistón 1

Puntos	Tiempo (seg)	Velocidad (mm/seg)
PMS	0	-60,0752087
½ Carrera	0,012	-1,13E+15
PMI	0,025	45,0715854
½ Carrera	0,038	1,13E+15
PMS	0,05	-60,0752087

Con los datos obtenidos conocemos que la mayor velocidad del pistón 1 es a media carrera, varia por el signo y disminuye mientras más se acerca a los puntos muertos tendiendo a cero en dichos puntos.

- Velocidad del pistón 2 o pistón de la zona de enfriamiento.

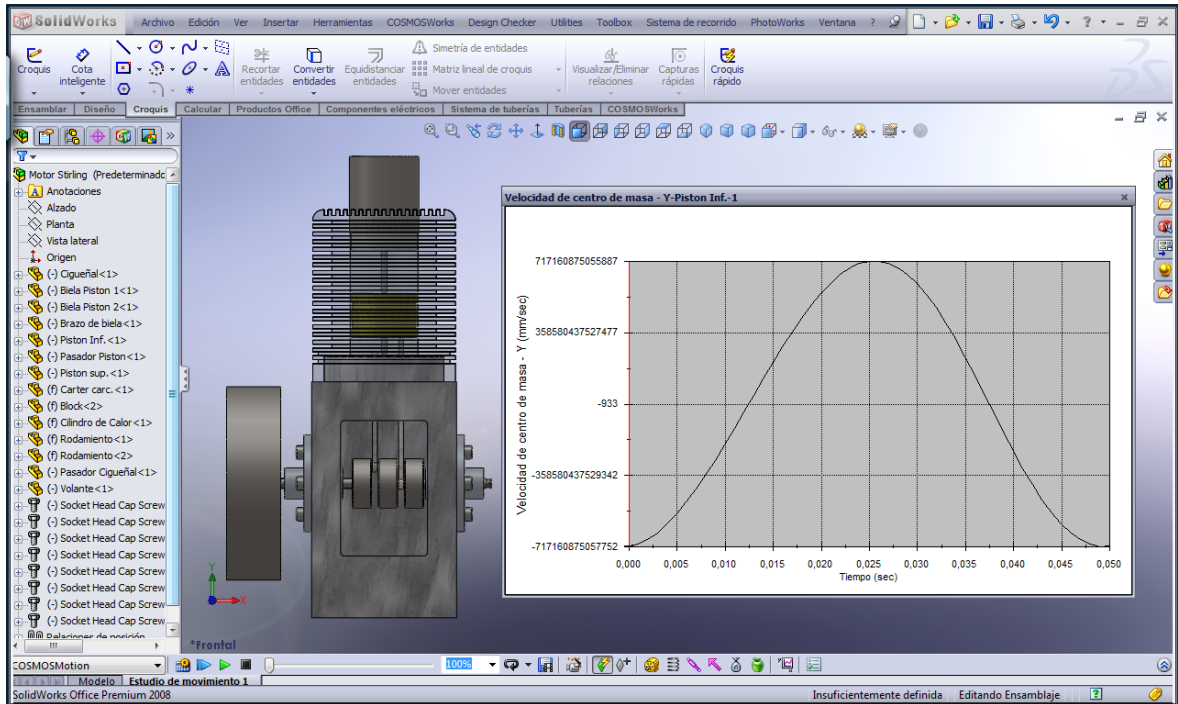


Figura 3.11. Velocidad del pistón 2

La velocidad del pistón 2 se encuentra desfasado 90 grados con respecto al pistón 1.

Tabla III.4. Velocidad del pistón 2

Puntos	Tiempo (seg)	Velocidad (mm/sec)
½ Carrera	0	-7,1628E+14
PMI	0,012	-4,1696E+13
½ Carrera	0,025	7,1628E+14
PMS	0,038	-4,8256E+13
½ Carrera	0,05	-7,1628E+14

Como se dijo anteriormente las mayores velocidades se encuentran a media carrera y se ratifican con la grafica y los datos obtenidos para el pistón 2.

3.4.3. ACELERACIONES

- Aceleración del pistón 1 o pistón de la zona de calentamiento.

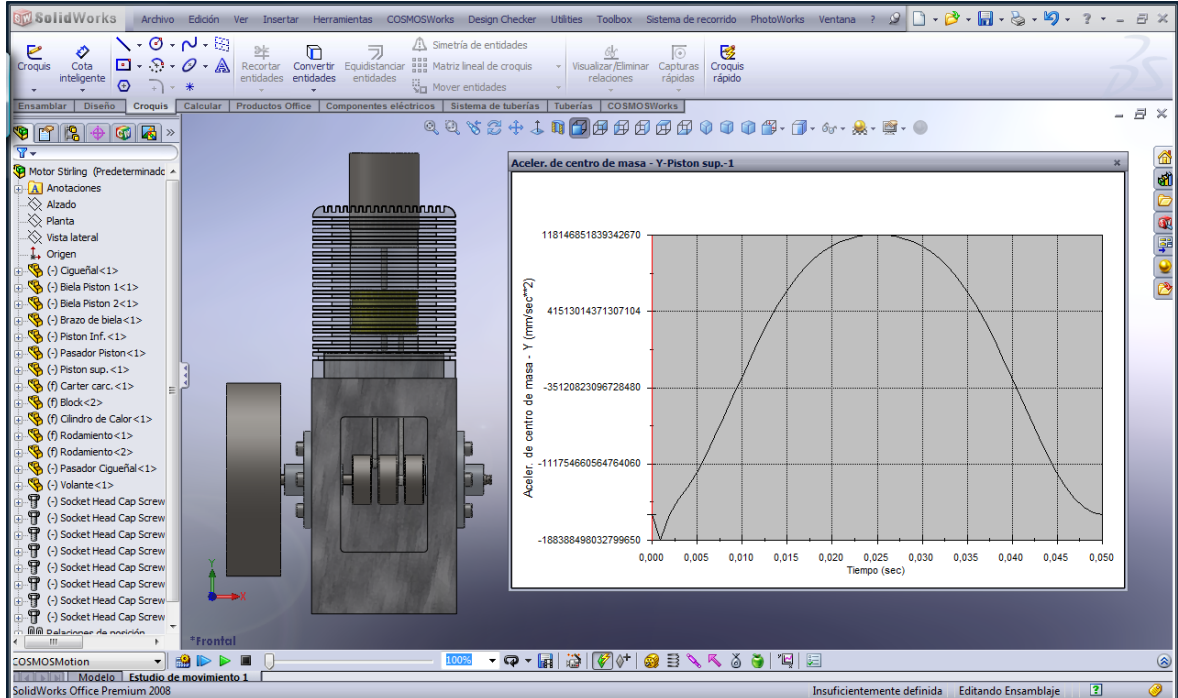


Figura 3.12. Aceleración del pistón 1

La figura presenta la aceleración del pistón 1, este produce una gran aceleración en el instante que el pistón empuje hacia abajo al cigüeñal a través de las bielas para iniciar el movimiento del motor Stirling, ya que en este cilindro se produce el mayor trabajo.

Tabla III.5. Aceleración del pistón 1

Puntos	Tiempo (seg)	Aceleración (mm/seg ²)
PMS	0	-1,63E+17
*	0,001	-1,88E+17
½ Carrera	0,012	1,39E+16
PMI	0,025	1,18E+17
½ Carrera	0,038	1,37E+16
PMS	0,05	-1,63E+17

A diferencia de la velocidad, la aceleración del pistón 1, cuando se aproxima a media carrera disminuye y en los puntos muertos aumenta, adicional a esto en un instante incrementa su velocidad hasta que el pistón 2 empiece a desplazarse.

- Aceleración del pistón 2 o pistón de la zona de enfriamiento.

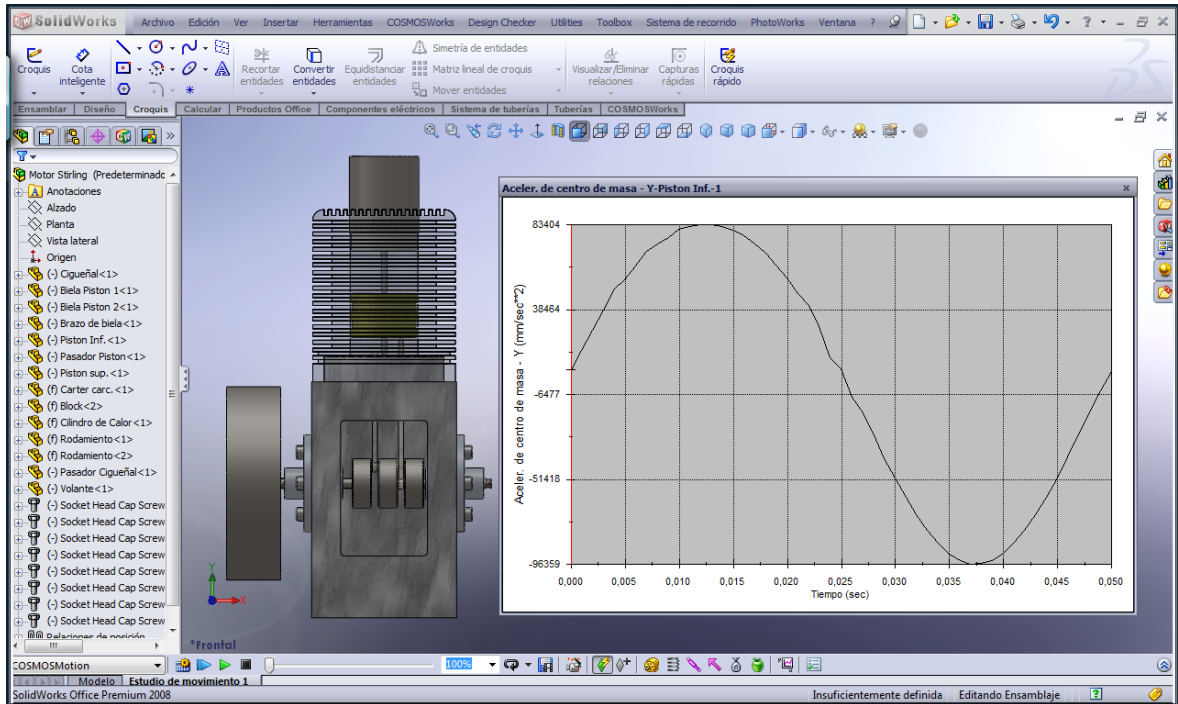


Figura 3.13. Aceleración del pistón 2

La figura muestra la aceleración del pistón 2, a diferencia del pistón 1 esta no tiene o muestra picos.

Tabla III.6. Aceleración del pistón 2

Puntos	Tiempo (seg)	Aceleración (mm/seg ²)
½ Carrera	0	6595,34566
PMI	0,012	83185,327
½ Carrera	0,025	6676,02087
PMS	0,038	-96359,2276
½ Carrera	0,05	5621,90726

La aceleración del pistón 2 como inicia a media carrera es menor pero luego aumenta en los puntos muertos.

3.4.4. TORQUE APLICADO

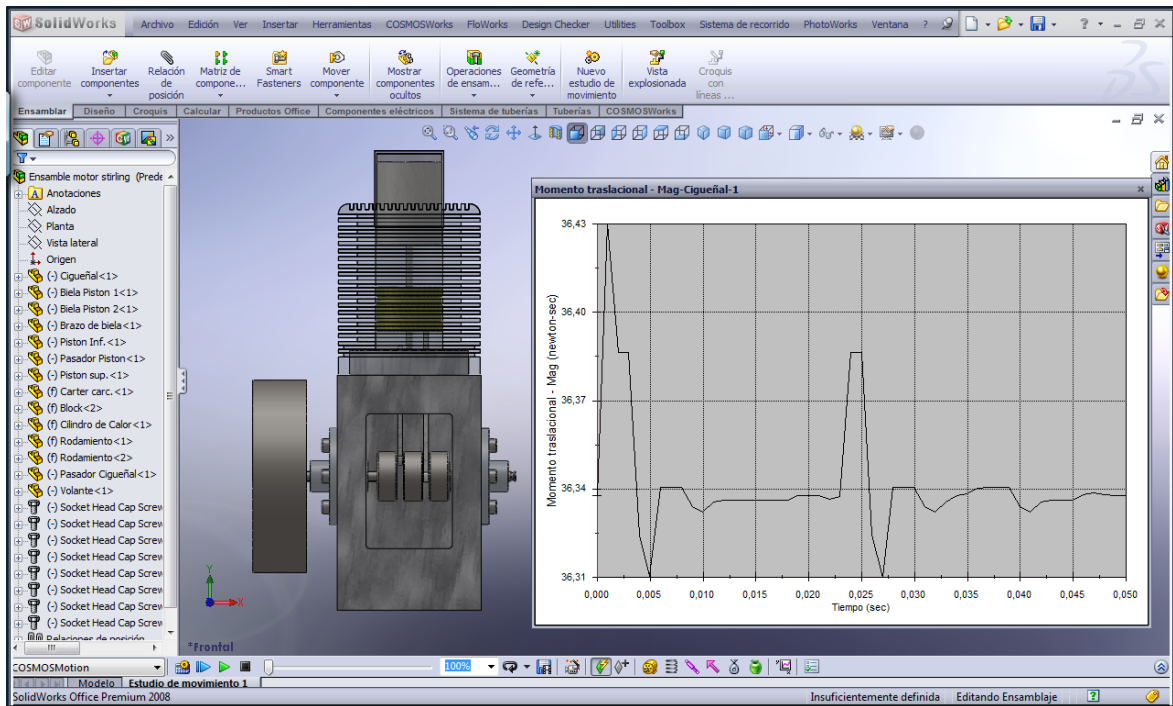


Figura 3.14. Momento de traslación

La figura muestra el momento de traslación. Para todo el ciclo el momento es de 36 N*seg. Se muestran picos pero son mínimas variaciones y se muestra a gran escala para apreciar esos puntos.

3.5.CALCULO DE ESFUERZOS EN EL MOTOR MEDIANTE COSMOSWORKS DESIGNER.

Para el análisis de esfuerzos se usan los parámetros de fuerza, velocidad, gravedad y materiales.

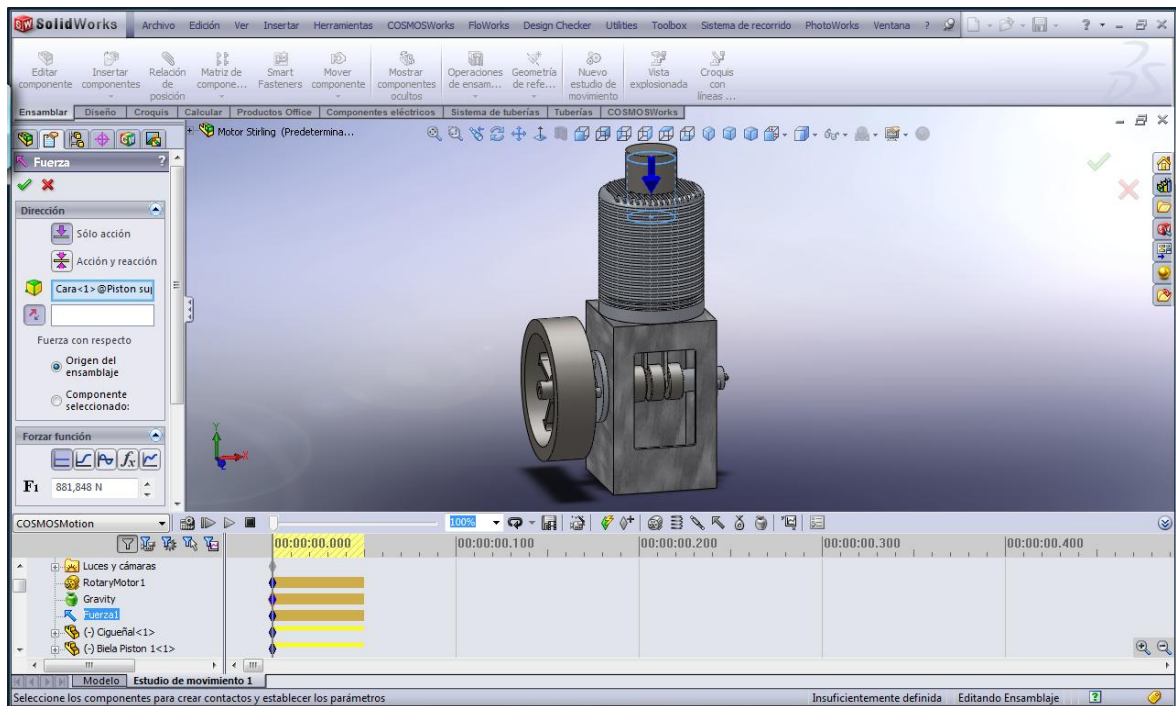


Figura 3.15. Parámetros en Cosmosworks.

3.5.1. PISTÓN SUPERIOR

Descripción.- Análisis mediante el Método de elementos finitos (MEF) del pistón superior.

El material que se uso para el análisis del pistón superior es aluminio de la biblioteca de materiales de CosmosWorks Designer.

Tabla III.7. Propiedades del material del pistón superior

Nº	Nombre de sólido	Material	Masa	Volumen
1	Piston sup.	7075-T6, Plate (SS)	0.109605 kg	3.90052e-005 m ³

Nombre de material:	7075-T6, Plate (SS)		
Descripción:	Aluminio		
Origen del material:	Archivos de biblioteca		
Nombre de biblioteca de materiales:	cosmos materials		
Tipo de modelo del material:	Isotrópico elástico lineal		
Nombre de propiedad	Valor	Unidades	Tipo de valor
Módulo elástico	7.2e+010	N/m ²	Constante
Coefficiente de Poisson	0.33	NA	Constante
Módulo cortante	2.69e+010	N/m ²	Constante
Densidad	2810	kg/m ³	Constante
Límite de tracción	5.7e+008	N/m ²	Constante
Límite elástico	5.05e+008	N/m ²	Constante
Coefficiente de dilatación térmica	2.4e-005	/Kelvin	Constante
Conductividad térmica	130	W/(m.K)	Constante
Calor específico	960	J/(kg.K)	Constante
Factor de endurecimiento (0.0-1.0; 0.0=isotrópico; 1.0=cinemático)	0.85	NA	Constante

Empezamos con las tensiones que va a soportar el pistón superior en la zona de calentamiento.

3.5.1.1. Tensiones von Mises del pistón superior

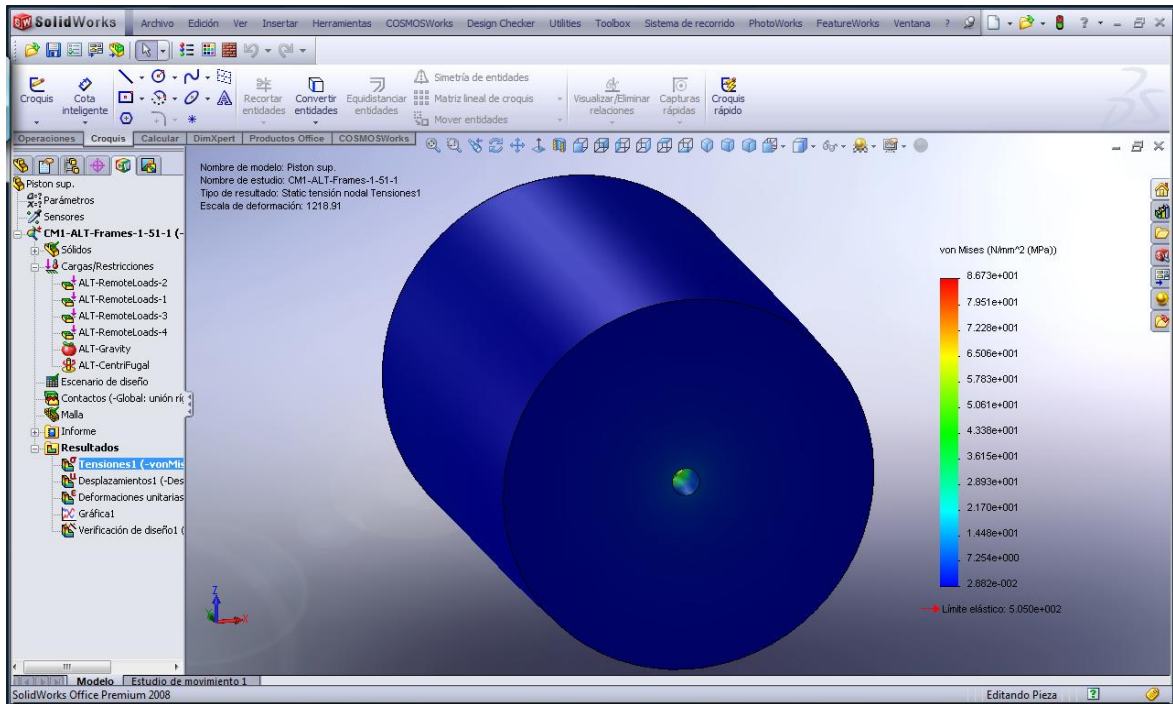
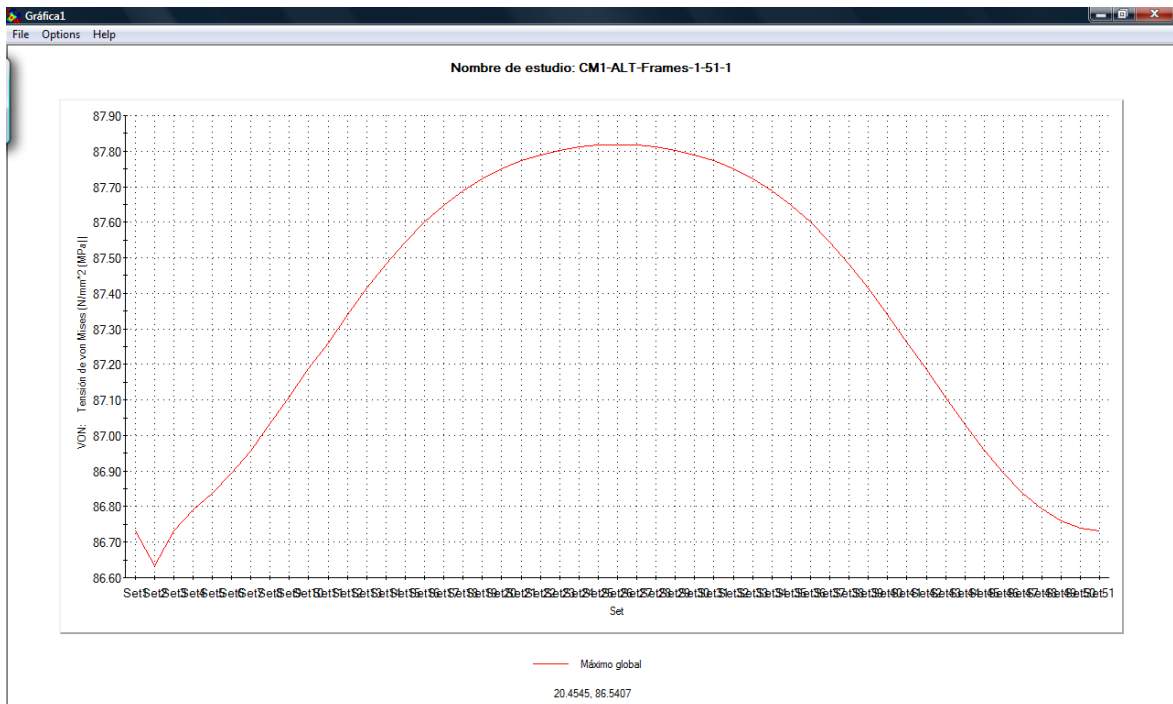


Figura 3.16. Tensiones von Mises del pistón sup.

Como podemos apreciar el pistón es sólido macizo, en la parte inferior se une al brazo de biela a través de una rosca, esta es la que presenta una ligera tensión.



Grafica 3.1. Tensiones von Mises del pistón sup.

La grafica 3.1 muestra las tensiones con respecto a los escenarios de diseño, se puede describir que a mitad del ciclo se producen las mayores tensiones, es decir mientras el pistón superior se desplaza al PMI y el pistón inferior se encuentra a media carrera hacia el PMS.

3.5.1.2. Desplazamiento estático del pistón superior

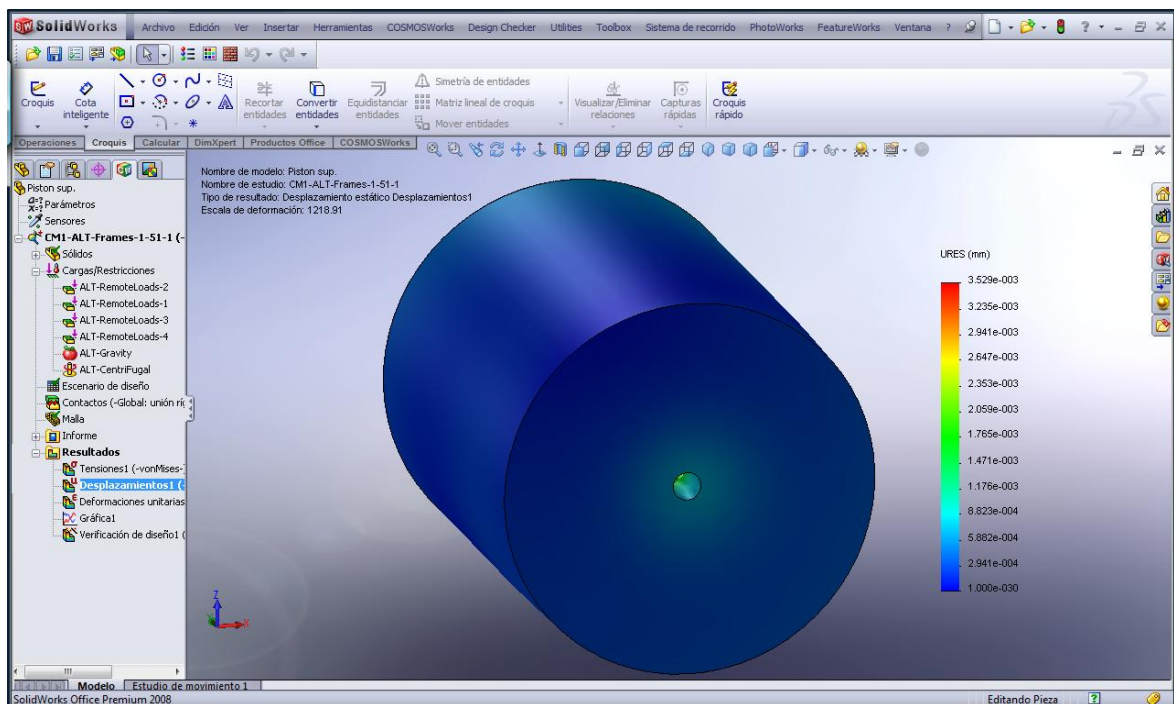


Figura 3.17. Desplazamiento estático del pistón sup.

No se presenta desplazamientos considerables, son mínimos o casi despreciables.

3.5.1.3. Deformaciones unitarias del pistón superior

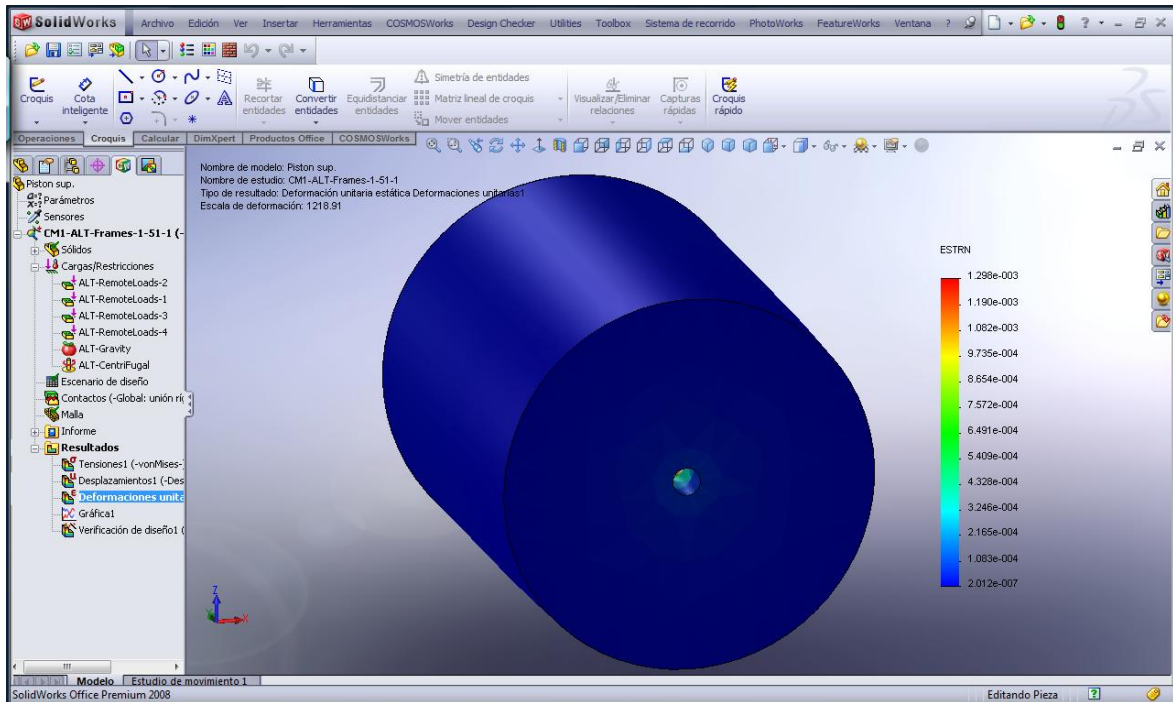


Figura 3.18. Deformaciones unitarias del pistón sup.

Al igual que el desplazamiento no hay mayor deformación a considerar.

La siguiente tabla muestra los valores de Tensiones, desplazamientos y deformaciones antes descritos.

Tabla III.8. Resultados del estudio del pistón sup.

Nombre	Tipo	Mín.	Ubicación	Máx.	Ubicación
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	28821.8 N/m ² Nodo: 1446	(-12.1673 mm, 4.34841 mm, 4.89662 mm)	8.67314e+007 N/m ² Nodo: 11963	(- 0.926176 mm, 5.47688 mm, 0.437759 mm)
Desplazamientos1	URES: Desplazamiento resultante	0 m Nodo: 594	(0.308763 mm, 19.9579 mm, -1.67524 mm)	3.52937e-006 m Nodo: 11972	(- 0.0890868 mm, 5 mm, 0.244764 mm)

Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	2.01247e-007	(-11.2235 mm,	0.00129795	(-0.42436 mm,
		Elemento: 8111	4.54642 mm,		Elemento: 2611
			8.61587 mm)		1.19224 mm)

3.5.1.4. Verificación del diseño del pistón superior

Al pistón superior por ser macizo y por su material se mantiene su diseño.

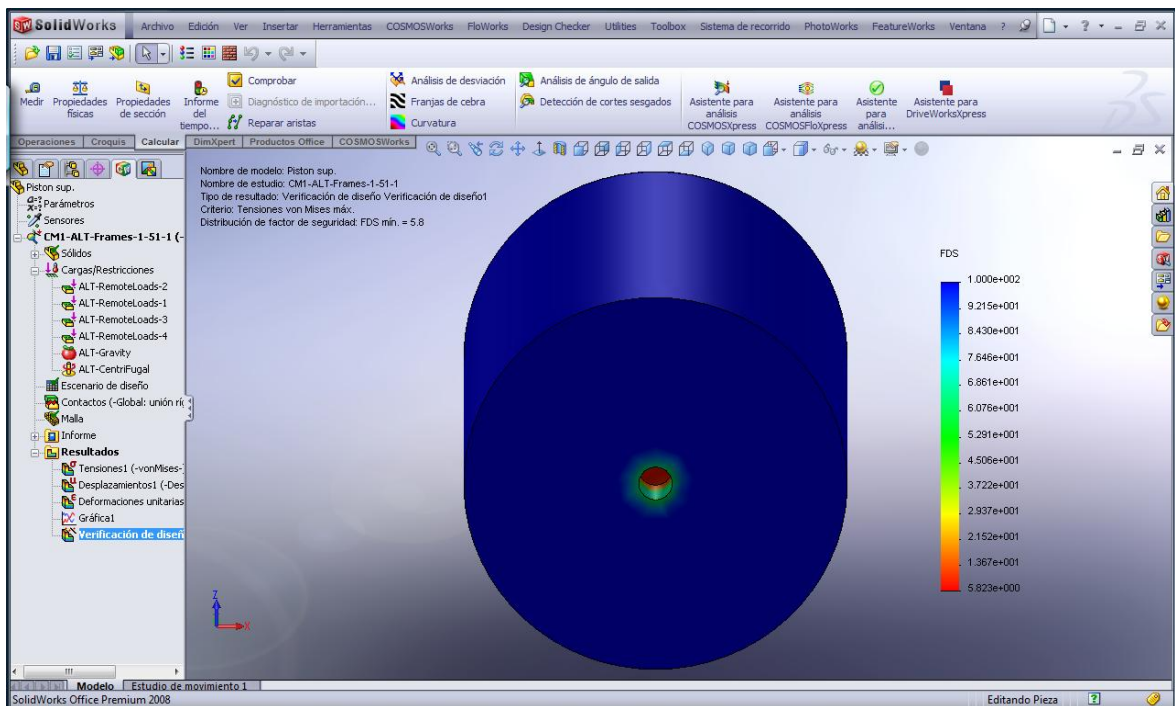


Figura 3.19. Verificación del diseño del pistón 1

Obteniendo un factor de seguridad = 5,8

3.5.2. PISTÓN INFERIOR

Descripción.- Análisis mediante el Método de elementos finitos (MEF) del pistón inferior.

El material que se uso para el análisis del pistón inferior es bronce fosfórico de la biblioteca de materiales de CosmosWorks Designer.

Tabla III.9. Propiedades del material del pistón inferior

Nº	Nombre de sólido	Material	Masa	Volumen
1	Piston Inf.	Phosphor bronze 10% D, UNS C52400	0.113968 kg	1.29804e-005 m ³
Nombre de material:		Phosphor bronze 10% D, UNS C52400		
Descripción:				
Origen del material:		Archivos de biblioteca		
Nombre de biblioteca de materiales:		cosmos materials		
Tipo de modelo del material:		Isotrópico elástico lineal		
Nombre de propiedad	Valor	Unidades	Tipo de valor	
Módulo elástico	7.2e+010	N/m ²	Constante	
Coefficiente de Poisson	0.33	NA	Constante	
Módulo cortante	2.69e+010	N/m ²	Constante	
Densidad	2810	kg/m ³	Constante	
Límite de tracción	5.7e+008	N/m ²	Constante	
Límite elástico	5.05e+008	N/m ²	Constante	
Coefficiente de dilatación térmica	2.4e-005	/Kelvin	Constante	
Conductividad térmica	130	W/(m.K)	Constante	
Calor específico	960	J/(kg.K)	Constante	
Factor de endurecimiento (0.0-1.0; 0.0=isotrópico; 1.0=cinemático)	0.85	NA	Constante	

Empezamos con las tensiones que va a soportar el cilindro inferior.

3.5.2.1. Tensiones von Mises del pistón inferior

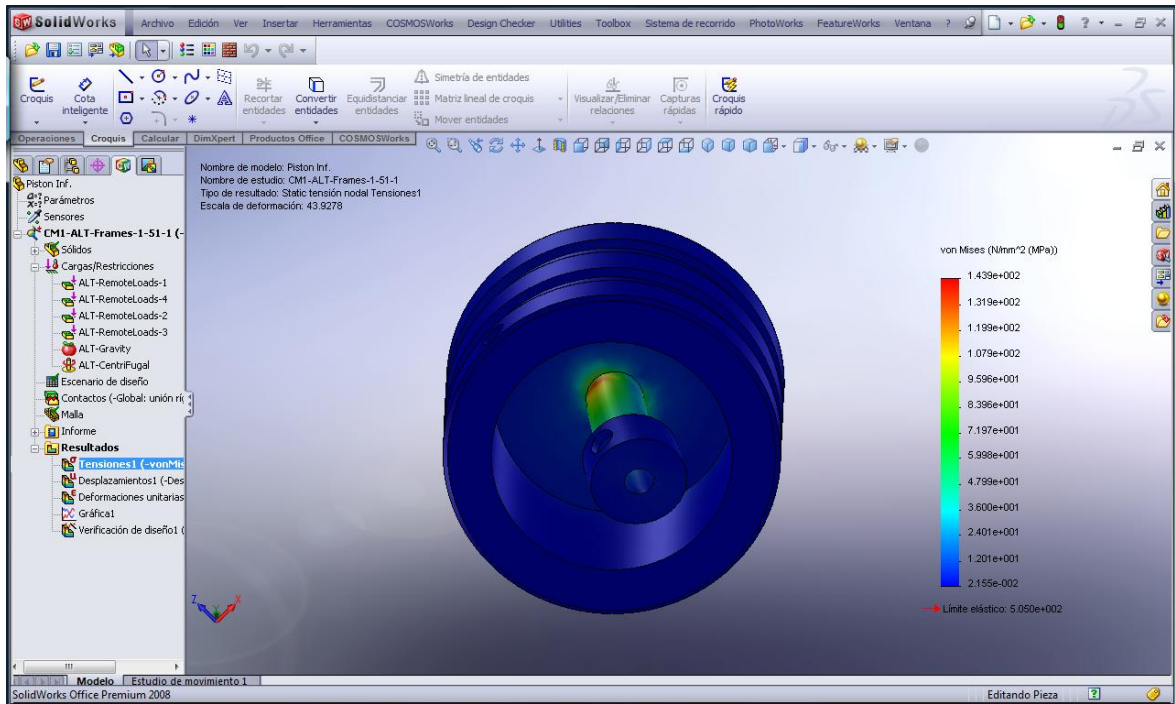
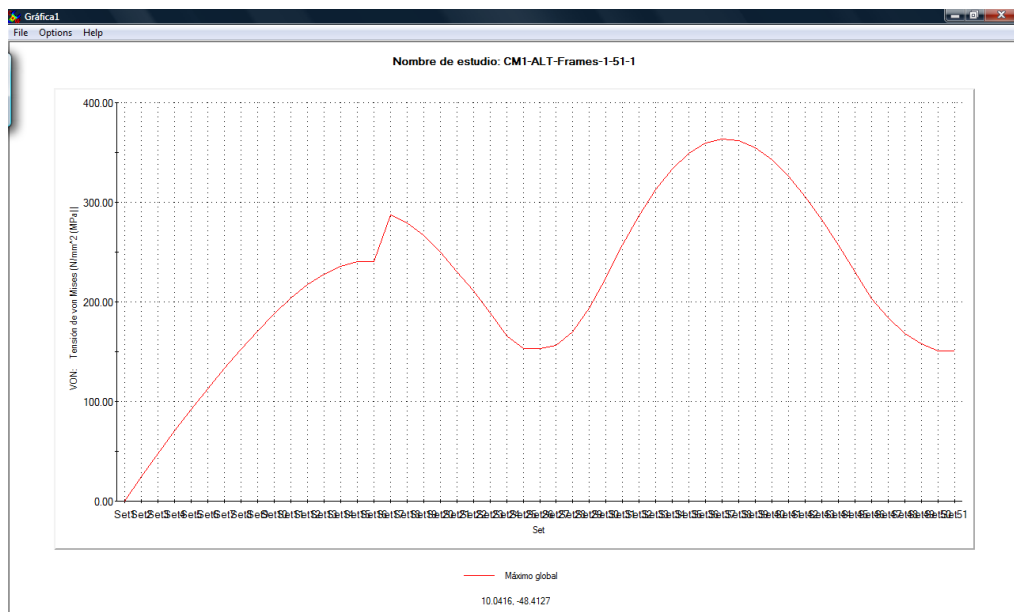


Figura 3.20. Tensiones von Mises del pistón inf.

Como podemos apreciar el pistón no es macizo, en la parte interna se encuentra un brazo hueco. En el borde entre el brazo y la cabeza del pistón que presenta una tensión de 143.922 N/mm^2 (MPa), lo podemos apreciar por la variación de colores que se muestra.



Gráfica 3.2. Tensiones von Mises del pistón inf.

La grafica 3.2 muestra las tensiones con respecto a los escenarios de diseño, se puede describir que la mayor tensión se produce en el instante que el pistón inferior se encuentra en el PMS y este está comprimiendo el aire.

3.5.2.2. Desplazamiento estático del pistón inferior

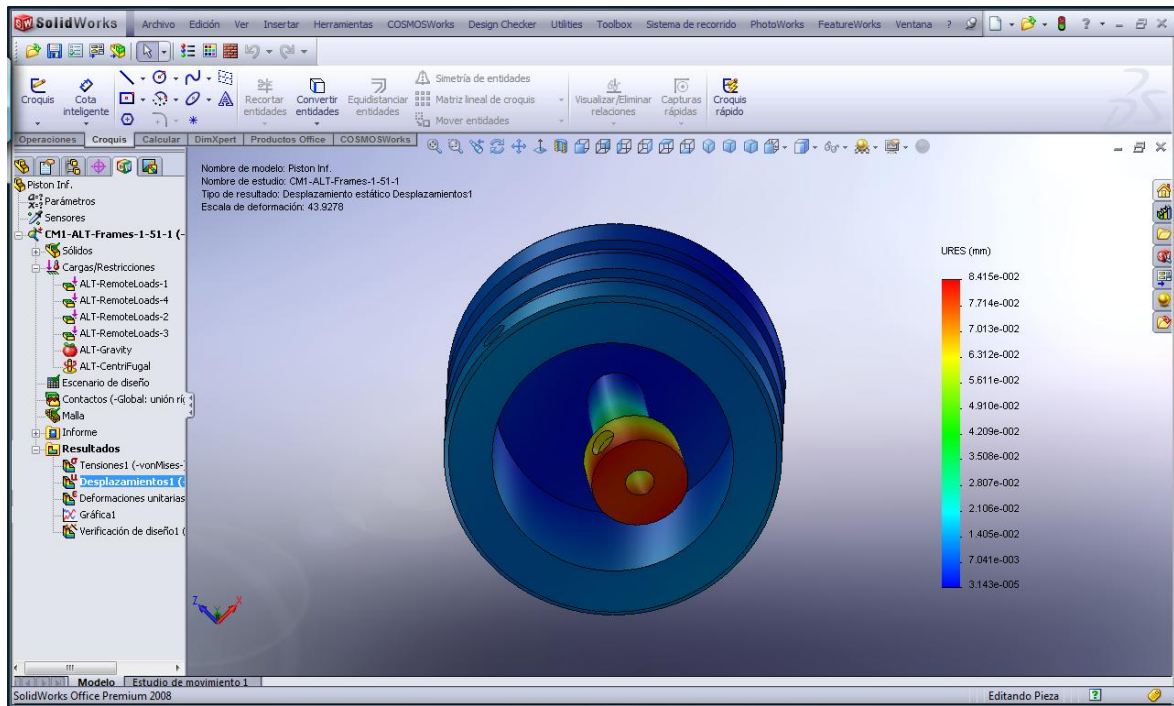


Figura 3.21. Desplazamiento estático del pistón inf.

En este caso el desplazamiento se presenta en la parte inferior del brazo del pistón, este presenta un desplazamiento de $5.68722e-005$ m, se debe a la fricción que este presenta con el brazo de biela.

3.5.2.3. Deformaciones unitarias del pistón inferior

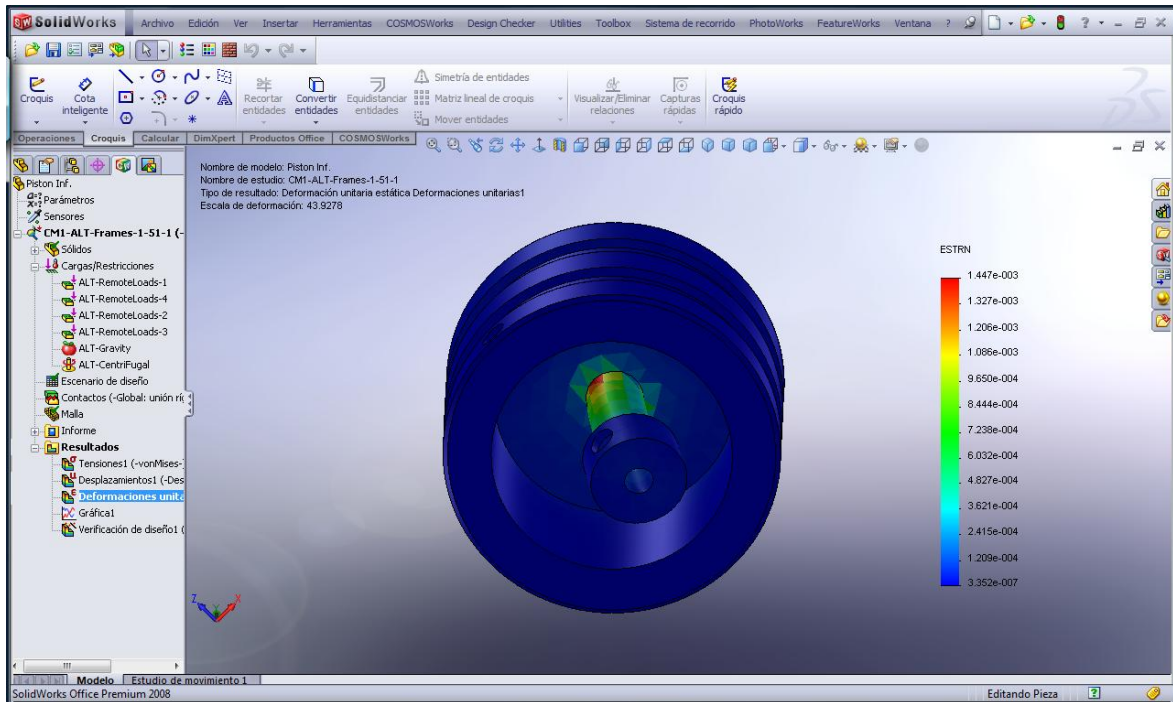


Figura 3.22. Deformaciones unitarias del pistón inf.

Al igual que las tensiones, las deformaciones se presentan en el borde o unión del brazo con la cabeza del pistón inferior, esta se debe a la presión que se ejerce en el cilindro de enfriamiento.

La siguiente tabla muestra los valores de Tensiones, desplazamientos y deformaciones resumidos.

Tabla III.10. Resultados del estudio del pistón inf.

Nombre	Tipo	Mín.	Ubicación	Máx.	Ubicación
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	0.0215467 N/mm ² (MPa) Nodo: 7737	(- 15.3752 mm, 9.60551 mm, 0.188485 mm)	143.922 N/mm ² (MPa) Nodo: 12019	(0 mm, 16.9167 mm, -3 mm)
Desplazamientos1	URES: Desplazamiento resultante	3.14281e- 005 mm Nodo:	(- 5.12738 mm,	0.0841506 mm Nodo: 924	(0 mm, 0 mm, -5 mm)

		2775	21.355 mm, - 0.512866 mm)		
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	3.35185e-007 Elemento: 5511	(- 17.2175 mm, 10.25 mm, 0.427582 mm)	0.00144732 Elemento: 8752	(0.256515 mm, 16.9833 mm, 2.52549 mm)

3.5.2.4. Verificación del diseño del pistón inferior

En el pistón inferior en un inicio se lo diseño con grafito y en su parte interior en su brazo con dura aluminio, el resultado no fue favorable incluso llegando a romperse. Por la dilatación del dura aluminio que provoco la fisura en la falda del pistón.

Ahora se lo deajo con bronce fosfórico, con este material se obtuvo mejores resultados.

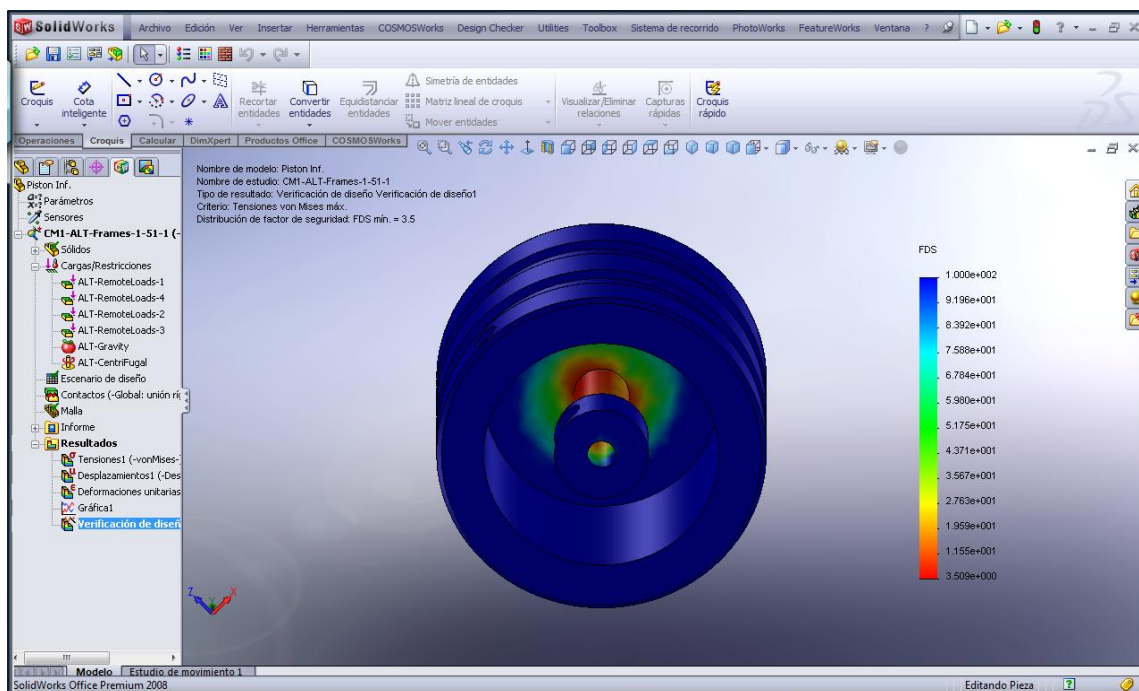


Figura 3.23. Verificación del diseño del pistón 2

Obteniendo un factor de seguridad = 3,5

3.5.3. BRAZO DE BIELA

Descripción.- Análisis mediante el Método de elementos finitos (MEF) del brazo de biela.

El material que se uso para el análisis del brazo de biela es acero de plata de la biblioteca de materiales de CosmosWorks Designer.

Tabla III.11. Propiedades del material del brazo de biela

Nº	Nombre de sólido	Material	Masa	Volumen
1	Brazo de biela	Cast Iron	0.00345308 kg	4.73025e-007 m ³

Nombre de material:	Cast Iron
Descripción:	
Origen del material:	Archivos de biblioteca
Nombre de biblioteca de materiales:	cosmos materials
Tipo de modelo del material:	Isotrópico elástico lineal

Nombre de propiedad	Valor	Unidades	Tipo de valor
Módulo elástico	1.2e+011	N/m ²	Constante
Coefficiente de Poisson	0.31	NA	Constante
Módulo cortante	7.7e+010	N/m ²	Constante
Densidad	7900	kg/m ³	Constante
Límite de tracción	8.617e+008	N/m ²	Constante
Límite elástico	5.5149e+008	N/m ²	Constante
Coefficiente de dilatación térmica	1.1e-005	/Kelvin	Constante
Conductividad térmica	75	W/(m.K)	Constante
Calor específico	450	J/(kg.K)	Constante

Empezamos con las tensiones que va a soportar el brazo de biela.

3.5.3.1. Tensiones von Mises del brazo de biela

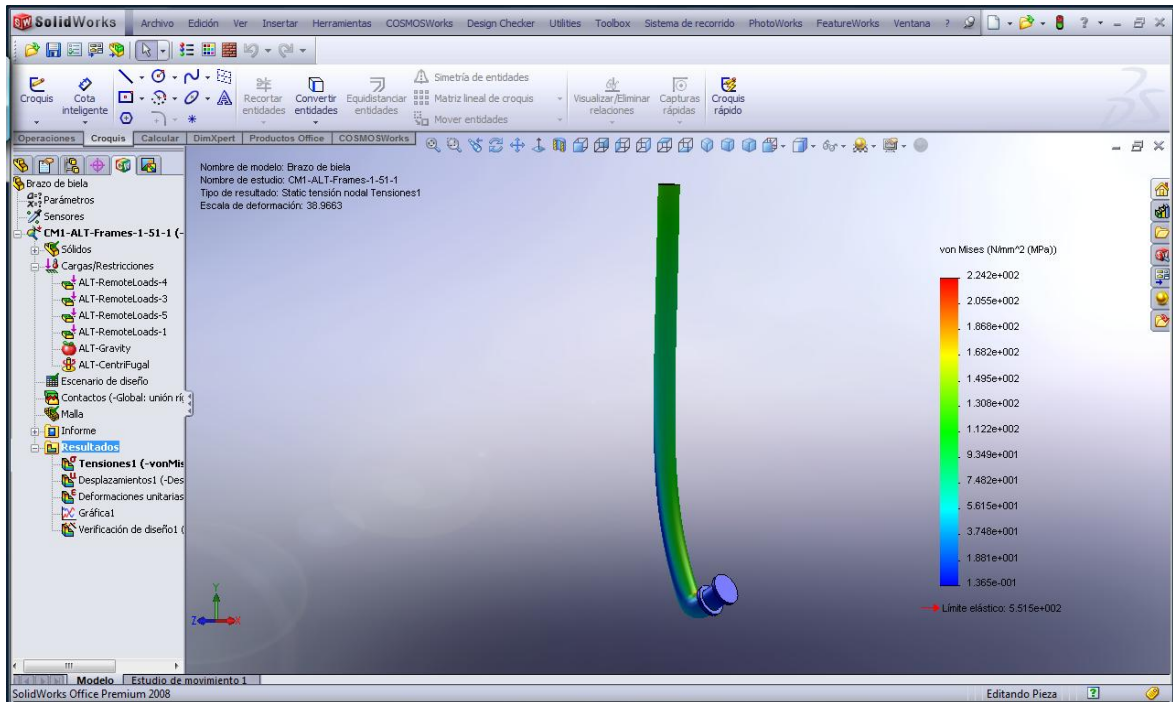
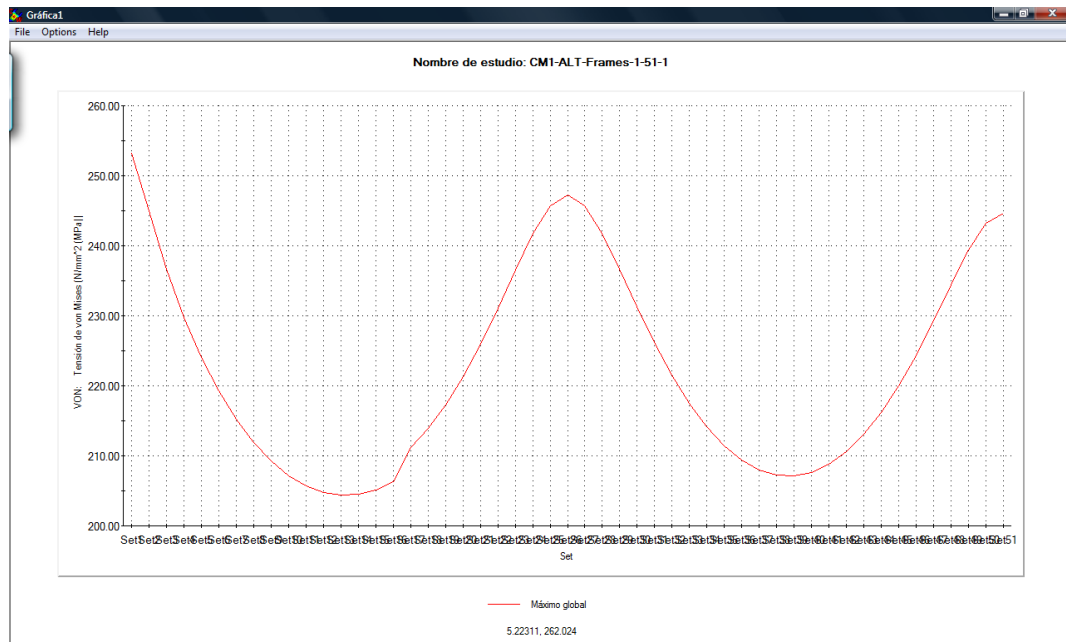


Figura 3.24. Tensiones von Mises del Brazo de biela.

La tensión que soporta el brazo de biela son provenientes del pistón superior de la zona de calentamiento, por lo que se genera tales tensiones al calentarse el aire y expandirse. La tensión máxima que soporta el brazo de biela es 224.185 (MPa).



Grafica 3.3. Tensiones von Mises del Brazo de Biela.

La grafica 3.3 muestra las tensiones con respecto a los escenarios de diseño, se puede describir que la mayor tensión se produce en el instante que la presión del aire en la zona de calentamiento empuja al pistón, recibiendo tal tensión las bielas y cigüeñal.

3.5.3.2. Desplazamiento estático del brazo de biela

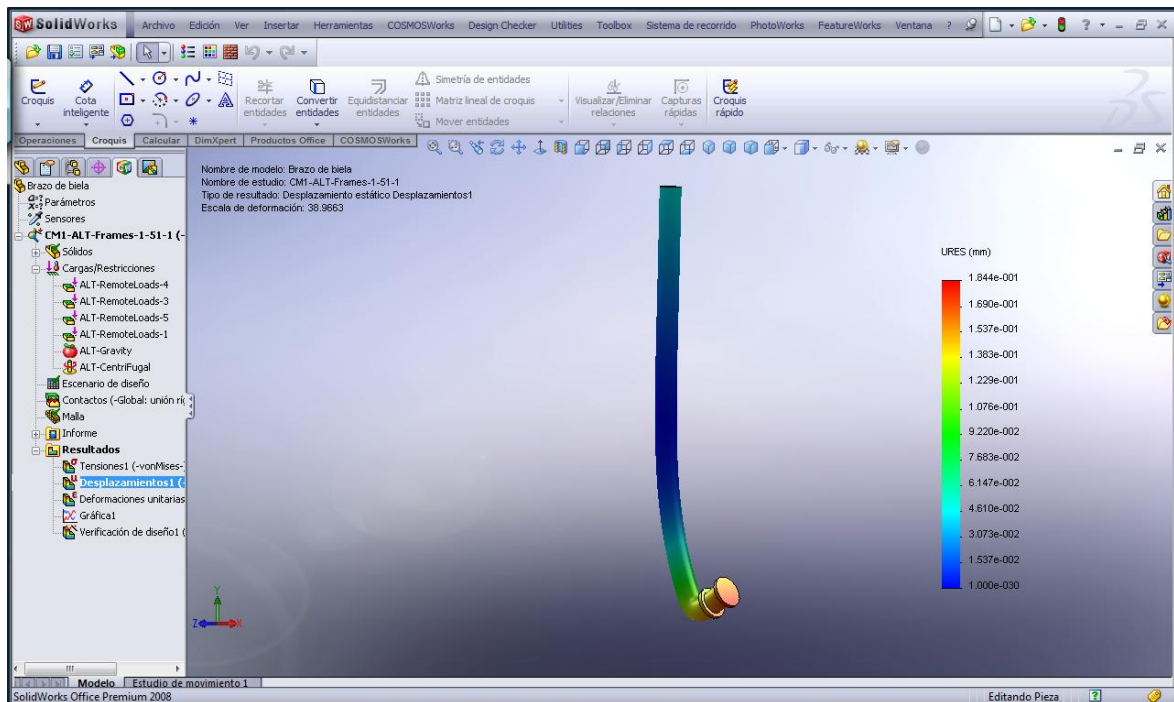


Figura 3.25. Desplazamiento estático del brazo de biela.

Producto de las tensiones el brazo obtiene un desplazamiento máximo de 0.184402 mm.

3.5.3.3. Deformaciones unitarias del brazo de biela

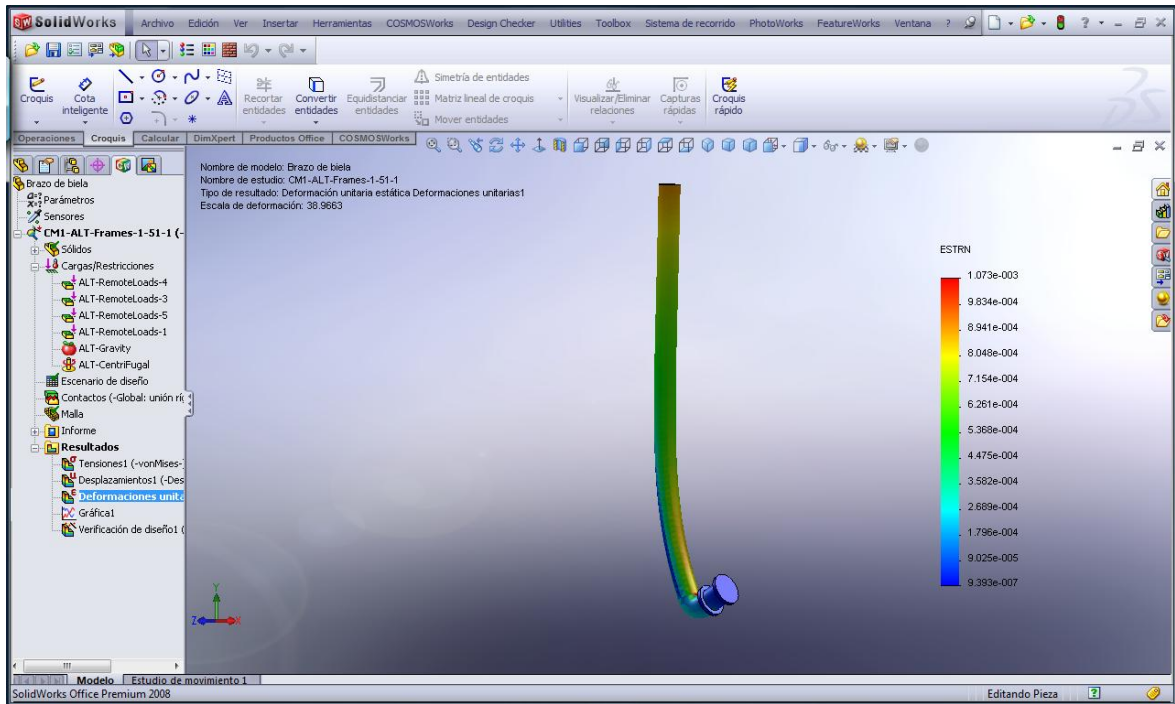


Figura 3.26. Deformaciones unitarias del brazo de biela.

El brazo de biela sufre por la presión del aire en la zona de calentamiento como si fuera una viga que soporta una carga con topes en los extremos.

La siguiente tabla muestra los valores de Tensiones, desplazamientos y deformaciones resumidos.

Tabla III.12. Resultados del estudio del Brazo de biela

Nombre	Tipo	Mín.	Ubicación	Máx.	Ubicación
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	0.136464 N/mm ² (MPa) Nodo: 11488	(6.25 mm, -1.87939 mm, 0.68404 mm)	224.185 N/mm ² (MPa) Nodo: 11824	(1.53806 mm, 1.80866 mm, - 1.83697e- 016 mm)
Desplazamientos1	URES: Desplazamiento resultante	0 mm Nodo: 1618	(0.709045 mm, 27.0206	0.184402 mm Nodo: 70	(6.5 mm, -2 mm, 2.44929e-

			mm, 0.561136 mm)		016 mm)
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	9.39297e-007 Elemento: 6732	(6.125 mm, -1.82068 mm, 0.343075 mm)	0.00107269 Elemento: 1804	(1.45014 mm, 1.67807 mm, 0.203513 mm)

3.5.3.4. Verificación del diseño del brazo de biela

En cuanto al brazo de biela no se encontró mayor problema y se mantuvo el diseño.

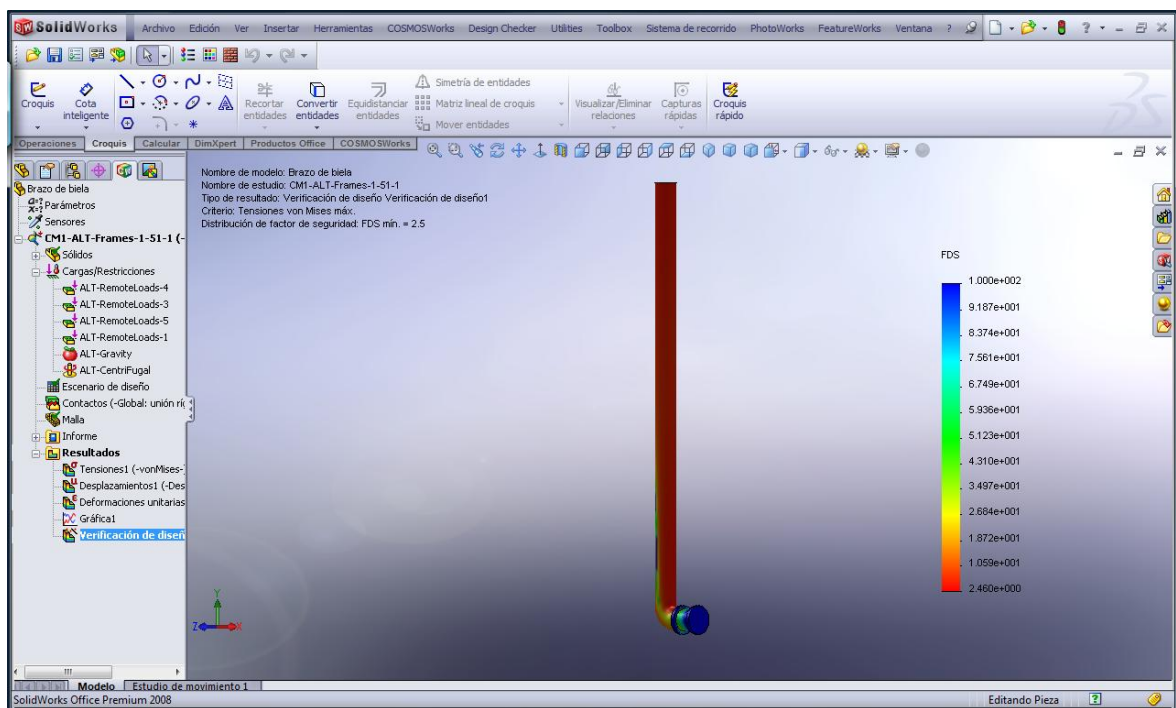


Figura 3.27. Verificación del diseño del brazo de biela

Obteniendo un factor de seguridad = 2,5

3.5.4. BIELA DEL PISTÓN SUPERIOR

Descripción.- Análisis mediante el Método de elementos finitos (MEF) de la Biela del Pistón superior.

El material que se uso para el análisis de la Biela del Pistón superior es dura aluminio de la biblioteca de materiales de CosmosWorks Designer.

Tabla III.13. Propiedades del material de la biela del pistón superior

Nº	Nombre de sólido	Material	Masa	Volumen
1	Biela Piston 1	7075-T6, Plate (SS)	0.00207686 kg	7.39095e-007 m ³

Nombre de material:	7075-T6, Plate (SS)
Descripción:	
Origen del material:	Archivos de biblioteca
Nombre de biblioteca de materiales:	cosmos materials
Tipo de modelo del material:	Isotrópico elástico lineal

Nombre de propiedad	Valor	Unidades	Tipo de valor
Módulo elástico	7.2e+010	N/m ²	Constante
Coefficiente de Poisson	0.33	NA	Constante
Módulo cortante	2.69e+010	N/m ²	Constante
Densidad	2810	kg/m ³	Constante
Límite de tracción	5.7e+008	N/m ²	Constante
Límite elástico	5.05e+008	N/m ²	Constante
Coefficiente de dilatación térmica	2.4e-005	/Kelvin	Constante
Conductividad térmica	130	W/(m.K)	Constante
Calor específico	960	J/(kg.K)	Constante
Factor de endurecimiento (0.0-1.0; 0.0=isotrópico; 1.0=cinemático)	0.85	NA	Constante

Empezamos con las tensiones que va a soportar la biela del pistón superior.

3.5.4.1. Tensiones von Mises de la biela del pistón superior

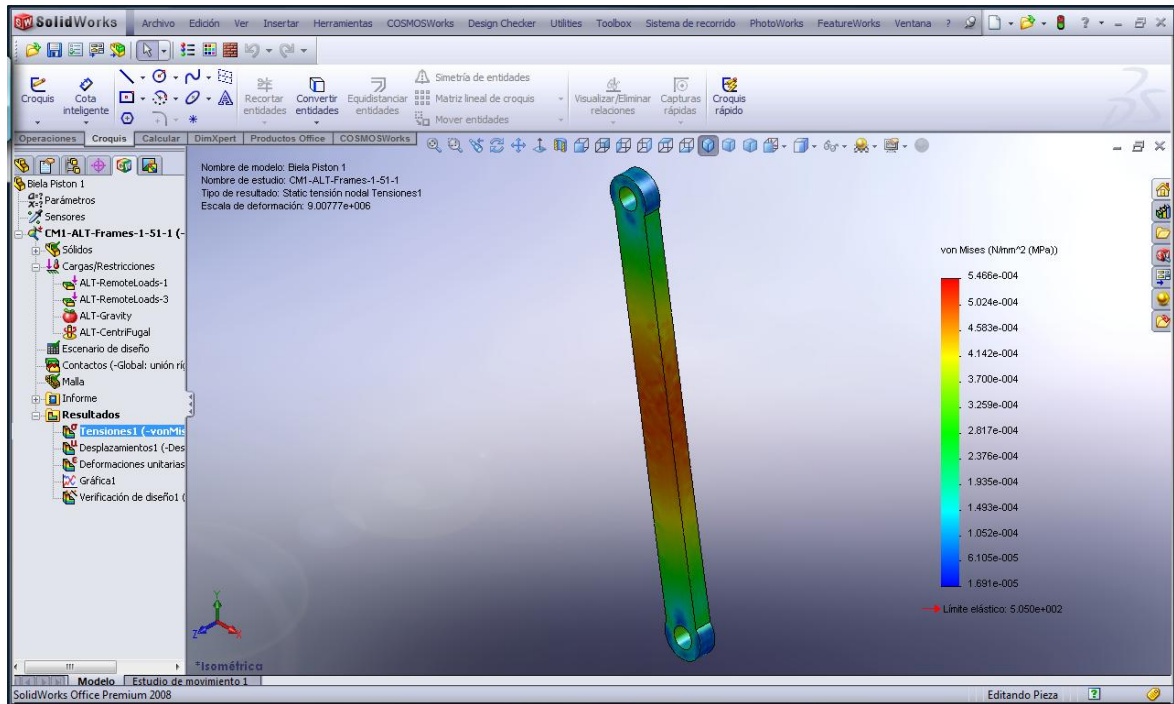
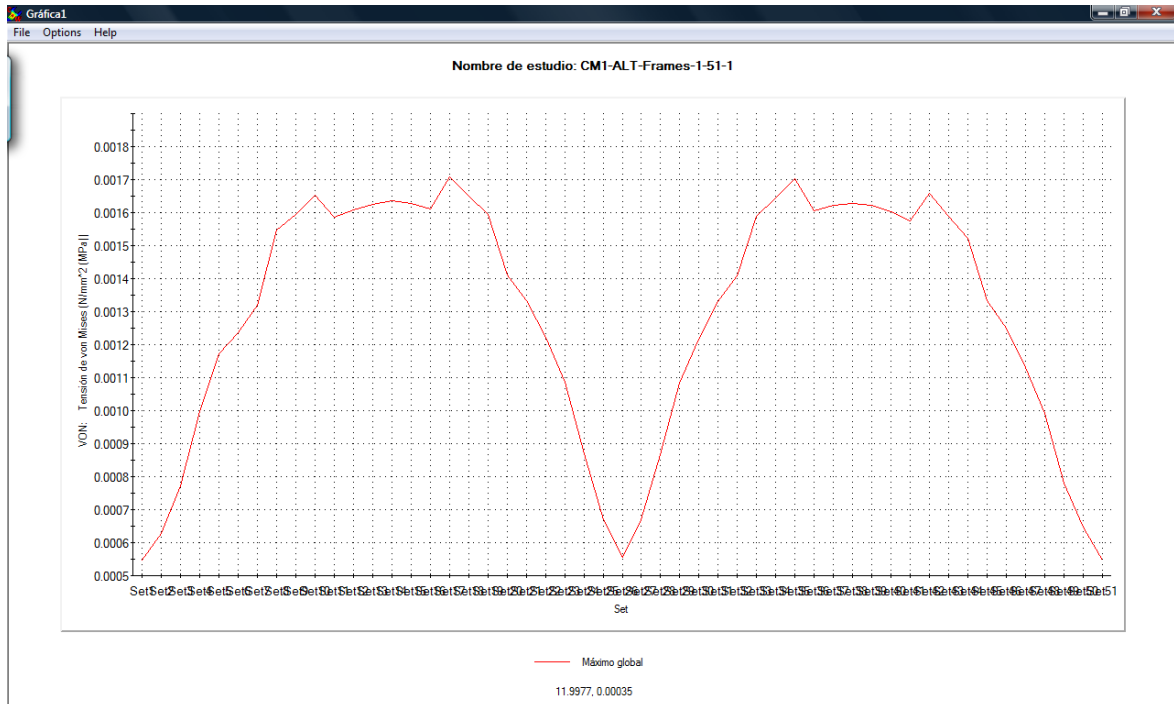


Figura 3.28. Tensiones von Mises de la biela del pistón 1.

La tensión que soporta la biela del pistón 1 proviene del pistón superior y del brazo de biela.



Gráfica 3.4. Tensiones von Mises de la biela del pistón 1.

La grafica 3.4 muestra las tensiones con respecto a los escenarios de diseño, la tensión que se ejerce en la biela del pistón superior es transmitida al cigüeñal y este en movimiento.

3.5.4.2. Desplazamiento estático de la biela del pistón superior

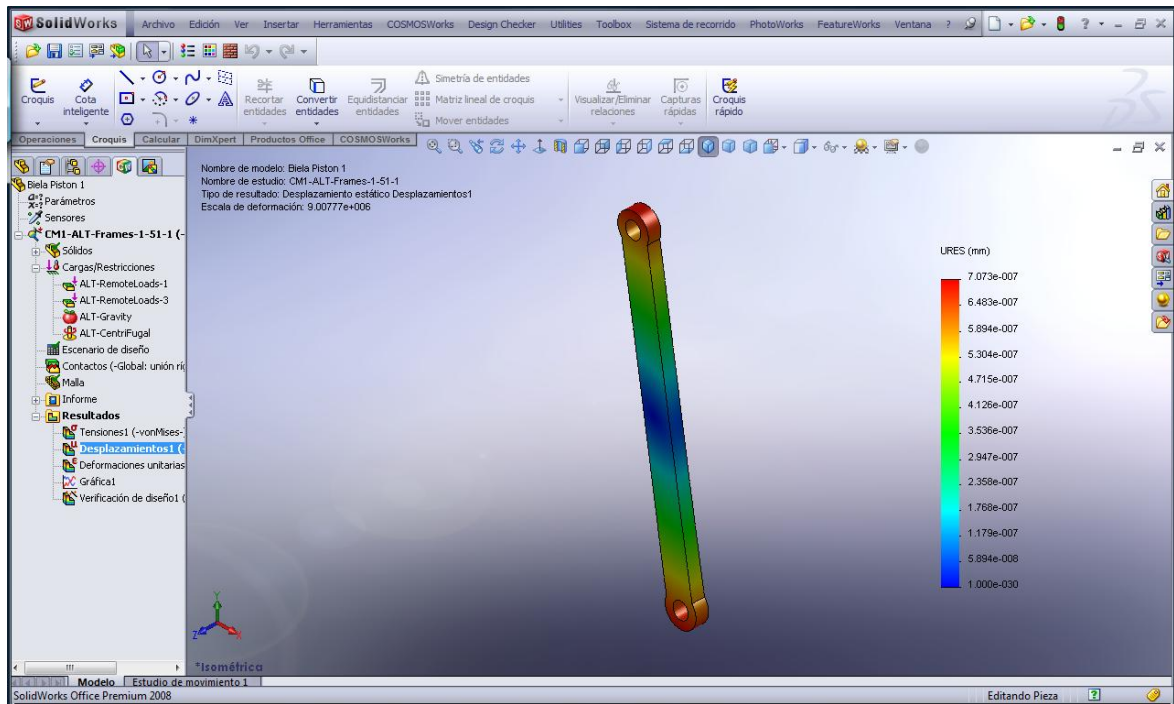


Figura 3.29. Desplazamiento estático de la biela del pistón 1.

Por el tamaño del motor Stirling la biela presenta desplazamientos tanto en la cabeza y pie de biela.

3.5.4.3. Deformaciones unitarias de la biela del pistón superior

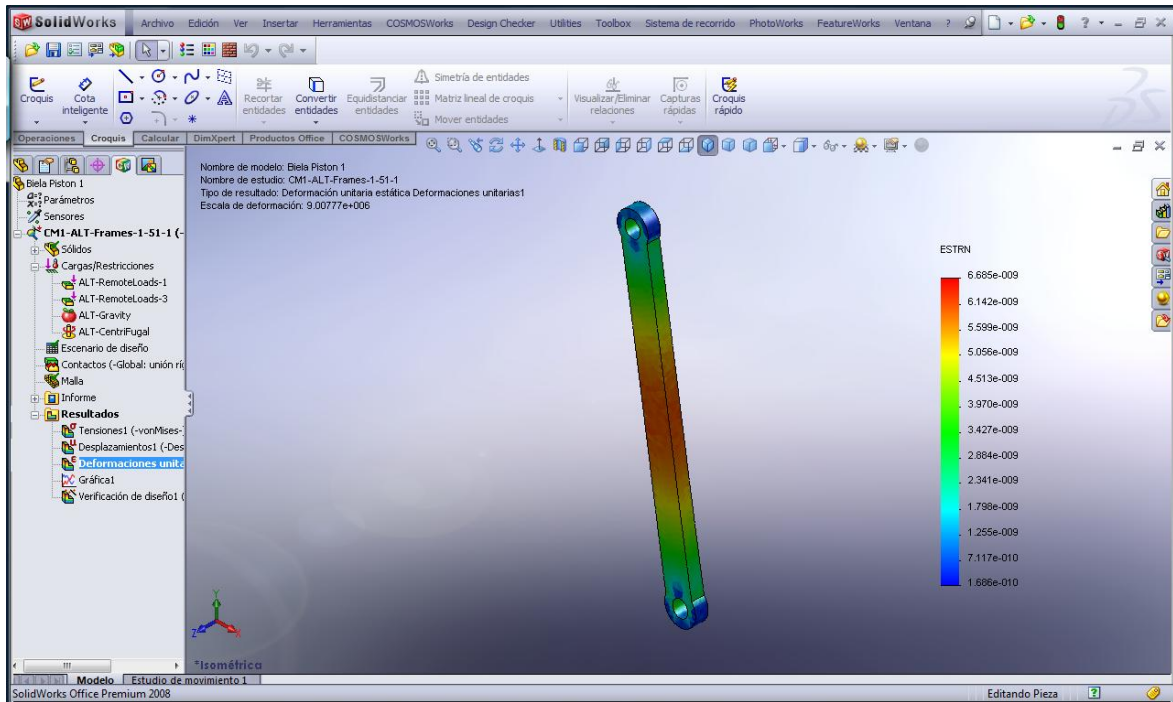


Figura 3.30. Deformaciones unitarias de la biela del pistón 1.

De acuerdo al análisis la biela se deformaría en la parte intermedia cuyo valor es $6.68533e-006$ mm.

La siguiente tabla muestra los valores de Tensiones, desplazamientos y deformaciones resumidos.

Tabla III.14. Resultados del estudio de la biela del pistón 1.

Nombre	Tipo	Mín.	Ubicación	Máx.	Ubicación
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	16.9121 N/m ² Nodo: 7654	(- 0.250603 mm, 49.8391 mm, - 0.840626 mm)	546.574 N/m ² Nodo: 8798	(-2.5 mm, 26.8001 mm, -1.25 mm)
Desplazamientos1	URES: Desplazamiento resultante	0 m Nodo: 1770	(- 0.409781 mm, 24.4977	7.07254e- 010 m Nodo: 12708	(- 0.403117 mm, -6.76884

			mm, - 0.412929 mm)		mm, 1.25 mm)
Deformaciones unitarias I	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	1.68643e-010 Elemento: 7106	(2.59858 mm, 52.7672 mm, -0.77177 mm)	6.68533e-009 Elemento: 97	(0.260052 mm, 22.9486 mm, 0.217574 mm)

3.5.4.4. Verificación del diseño de la biela del pistón superior

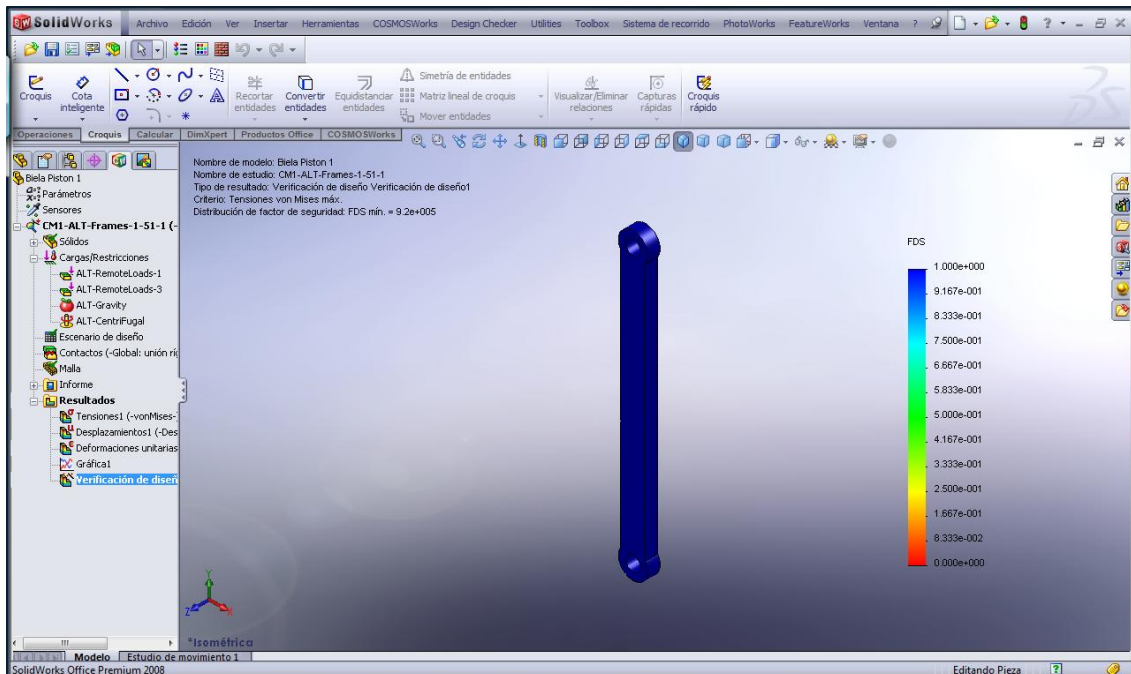


Figura 3.31. Verificación del diseño de la biela del pistón 1

Nuestro primer paso fue el de buscar materiales más eficientes, como un ejemplo en un inicio las bielas de los pistones fueron diseñadas con bronce fosfórico, obteniendo resultados no favorables, lo que nos da una idea, si usamos dicho material las bielas se deformarían con mucha facilidad al no soportar las cargas que se generan.

Posteriormente se uso dura aluminio obteniendo mejores resultados y a la vez es un material que se puede trabajar y encontrar en el mercado.

Obteniendo un factor de seguridad = 9,2

3.5.5. BIELA DEL PISTÓN INFERIOR

Descripción.- Análisis mediante el Método de elementos finitos (MEF) de la Biela del Pistón inferior.

El material que se uso para el análisis de la Biela del Pistón inferior es dura aluminio de la biblioteca de materiales de CosmosWorks Designer.

Tabla III.15. Propiedades del material de la biela del pistón inferior

Nº	Nombre de sólido	Material	Masa	Volumen
1	Biela Piston 1	7075-T6, Plate (SS)	0.00207686 kg	7.39095e-007 m ³

Nombre de material:	7075-T6, Plate (SS)
Descripción:	
Origen del material:	Archivos de biblioteca
Nombre de biblioteca de materiales:	cosmos materials
Tipo de modelo del material:	Isotrópico elástico lineal

Nombre de propiedad	Valor	Unidades	Tipo de valor
Módulo elástico	7.2e+010	N/m ²	Constante
Coefficiente de Poisson	0.33	NA	Constante
Módulo cortante	2.69e+010	N/m ²	Constante
Densidad	2810	kg/m ³	Constante
Límite de tracción	5.7e+008	N/m ²	Constante
Límite elástico	5.05e+008	N/m ²	Constante
Coefficiente de dilatación térmica	2.4e-005	/Kelvin	Constante
Conductividad térmica	130	W/(m.K)	Constante
Calor específico	960	J/(kg.K)	Constante
Factor de endurecimiento (0.0-1.0; 0.0=isotrópico; 1.0=cinemático)	0.85	NA	Constante

Empezamos con las tensiones que va a soportar la biela del pistón inferior.

3.5.5.1. Tensiones von Mises de la biela del pistón inferior

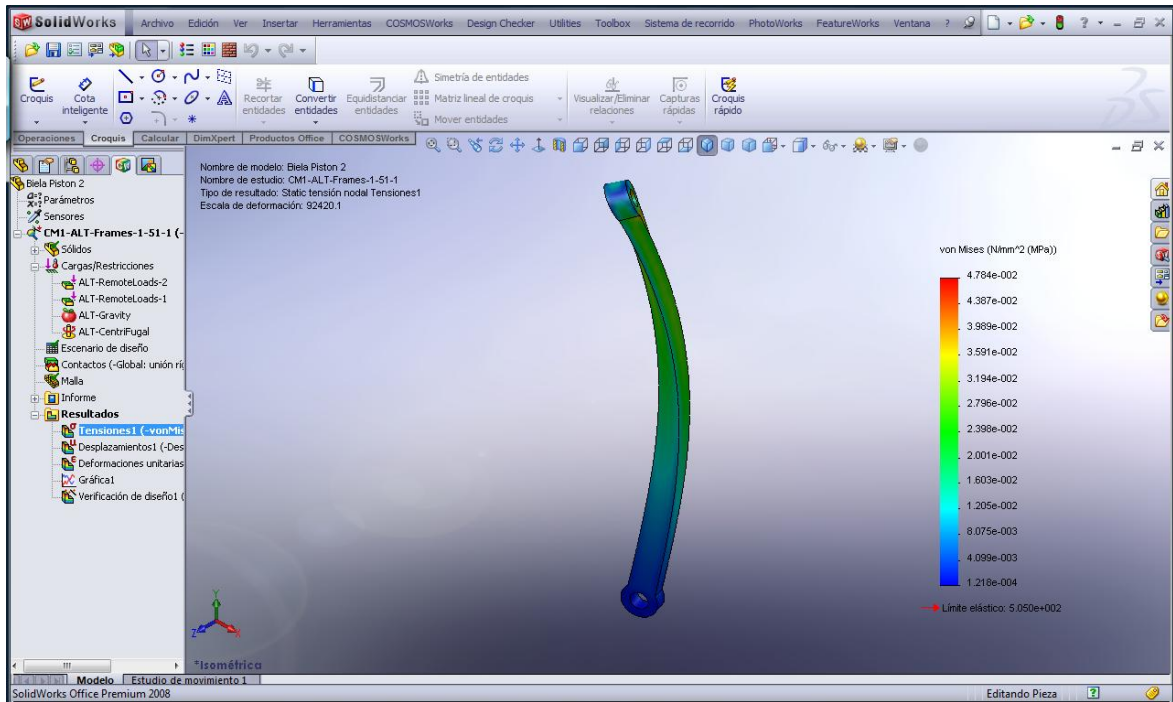
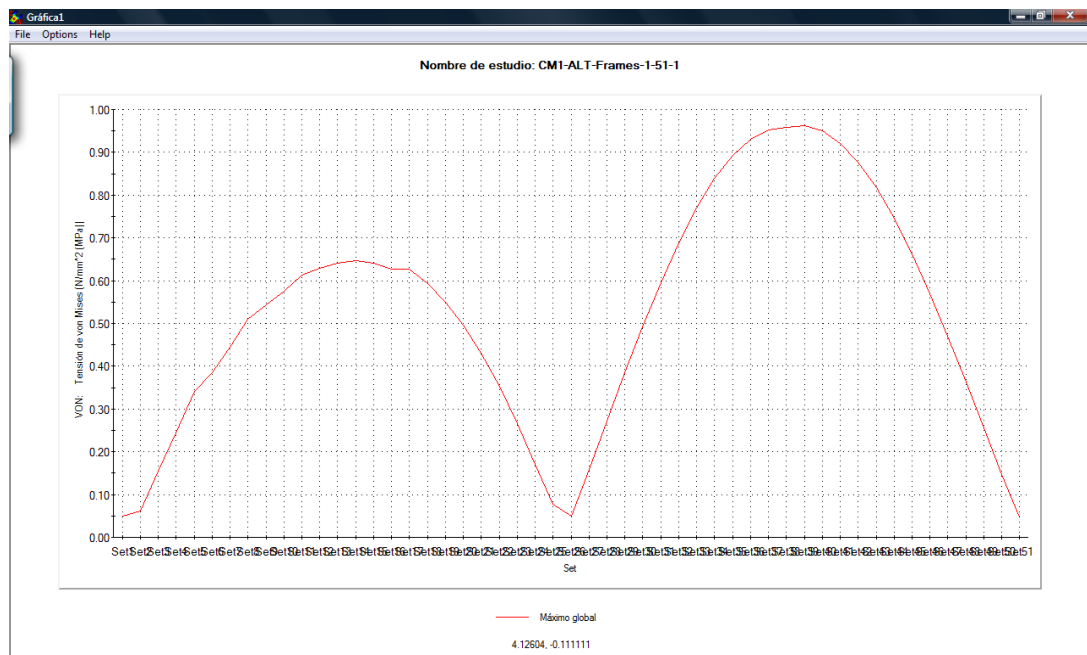


Figura 3.32. Tensiones von Mises de la biela del pistón 2.

Las tensiones que soporta la biela del pistón 2 provienen del pistón superior y del pistón inferior. Lo cual disminuye el volumen en la cámara de enfriamiento y esta genera una gran presión.



Grafica 3.5. Tensiones von Mises de la biela del pistón 2.

La grafica 3.5 muestra las tensiones con respecto a los escenarios de diseño, las tensiones se muestran con respecto al movimiento del pistón inferior y muestra que en la compresión del cilindro de enfriamiento se producen más fuerzas.

3.5.5.2. Desplazamiento estático de la biela del pistón inferior

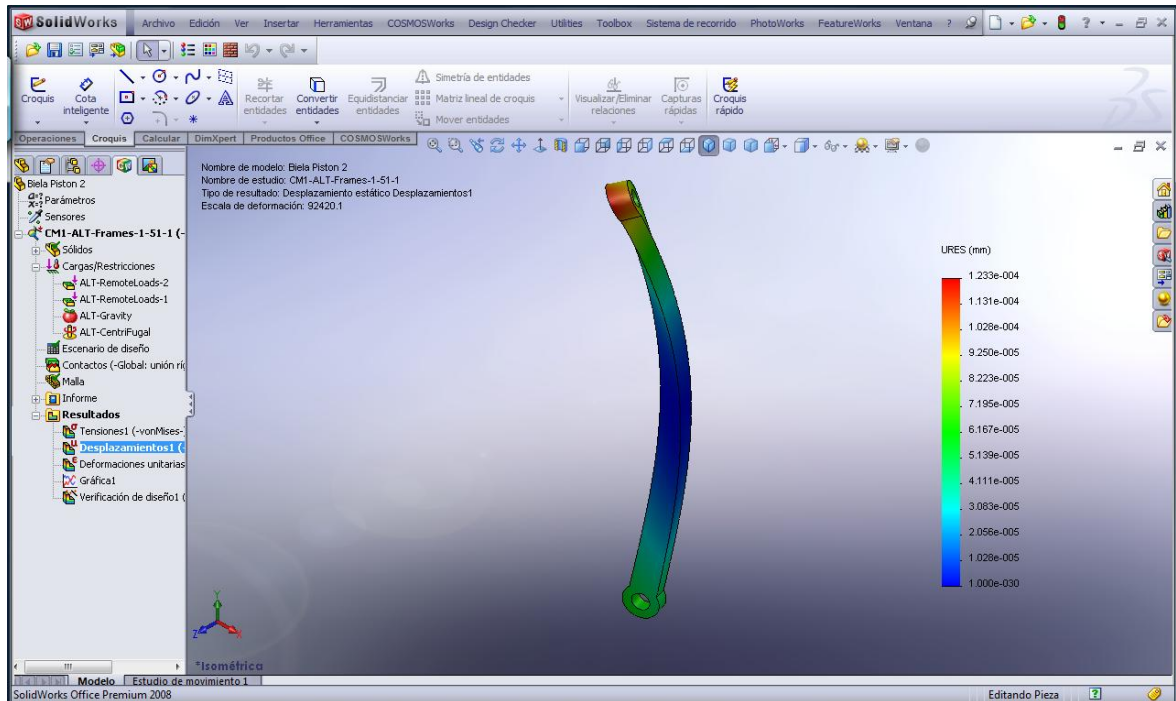


Figura 3.33. Desplazamiento estático de la biela del pistón 2.

Se genera un desplazamiento mayor con respecto a toda la biela en la cabeza de la misma porque a través de un bulón se une al pistón inferior.

3.5.5.3. Deformaciones unitarias de la biela del pistón inferior

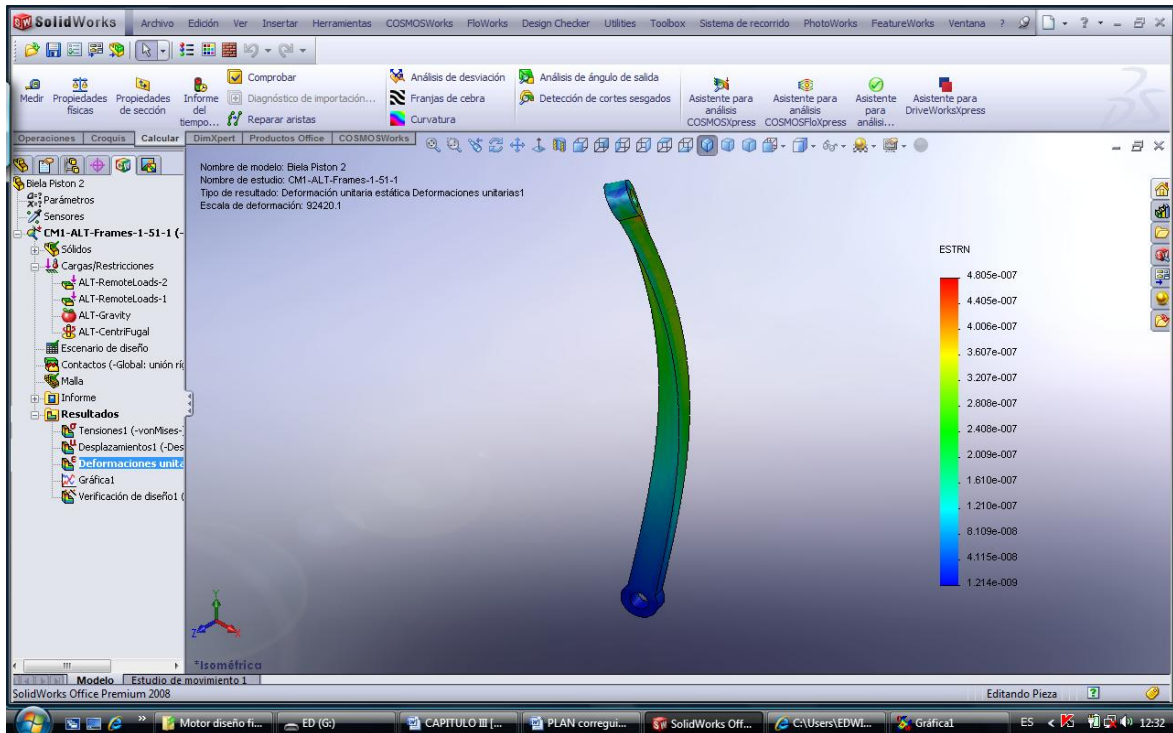


Figura 3.34. Deformaciones unitarias biela del pistón 2.

De acuerdo al análisis la biela se deformaría en la parte intermedia $4.80479e-004$ mm.

La siguiente tabla muestra los valores de Tensiones, desplazamientos y deformaciones resumidos.

Tabla III.16. Resultados del estudio de la biela del pistón 2.

Nombre	Tipo	Mín.	Ubicación	Máx.	Ubicación
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	121.77 N/m ² Nodo: 14597	(-1.8285 mm, -5.91399 mm, -0.963629 mm)	47842.6 N/m ² Nodo: 473	(0.7 mm, 71.586 mm, 1.25 mm)
Desplazamientos1	URES: Desplazamiento resultante	0 m Nodo: 1705	(1.13828 mm, 34.9773 mm,	1.2334e- 007 m Nodo: 14384	(2.63209 mm, 75.7016 mm,

			-0.63256 mm)		1.25 mm)
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	1.21398e-009 Elemento: 8788	(0.265434 mm, -5.92824 mm, 0.71086 mm)	4.80479e-007 Elemento: 6720	(0.297461 mm, 71.2361 mm, 1.09576 mm)

3.5.5.4. Verificación del diseño de la biela del pistón inferior

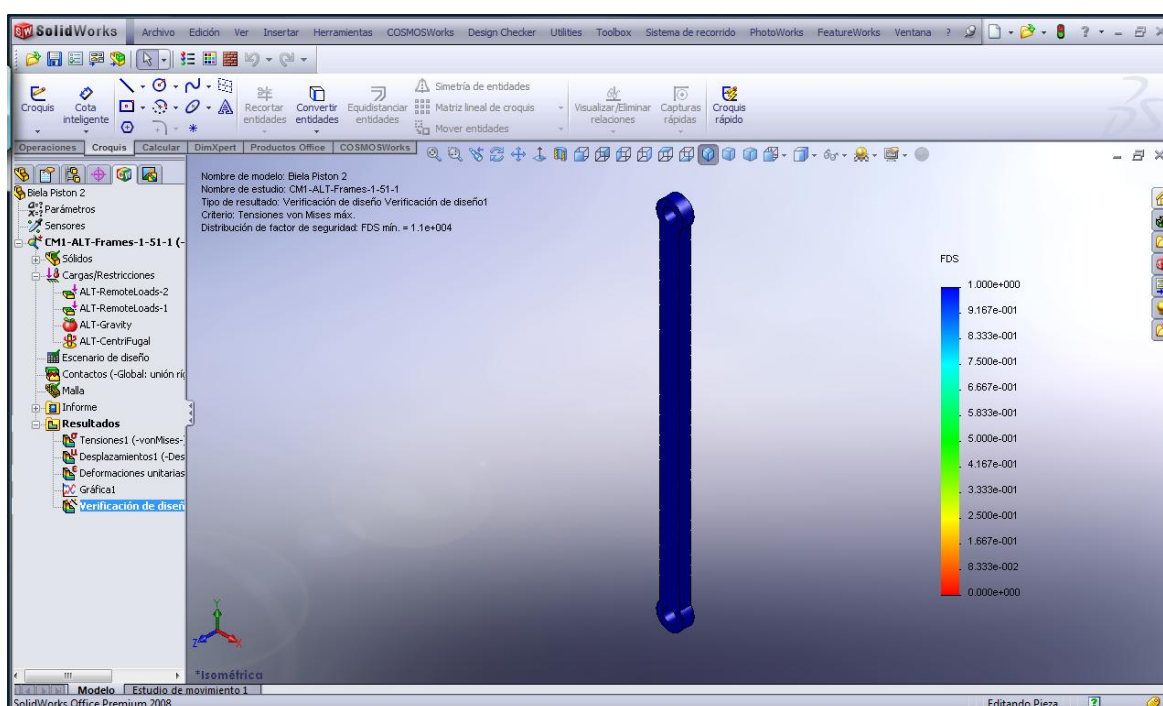


Figura 3.35. Verificación del diseño de la biela del pistón 2

La biela del pistón al igual que la biela del pistón 1 es de dura aluminio, obteniendo un factor de seguridad = 1,1e+004

CAPÍTULO IV

4. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE LOS COMPONENTES

INTRODUCCIÓN

En la construcción se dará forma a los materiales que se encuentran en forma rústica maquinándolos, puliéndolos, torneándolos, etc. Este proceso se lleva a cabo con mucha delicadeza en cada detalle ya que requiere de extraordinaria precisión y así evitemos fugas en el sistema cerrado del motor Stirling solar.

Para la construcción de los pistones, bielas, cilindros y cigüeñal, se utilizara tornos CNC con tecnología CAD/CAM, que nos garantiza un trabajo eficiente de calidad y con perfectos acabados.

4.1.PLANOS CONSTRUCTIVOS

Los planos constructivos se muestran en la parte de anexos.

4.2.CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL CONCENTRADOR SOLAR

SOLAR



Figura 4.1. Construcción del molde

Luego de la realización de los cálculos empezamos con la construcción de la parábola, con tubos cuadrados de acero de 3 pulgadas, damos forma de circunferencia con un diámetro de 15000 mm, con una profundidad de 312 mm y reforzamos con tiras de tubo para evitar que se deforme.



Figura 4.2. Planchas de tol para el molde

Una vez terminado de soldar los tubos, cortamos la plancha de tol como se muestra en la figura (13 pedazos iguales), pulimos todas las asperezas dejadas por los puntos de soldadura para de esta manera dejarla completamente lisa para masillar.



Figura 4.3. Preparación del molde

Lijado todas las imperfecciones del molde lo ponemos sobre una mesa y en un lugar donde no tengamos contacto directo con el viento y sol, ponemos masilla de poro cerrado y con una espátula ponemos al molde lo mas liso posible para evitar un lijado excesivo.



Figura 4.4. Molde del concentrador

Esperamos que seque la masilla 48 horas para que esta no se remueva, con una lija 140, lijamos todo el contorno de la misma y la dejamos lista para el siguiente tratamiento.



Figura 4.5. Concentrador en fibra de vidrio

Esperamos 15 horas, con la mano podemos sentir una superficie lisa y delicada, ponemos gealco en toda la parábola y posteriormente aplicamos la fibra de vidrio luego de lo cual debemos esperar nuevamente 48 horas de secado.



Figura 4.6. Anillo para soporte del concentrador

Transcurrido este lapso de tiempo ponemos un anillo de acero en el contorno de la parábola y procedemos a taparlo con masilla de poro abierto tanto el anillo como cualquier imperfección de la fibra de vidrio, esperamos que seque la masilla aproximadamente 24 horas.



Figura 4.7. Retoque del anillo soporte del concentrador

Secada la masilla de poro abierto lijamos con una lija 90 los desperfectos del contorno de la parábola.



Figura 4.8. Retoque de la superficie interna

Hemos trabajado toda la parte externa de la parábola ahora vamos a dar un retoque a la superficie interna de la parábola, colocamos masilla de poro abierto para corregir porosidades, luego del secado lijamos el exceso de masilla y la dejamos listo para el pintado.



Figura 4.9. Secado de la pintura

Por último ponemos fondo de pintura esto debe ser realizado en un día alejado de humedad y de excesivo viento, dejando de esta manera lista la parábola para nuestra tesis.

4.3. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE LOS COMPONENTES MECÁNICOS

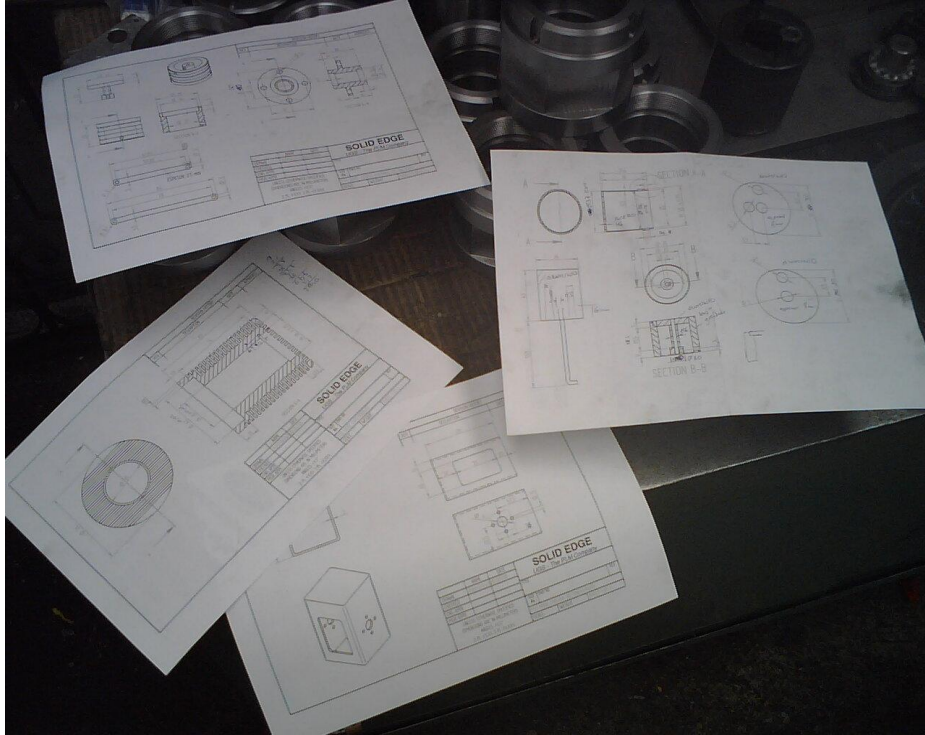


Figura 4.10. Planos del motor

Luego de los análisis en Solidworks tenemos los planos para construir el motor Stirling, lo que primero hacemos es imprimir las hojas de cada una de las partes y ver que todas las cotas estén completas para poder ir al torno.



Figura 4.11. Maquinado del acero ST37

La carcasa del motor Stirling es de acero ST 37, con una abertura que nos permitirá mirar cómo se mueven el cigüeñal y las bielas.

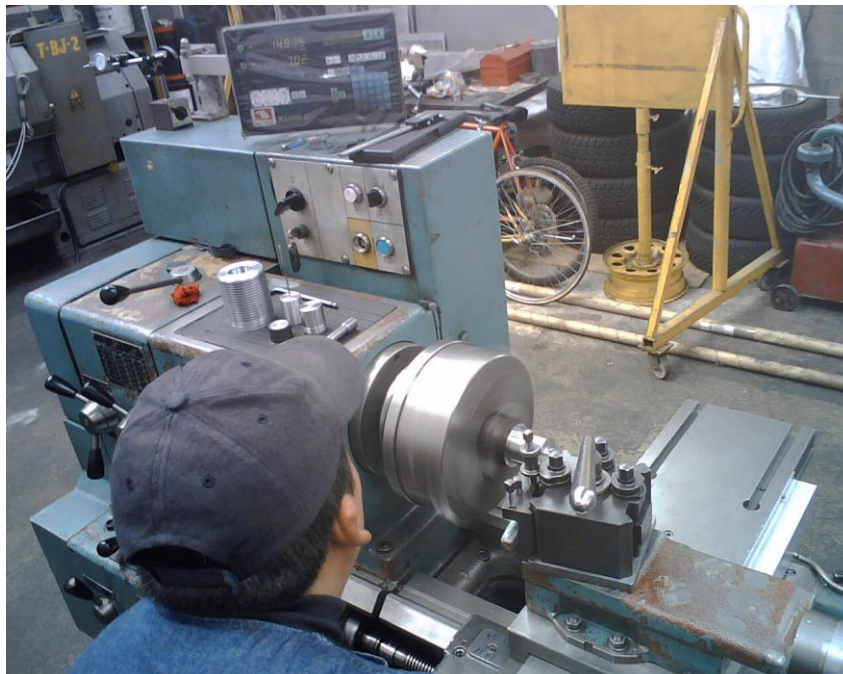


Figura 4.12. Maquinado del acero bonificado SAE 412

Con el acero bonificado construimos el cilindro de calor el cual nos permitirá transmitir la energía necesaria para que de inicio de movimiento a nuestro motor.

Escogimos este material por la resistencia al calor sin perder su límite elástico ni su dureza.



Figura 4.13. Maquinado del bronce fosforito

El motor consta de dos pistones uno de ellos es hecho de bronce fosfórico este material nos permitirá trabajar a altas velocidades y presiones que es lo que tendremos dentro del motor cuando este, esté en funcionamiento y generando más de 500 revoluciones por minuto.



Figura 4.14. Maquinado de acero de plata

El acero de plata esta destinado a la construcción de la biela superior un material que nos permitirá una excelente resistencia al corte, alta resistencia al desgaste y buena tenacidad.



Figura 4.15. Pulido de block

En el dura aluminio realizaremos el block donde se alojara los dos pistones y sobre este el cilindro de calor, es un material muy resistente pero a la vez liviano, capaz de recibir altas temperaturas y un fácil enfriamiento con el viento.



Figura 4.16. Piezas de armado

Sobre el escritorio tenemos 2 bielas, un block, un brazo de biela, la carcasa del motor, el cigüeñal, el cilindro de calor, el pasador del cigüeñal, el pasador del pistón, el rodamiento y el volante. Hacer todas estas piezas nos han llevado aproximadamente 320 horas por la complejidad de cada elemento, muchas de las piezas se han elaborado más de una vez por la complejidad en la fabricación.

4.4.CONSTRUCCIÓN DE LA BASE DEL CONCENTRADOR SOLAR.



Figura 4.17. Armado de la base del concentrador

Realizamos los planos en solidworks, y comenzamos la construcción de la base del concentrador necesitamos tubo estructural de una pulgada por 3mm de ancho para que resista el proceso de soldado.



Figura 4.18. Base del concentrador

Cuando terminamos de soldar la estructura el siguiente paso a realizar es dar una mano de pintura de color verde, en un lugar donde no llegue de forma directa el sol ni el viento para evitar impurezas en el pintado.



Figura 4.19. Pulido de imperfecciones

Cuando haya secado el pintado vemos las primeras imperfecciones de nuestra base las cuales deben ser corregidas con una amoladora teniendo mucho cuidado de no lastimarnos y utilizando protección visual para la viruta que va a generar dicho trabajo.



Figura 4.20. Limpieza de la base del concentrador

Pulidas las imperfecciones con un cepillo de alambre limpiamos cada una de las bases de la estructura para que estén aptas para la colocación de ruedas que nos facilitaran el transporte de la misma.



Figura 4.21. Colocación de ruedas

Colocamos una rueda en cada lado de la estructura y probamos su perfecto funcionamiento las cuales nos ayudaran de mucho para la localización del foco cuando este en funcionamiento el motor Stirling.



Figura 4.22. Comprobación de medidas de la base

Pintada la estructura, puesto las ruedas para su movilización montamos la parábola y la sujetamos con dos chumaceras las mismas que son empernadas para evitar cualquier deslizamiento no requerido en la parábola.



Figura 4.23. Concentrador solar Armado

4.5.ENSAMBLAJE TOTAL DEL MOTOR STIRLING SOLAR



Figura 4.24. Ensamblaje de pistones

Con todas las piezas terminadas el siguiente paso es comenzar su armado, para ello a cada uno de los fragmentos los limpiamos para evitar que alguna viruta no nos deje trabajar correctamente.



Figura 4.25. Ensamble de cigüeñal

Con los pistones ajustados ahora nos toca instalar el cigüeñal atravesamos el pasador por la carcasa seguido del cigüeñal, y con mucho cuidado las bielas y estas a su vez sujetadas a los pistones.

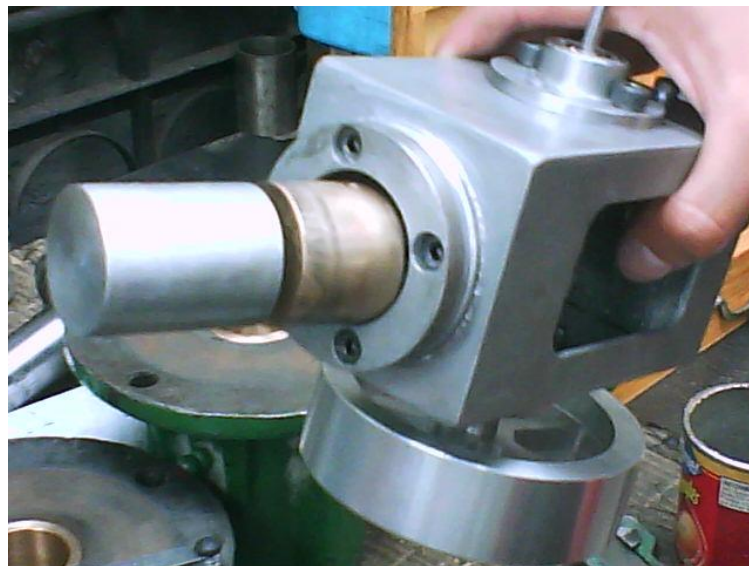


Figura 4.26. Ensamble del volante

Ajustado los pistones y cigüeñal proseguimos con el rodamiento el cual sujetamos a la carcasa del motor ayudado de 3 pernos para evitar que este se

mueva, cuando el motor este funcionando, y colocamos el pasador por el centro del rodamiento e instalamos el volante como muestra la figura.



Figura 4.27. Ensamble del cilindro de calor

Sujetamos el motor sobre un banco fijo para poder instalar el cilindro de calor sobre los pistones, pero antes de instalar dicho elemento regamos aceite 3 en 1, desde la parte superior para lubricar todos los elementos y con la ayuda de la mano hacemos girar el volante para que el aceite se disperse uniformemente, concluida esta operación enroscamos el cilindro de calor como muestra la figura.



Figura 4.28. Revisión del apriete

Con el motor armado y listo para ser probado con la energía solar queremos evitar errores, por cuanto procedemos a revisar que cada una de las partes estén correctamente ajustadas.



Figura 4.29. Motor terminado

Lubricamos el cigüeñal y las bielas para evitar fricción haciéndolos rodar con la ayuda del volante y tenemos listo el motor para realizar las pruebas.

CAPÍTULO V

5. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

INTRODUCCIÓN

El motor Stirling a través del calentamiento del aire debe desplazar por expansión el pistón de la zona de calentamiento del PMS al PMI y este al cigüeñal, que por inercia gira y mueve al pistón de la zona de enfriamiento para que desarrolle el ciclo Stirling.

Se analizará el ciclo a través de la radiación solar y las temperaturas que se generan en las zonas de calentamiento y enfriamiento. Así como la velocidad producto de la eficiencia del motor.

5.1.CALIBRACIÓN Y PUESTA A PUNTO DE LOS COMPONENTES DEL MOTOR STIRLING SOLAR

5.1.1. MOTOR

El motor Stirling va a transformar la energía calorífica en movimiento, este movimiento que en un principio es longitudinal se convertirá en rotacional. El movimiento de una pieza metálica con otra produce un fenómeno conocido como fricción, que si no es contrarrestado va a desgastar las piezas, el ciclo Stirling es eficiente siempre que haya diferencias de temperaturas y se mantenga en un sistema cerrado.

Al desgastarse las piezas por fricción generará fugas de presión en el sistema cerrado por lo cual se debe lubricar todos los elementos mecánicos que se encuentran en movimiento como: pistones, bielas y pasadores, cigüeñal y cilindros, para lo cual se va a usar aceite de marca singer.

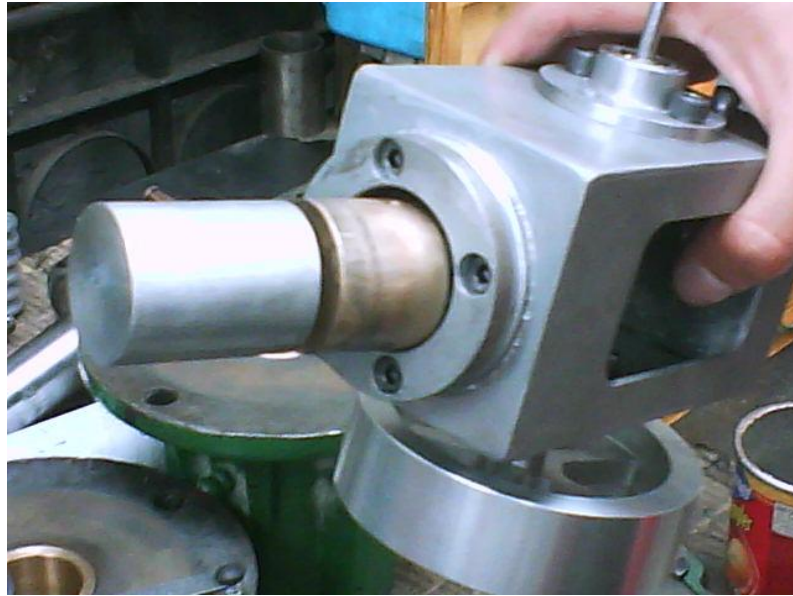


Figura 5.1. Lubricación al Motor Stirling

Una vez lubricado el motor está listo para funcionar.



Figura 5.2. Motor totalmente lubricado

Nota: El sentido de giro del motor es horario.

5.1.2. SISTEMA DE CAPTACIÓN SOLAR

Una vez armado el mecanismo del concentrador para el seguimiento del sol se debe comprobar que el concentrador se puede inclinar en varias posiciones con respecto al sol.



Figura 5.3. Comprobación del mecanismo

Realizado la puesta a punto del motor y demás mecanismos está listo el motor Stirling solar para funcionar.

5.2.PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR STIRLING SOLAR.

5.2.1. MOTOR

Para comprobar si el motor funciona correctamente se lo prueba calentando al motor con la suelda oxiacetilénica.



Figura 5.4. Prueba del Motor

Tras el calentamiento del motor Stirling se le da un impulso para que supere la presión que se genera al interior.

El sentido de movimiento es horario por diseño, en el sentido anti horario no puede superar la presión interna y no gira.



Figura 5.5. Funcionamiento del motor

5.2.2. CONCENTRADOR

Se deben tomar muchas precauciones al momento de manipular el concentrador por lo que este puede fácilmente alcanzar los 600 °C a pleno sol y puede ocasionar quemaduras de segundo y hasta tercer grado, por lo cual se deben usar guantes de cuero y gafas de soldador.



Figura 5.6. Gafas

Se pueden usar este tipo de gafas pero se recomienda la de soldador.



Figura 5.7. Guantes de Cuero

Además de usar este equipo, se debe colocar protector solar para la piel con factor 70 UV.

En el concentrador vamos a encontrar el foco verdadero. En los cálculos realizados el foco del concentrador se encuentra a 420 mm pero el foco real se debe haber desplazado.



Figura 5.8. Obtención de la distancia del foco verdadero

Para lo cual usamos un pedazo de madera que se le coloca en el centro del concentrador y perpendicular al mismo.

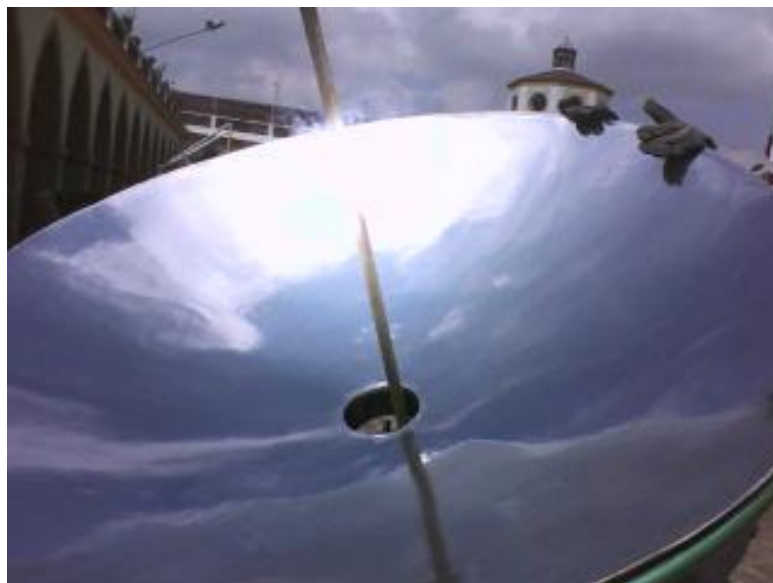


Figura 5.9. Foco real del concentrador

Se espera alrededor de 10 segundos y comprobamos la distancia real y el ancho del foco.

Esto se lo realiza en varias posiciones con respecto al sol obteniendo los siguientes datos.

Tabla V.1. Datos del foco

	Calculada	Real
Distancia del foco	420 mm.	480mm.
Ancho del foco	Un punto	20 mm.

Nota: Cada vez que se necesita dar ajustes a la posición del foco se debe retirar al concentrador del sol.

5.2.3. PRUEBA TOTAL

Una vez realizadas las pruebas por separado de los elementos que conforman el motor Stirling solar se procede a la prueba total.



Figura 5.10. Prueba total

Se coloca al motor en su posición de trabajo, corrigiendo la distancia del foco calculada por la del foco real (480 mm) y se le posiciona con respecto al sol.



Figura 5.11. Funcionamiento del motor Stirling solar

Se espera a que el sol caliente al cilindro de calentamiento, se le da el impulso en sentido horario de las manecillas de reloj y el motor Stirling empieza a funcionar.



Figura 5.12. Visualización del foco

Una vez en funcionamiento el motor Stirling se debe verificar que el foco siga calentando en la zona que es, para lo cual se debe ir orientando con respecto al movimiento del sol.

Nota: Si se desea detener al motor se debe dejar de orientarlo al sol y este de detendrá.

5.3.TOMA DE DATOS BAJO DIFERENTE RÉGIMEN DE FUNCIONAMIENTO

Para la toma de datos del motor Stirling solar se lo ha hecho en pleno sol entre las 11 am y la 1pm. Cuando no hay radiación directa el motor no funciona.

Tabla V.2. Datos de obtenidos

Rad. W/m ²	T _{amb.} °C	T _{máx.} °C	T _{min.} °C	Δ T °C	V _{RPM}
480,78656	18	200	20	180	0
621,76152	20	300	40	260	308
829,01536	24	320	50	270	370
854,92209	21	345	56	289	408
880,82882	21	400	67	333	420
725,38844	20	415	74	341	480
808,289976	28	440	81	359	517
829,01536	29	445	95	350	510
875,647474	30	458	96	362	521
896,372858	31	460	105	355	513
876.87990	31	459	212	247	0

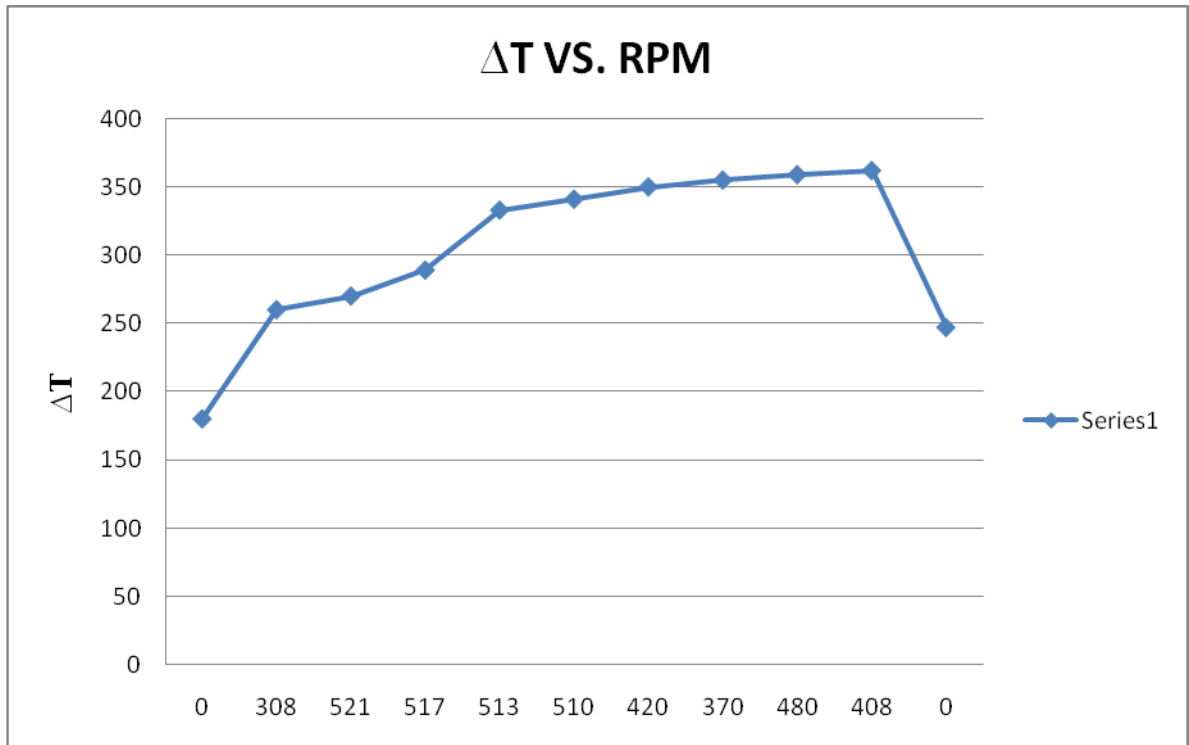
5.4.ANÁLISIS DE RESULTADOS

Ahora veamos cómo funciona el motor con la diferencia de temperaturas.

Tabla V.3. ΔT y RPM

Δ T °C	V _{RPM}
180	0
260	308
270	521
289	517
333	513
341	510
350	420
355	370
359	480
362	408
247	0

Con una grafica analizaremos los datos obtenidos



Grafica 5.1. ΔT y RPM

- Como podemos observar, cuando la diferencia de temperaturas es menor de 250 °C el motor no gira.
- Las revoluciones son directamente proporcionales a la diferencia de temperaturas cuanto mayor sea esta a mayores rpm girará el motor stirling.
- Para la temperatura de la zona de calentamiento es necesario radiación directa del sol, caso contrario el concentrador no da la suficiente temperatura para que el ciclo Stirling funcione.
- La posición del concentrador debe ser perpendicular a los rayos del sol caso contrario se generan dos focos y calienta a la zona de enfriamiento por lo que disminuye la diferencia de temperatura entre dichas zonas y el motor deja de funcionar.
- Cuando el motor alcanza las 500 RPM o más, este deja de vibrar ya que alcanzó su régimen óptimo de funcionamiento.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

INTRODUCCIÓN

Analizar los datos obtenidos, sus ventajas, desventajas y realizar observaciones acerca del motor Stirling solar permitirán apreciar la investigación realizada en la tesis.

6.1. CONCLUSIONES

- El motor Stirling utiliza una fuente de calor externa por lo tanto puede utilizar un gran número de combustibles de fuentes como: energía nuclear, combustibles fósiles (Biocombustibles), energía solar, etc.
- El motor Stirling no funciona por explosión de ningún combustible en su interior, ni fluye por su interior ningún fluido, lo único que tiene en su interior es aire que se comprime y expande con la temperatura.
- El motor Stirling puede potencialmente alcanzar el rendimiento ideal de Carnot. (Elevado rendimiento)
- Posee una baja cantidad de elementos móviles, sobre todo en comparación con los motores de combustión interna, lo que permite pérdidas de rendimiento por fricción muy bajas.
- El hecho que el ciclo en la realidad sea cerrado hace que potencialmente se puedan obtener niveles muy bajos de emisiones.
- El uso de la radiación solar como fuente de energía convierte al motor Stirling en el más ecológico.
- El motor Stirling solar fácilmente puede ser utilizado como motor para un generador de energía eléctrica.
- El motor Stirling tiene un óptimo funcionamiento mientras exista una diferencia de temperatura entre el cilindro de calor y el bloque de enfriamiento mayor a 250 ° C.

- Cuando existe radiación solar difusa el motor Stirling no funciona siempre debe ser directa.

6.2.RECOMENDACIONES

- El concentrador solar es de fibra de vidrio y se debe manipular con precaución.
- La película reflectiva que se encuentra adherida al concentrador es de aluminio por lo que al momento de limpiarlo se debe realizarlo de tal manera que esta no se desprenda.
- El motor Stirling está diseñado con un factor de seguridad óptimo, pero se recomienda hacerlo funcionar por lapsos de una hora y recesos de 15 min.
- Lubricar las piezas móviles antes de cada funcionamiento. Usar aceite 3 en 1 SINGER.
- Manipular el motor Stirling con suma precaución ya que el bloque y polea que se encuentran más vulnerables son de aluminio y fácilmente se puede romper.
- Evitar que la zona de enfriamiento se caliente en exceso ya que las aletas son de 3 mm y pueden deformarse.
- Antes de cada funcionamiento se recomienda realizar un ajuste de sus elementos.
- Siempre que se manipule el motor Stirling solar se debe usar gafas de soldadura y guantes.
- Las personas que operen el motor Stirling solar deben usar protector solar factor 70 UV ya que el concentrador por pequeñas imperfecciones en la construcción reflejará rayos de sol fuera del foco. Exponiendo la piel a la radiación directa del sol.
- Las personas observadoras deben mantenerse a un metro de distancia del concentrador solar.

BIBLIOGRAFÍA

- TERMODINÁMICA, Virgil Moring Fyres y Clifford Max Simmang – México d.f.: limusa, 1993.
- DISEÑO DE INGENIERIA MECANICA, Joseph E. Shigley, McGraw Hill, México, 2002.
- DISEÑO DE ELEMENTOS DE MAQUINAS, Robert L. Mott, Prentice Hall, México, 1992.
- DISEÑO DE COMPONENTES DE MAQUINAS, William C. Orthwein, Editorial Continental S.A., México, 1996.
- ENERGIA SOLAR: SELECCIÓN DEL EQUIPO INSTALACIÓN Y APROVECHAMIENTO, Montgomery Richard, México, 2002.
- LA PRODUCCION DE ENERGÍA MEDIANTE EL VAPOR DE AGUA, AIRE Y LOS GASES, Severns, w., México, 2003.
- CASTRO, M. Energía Solar Térmica de Baja Temperatura, Editorial Progensa, 1^{ra} Edición, Sevilla ,2000.
- MEGYESY, F. Manual de Recipientes a Presión Diseño y Cálculo, Editorial Noriega, 2^{da} Edición, Balderas, 1995.
- BASKAKOV, P. Termotecnia, Editorial Mir Moscú, 1^{ra} Edición, Moscú, 1982.
- INGENIERIA SIN FRONTERAS,. Energía Solar Fotovoltaica y Cooperación al Desarrollo, Editorial Iepala, Madrid, 1989.
- INSTITUTO NACIONAL DE ENERGÍA Y COLEGIO DE ARQUITECTOS DEL ECUADOR NÚCLEO DE PICHINCHA, Primeras Jornadas de Energía Solar en el Ecuador, Editorial INE, 1^{ra} Edición, Quito 1984.
- WILSON, J. Energía Solar, Editorial Alambra, 1^{ra} Edición, Madrid 1982.
- JUTGLAR,L. Energía Solar, Editorial Ceac, 1^{ra} Edición, Barcelona 2004
- PITTS. D. Teoría y Problemas de Transferencia de Calor, Editorial Mcgraw Hill, 1^{ra} Edición, Bogota 1979.
- BECKMAN, W, Solar Energy Termal Processes, Editorial University of Wisconsin, 1^{ra} Edición, New York.
- MANRIQUE, J, Transferencia de Calor, Editorial Harla, 1^{ra} Edición, México 1976.

- KREITH,F, Transmisión del Calor Principios Fundamentales, Editorial Alambra, 1^{ra} Edición, Madrid 1983.
- ALMANZA,R, Ingeniería de la Energía Solar, Editorial El Colegio Nacional, 1^{re} Edición, Mexico 1994.
- MURRAY, R, Matemáticas Superiores para Ingenieros y Científicos, Editorial Mcgraw Hill 1^{ra} Edición, Bogota 1975.
- CYTED,D, Ingeniería del Secado Solar, Editorial Corvalan, 5^{ta} Edición, Argentina 1992.
- LEA,S, Física la Naturaleza de las Cosas vol I y II, Editorial Internacional Thomson, 1^{ra} Edición, México 1999.
- GIANCOLI, D, Física Principio con Aplicaciones, Editorial Prentice – Hall Hispanoamericana, 1^{ra} Edición, México 1997.
- JONES, E, Física Contemporánea, Editorial Mcgraw Hill, 3^{ra} Edición, México 2001.
- PERKINS, A, Física General, Editorial Hispanoamericana, 3^{ra} Edición, México 1960.
- TIMOREVA, S, Curso de Física General, Tomo III, Editorial Mir Moscú, 3^{ra} Edición, Moscú 1977.
- VIDAL, J, Física- Óptica- Magnetismo- Electricidad, Editorial Stella, 8^{va} Edición, Buenos Aires 1984.
- LARBURU, N, Máquinas Prontuario, Editorial Paraninfo, 1^{ra} Edición, España 1998.
- CENGEL, Y, Transferencia de Calor, Editorial Mcgraw Hill, 2^{da} Edición, México 2004.
- INCROPERA, F, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Editorial John Wiley, 4^{ta} Edición, USA, 1996.
- SHIGLEY,J, Diseño en Ingeniería Mecánica, Editorial Mcgraw Hill, 6^{ta} Edición, México DF, 2002.
- HIBBELER, R, Mecánica Vectorial para Ingenieros, Editorial Pearson, 10^{ma} Edición, México, 2004.
- MILLS, A, Transferencia de Calor, Editorial Irwin, 1^{ra} Edición, España, 1995.

- STREETER, V, Mecánica de Fluídos, Editorial Mcgraw Hill, 9^{na} Edición, Bogota, 2000.
- MOTT, R, Mecánica de Fluídos, Editorial Pearson, 6^{ta} Edición, Mexico, 2006.
- SCHAUM, Termodinámica para Ingenieros, Editorail Mcgraw Hill, 1^{ra} Edición, España, 2004.
- CENGEL, Y, Termodinámica, Tomo II, Editorial Mcgraw Hill, 1^{ra} Edición, Bogota, 1998.
- ROLLE, K, Termodinámica, Editorial Pearson, 6^{ta} Edición, México, 2006.

Latacunga, 17 de Febrero del 2009, los autores:

Edwin G. Cacuango A.

M. Arturo Falconi B.

Director de la carrera de Ingeniería Automotriz:

Ing. Juan Castro

Unidad de Admisión y Registro:

Dr. Edmundo Vásquez

Secretario Académico