



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES  
AVANZADOS, S.C.**

**DEPARTAMENTO DE MEDIO  
AMBIENTE Y ENERGÍA**

# Simulación y Diseño de Sistema de Control Mecánico para Motor Stirling

---

**Tesis que para Obtener el Grado de Maestro  
en Ciencia y Tecnología Ambiental**

**Presenta: Daniel Arturo Leal Chávez**

**Asesor: Dr. Ricardo Beltrán Chacón**

## **Agradecimientos**

Doy gracias a Dios por la vida, por todas las gracias y bendiciones que me da día con día. A mi Maestro Jesús que con su grande enseñanza nos muestra lo que es el amor y como vivirlo. Agradezco que a través de la vida se me va mostrando poco a poco el sentido de esta y el cómo vivirla plenamente, gracias por todo lo recibido.

Quisiera agradecer a mi director de tesis el Dr. Ricardo Beltrán Chacón por su disponibilidad, clara enseñanza, ayuda y paciencia para la elaboración de este trabajo.

Agradezco a todo el personal y compañeros de CIMAV, que siempre tienden su mano cuando alguien la necesita. Creando un magnifico ambiente para el desarrollo profesional de las personas y que gracias a su buena voluntad, capacidad y buenos consejos ayudaron a mi crecimiento durante esta estancia. De igual manera al personal del Instituto Tecnológico de Chihuahua que me permitió utilizar su Laboratorio de Electrónica de Potencia para realizar las pruebas que requería y mostrarme los procedimientos necesarios para realizarlas.

A mi novia, amigos y compañeros que me apoyaron durante este tiempo, gracias por poder tenerlos como gran apoyo en las dificultades y partes buenas de la vida, aprendiendo mucho de todos ellos y encontrando la motivación necesaria.

A toda mi familia y en especial a mis padres, que siempre me han brindado todo lo necesario para irme formando como buen hombre, ayudándome en todo lo que he necesitado y dándome todo su amor, a quienes admiro y tomo como modelo a seguir, son mi principal pilar y sé que sin su apoyo todo sería muy diferente.

## Resumen

En el presente estudio se diseñó un dispositivo para controlar la potencia de un motor Stirling con una capacidad nominal de 2 kW, logrando tener una generación de energía eléctrica con frecuencia y voltaje controlados.

Se propuso una técnica mediante la adición de volumen muerto al motor Stirling (solicitud de patente con folio: **MX/E/2014/090743**) que muestra múltiples ventajas con respecto a otros dispositivos de control analizados, logrando regular la potencia y velocidad del sistema, que para el caso de estudio corresponde a 1900 W y 1821 rpm respectivamente. Esta técnica fue aplicada mediante una cámara de volumen variable utilizando 54 cm<sup>3</sup>, siendo capaz de mitigar un 16% de la potencia mecánica generada, que representa la cantidad de potencia necesaria a regular en el sistema, a una presión de trabajo de 9.18 MPa e irradiancias de 1100 W/m<sup>2</sup>. El diseño del dispositivo propuesto considera las propiedades mecánicas del calentador del motor y la insolación de la localidad de Chihuahua. El dispositivo de control es capaz de mantener los parámetros eléctricos requeridos por CFE para sistemas de energías renovables de pequeña escala ( $\leq 10$  kW).

Los resultados obtenidos indican que además de regular la potencia del sistema, se logra que el sistema sea más eficiente, aumentando la producción de la energía eléctrica hasta en un 21%, teniendo una generación eléctrica aproximada de 3,322 kWh/año sin control y una de 4,043 kWh/año utilizando el sistema de control propuesto. El uso de este sistema de control permite hacer más atractivo el uso de motores Stirling de baja capacidad debido a que aumenta la energía producida por el sistema.

## Abstract

In the present study a device was designed to control the power of a Stirling engine with a nominal capacity of 2 kW, having an electric energy output within frequency and voltage limits.

It was proposed a technique that supplies dead volume to the Stirling engine (patent application with folio: **MX/E/2014/090743**) showing multiple advantages with respect to other control devices previously analyzed, thereby regulating the power and speed of the system, in this case corresponds to 1900 W and 1821 rpm respectively. This technique was applied through a variable volume chamber using 54 cm<sup>3</sup>, being able to mitigate 16% of the mechanical power generated that represents the amount of power required to regulate in the system, at a working pressure of 9.18 MPa and irradiances of 1100 W/m<sup>2</sup>.

The proposed design of the device considers the mechanical properties of the engine heater and the insolation from of Chihuahua, Mex. The control device is capable of maintaining the electrical parameters required by CFE for grid-connected renewable energy systems for small scale ( $\leq 10$  kW).

The results indicate that the use of the device makes the system more efficient, increasing the production of electrical energy up to 21 %, getting an energy generation of approximately 3,322 kWh/year without control and 4,043 kWh/year using the proposed control system. The use of this control system make more attractive the use of Stirling engines of low-capacity because it increases the energy produced by the system.

# Índice

<b>1 Introducción</b> .....	1
1.1 Antecedentes .....	2
1.2 Justificación.....	4
1.3 Hipótesis .....	4
1.4 Objetivo General.....	4
1.5 Objetivos Específicos .....	5
1.6 Metodología .....	5
<b>2 Motor Stirling y Técnicas de Control</b> .....	7
2.1 Descripción de Motor Stirling.....	8
2.2 Técnicas de Control .....	14
2.3 Técnica de control a implementar (VCDX) .....	27
<b>3 Generador Asíncrono</b> .....	31
3.2 Simulación Numérica de un Generador Asíncrono .....	33
3.1.1 Determinación de los Parámetros del Circuito Equivalente .....	34
3.2.1 Curvas de Magnetización y Autoexcitación .....	35
3.2.2 Descripción Matemática del Proceso de Autoexcitación. ....	38
3.3 Requisitos de Interconexión para Sistemas de Energía Renovable .....	47
3.4 Selección de Generador de Inducción.....	47

<b>4 Estudio y Diseño del Sistema de Control</b> .....	51
4.1 Disponibilidad de Energía Solar .....	51
4.2 Determinación de Punto de Operación de Motor Stirling .....	55
4.3 Diseño e Ingeniería Básica del Modelo .....	60
4.4 Descripción del Diseño .....	64
4.5 Alcances del Sistema de Control .....	71
<b>5 Conclusiones</b> .....	75
5.1 Recomendaciones y Trabajo Futuro .....	77
<b>APENDICE I</b> .....	82
A.1 Prueba de vacío .....	82
A.2 Prueba DC para Determinar la Resistencia del Estator .....	84
A.3 Prueba de Rotor Bloqueado .....	86
<b>APENDICE II</b> .....	90

## ***Lista de Figuras***

Figura 2.1. Arreglo del motor y tiempos de desplazamiento.....	9
Figura 2.2. Diagrama PV y TS de un motor Stirling.....	15
Figura 2.3. Variación de ángulo de desfase .....	15
Figura 2.4. Variación de la carrera del pistón.....	16
Figura 2.5. Variación de la temperatura .....	17
Figura 2.6. Variación de la presión media.....	18
Figura 2.7. Variación del volumen muerto .....	20
Figura 2.8. Comparación de técnica VCDX y Pmedia.....	21
Figura 2.9. Esquema de patente US3'699,770 .....	22
Figura 2.10. Esquema de patente US3'782,106 .....	23
Figura 2.11. Esquema de patente US4'395,881 .....	25
Figura 2.13. Esquema de patente US4'392,350 .....	26
Figura 2.14. Esquema de motor Stirling con volúmenes de trabajo.....	28
Figura 2.15. Influencia de cantidad de fluido y volumen muerto.....	29
Figura 2.16. Esquema de motor Stirling y sistema de control .....	30
Figura 3.1. Curva característica de máquina de inducción .....	32
Figura 3.2. Generador de inducción aislado con banco de capacitores.....	33
Figura 3.3. Curva de magnetización de un generador de inducción.....	36
Figura 3.4. Modelo clásico simplificado por fase del generador.....	39
Figura 3.5. Circuito equivalente con carga en paralelo .....	39
Figura 3.6. Modelo simplificado de Doxey .....	41
Figura 3.7 Diagrama de flujo de funcionamiento sistema Disco-Stirling con GIAE .....	46
Figura 3.8. Potencia y velocidades de operación del generador .....	49
Figura 3.9. Frecuencia y voltaje contra potencia entregada .....	50
Figura 4.1. Distribución mensual de irradiación.....	55
Figura 4.2. Influencia de rpm y la cantidad de fluido en potencia .....	56
Figura 4.3. Obtención de punto de operación.....	57
Figura 4.4. Energía eléctrica generada con diferente cantidad de fluido...	58

Figura 4.5. Influencia del volumen muerto en potencia .....	61
Figura 4.6. Requerimiento de VCDX para regular la potencia .....	62
Figura 4.7. Sistema de control conectado a motor Stirling .....	65
Figura 4.8. Componentes de la cámara de volumen variable .....	66
Figura 4.9. Actuador electromecánico utilizado .....	67
Figura 4.10. Método de control .....	68
Figura 4.11. Diagrama de flujo de sistema de control .....	70
Figura 4.12. Requerimientos de volumen muerto y presiones máximas ..	71
Figura 4.13. Influencia de volumen muerto en la potencia .....	72
Figura 4.14. Potencias "con" y "sin" sistema de control.....	73
Figura 4.15. Comparación de energía eléctrica generada al año .....	74

### ***Lista de Tablas***

Tabla 3.1. Determinación de Constantes K .....	38
Tabla 3.2. Parámetros de Generador de Inducción (Simões, 2008).....	48
Tabla 4.1. Frecuencia acumulada para la ciudad de Chihuahua .....	53
Tabla 4.2. Distribución de Irradiación a Niveles de Irradiancia .....	54
Tabla 4.3. Presión Permitida en los Tubos del Calentador .....	59
Tabla 4.4. Temperaturas en el calentador a distinta cantidad de masa....	60



## Nomenclatura

C	capacitancia
$C_v$	capacidad calorífica del gas a volumen constante
CA	corriente alterna
CD	corriente directa
$d_o$	diámetro externo
F	frecuencia en p.u
F	frecuencia
$F_{base}$	frecuencia de referencia
F.P.	factor de potencia
GI	generador de inducción
GIAE	generador de inducción autoexcitado
H	espesor de tubo
I	momento de inercia
$I_b$	irradiancia
$I_C$	corriente de capacitor
$I_m$	corriente de magnetización
$K_1, K_2, K_3$	constantes de curva de magnetización
L	inductancia
$L_m$	inductancia de magnetización
MG	masa del fluido de trabajo
$n_s$	velocidad mecánica síncrona en rpm
$n_{sincr}$	velocidad síncrona del generador de inducción
$n_r$	velocidad del rotor
P	presión
$p_{max}$	presión máxima en el ciclo
P	potencia
$p_{AVG}$	presión media del ciclo
$P_{in}$	potencia de entrada

$P_L$	potencia de carga o de salida
$P_{\text{losses}}$	potencia de perdida
$P_{\text{out}}$	potencia de salida
P.U.	por unidad
$Q$	potencia reactiva
$Q_c$	calor removido por el enfriador
$Q_H$	calor suministrado por el calentador
$Q_{\text{reg}}$	calor suministrado por el regenerador
$r_v$	relación de volumen
$R$	constante universal de los gases ideales
$R_1$	resistencia del estator
$R_2$	resistencia del rotor
$R_L$	resistencia de carga
$R_{LP}$	resistencia de carga en paralelo
$R_m$	resistencia de magnetización
$R_p$	resistencia en paralelo
$R_s$	resistencia en serie
rpm	revoluciones por minuto
rpm <sub>sp</sub>	revoluciones por minuto establecidas
$S$	deslizamiento
$S$	dominio de frecuencia
$S_{1,2,3,4}$	entropía en los estados del ciclo
$T$	torque
$T_{\text{amb}}$	temperatura ambiente
$T_{\text{max}}$	temperatura máxima del ciclo
$T_{\text{min}}$	temperatura mínima del ciclo
$V$	volumen
$VC$	volumen del cilindro de compresión
$VCD$	volumen muerto del enfriador
$VCDX$	volumen muerto extra en la parte de enfriador

$V_H$	volumen del cilindro de expansión
$V_{HD}$	volumen muerto de; calentador
$V_{RD}$	volumen muerto del regenerador
$V_{nominal}$	voltaje nominal
$V_\phi$	voltaje de fase
$V_g$	voltaje del entrehierro
$V_{max}$	volumen máximo del ciclo
$V_{min}$	volumen mínimo del ciclo
$V_t$	voltaje en las terminales del generador
$W_c$	calor suministrado por el cilindro de compresión
$W_H$	calor obtenido por el cilindro de expansión
$X_1$	reactancia del estator
$X_2$	reactancia del rotor
$X_C$	reactancia capacitiva
$X_L$	reactancia de carga
$X_{LP}$	reactancia de carga equivalente en paralelo
$X_m$	reactancia de magnetización
$X_p$	reactancia en paralelo
$X_s$	reactancia en serie
$Z_s$	impedancia en serie
$Z_L$	impedancia de carga
$A$	aceleración angular
$\eta$	eficiencia
$\sigma_{sa}$	máximo esfuerzo permisible
$T$	relación de temperatura
$\Omega$	velocidad angular
$\omega_r$	velocidad angular mecánica del rotor
$\omega_s$	velocidad angular asíncrona

## Introducción

El desarrollo y aceptación de energías con fuentes renovables en los últimos años ha ido creciendo favorablemente y aunque los combustibles fósiles tengan una tecnología bastante desarrollada, así como una gran densidad energética, estos han provocado varios problemas de contaminación atmosférica.

Actualmente se vive en una sociedad donde la población y la demanda de energía crecen día a día, en el que la sociedad está en continuo desarrollo y esto hace que sus habitantes consuman más energía para su comodidad, así como mayor consumo de productos. Esto genera un mayor requerimiento de energía, de la cual se estima que cerca de un 83% de la producción energética mundial actual depende de combustibles fósiles como lo son el petróleo, el gas y carbón (Debnath, 2011). Como es bien sabido estos recursos son limitados y además tienen efectos sobre el calentamiento global debido a la emisión de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono, metano y Clorofluorocarbono (Ross, 1989). Lo cual nos lleva al aprovechamiento de nuevas fuentes de energía que sean más amigables con el medio ambiente, fáciles de obtener y no sean riesgosas para el ser humano. Es por ello que en las últimas décadas se ha puesto gran interés en las energías renovables y especialmente en la energía solar.

Hoy en día existen diferentes formas de aprovechar la energía térmica solar, pero de todas estas tecnologías se ha demostrado que los sistemas

de colectores parabólicos con motor Stirling tienen la mayor eficiencia de conversión de energía solar a eléctrica (Mingzhen, 2012). Se ha observado que algunos de estos sistemas han logrado obtener hasta un 40% de eficiencia (R.Aishwarya, 2011), no obstante de ser motores muy silenciosos, con bajo requerimiento de mantenimiento y ser los dispositivos en baja potencia más efectivos en convertir la energía térmica solar.

Existen bastantes estudios acerca de este tipo de tecnología, sin embargo hay poca literatura a cerca del análisis y métodos de control de estos motores (Alvarez-Aguirre, 2010).

En este estudio se mostrará el diseño de un sistema de control mecánico el cual es capaz de regular la potencia de un motor Stirling de baja capacidad (2 kW) logrando mejorar su eficiencia y permitir mantener una potencia constante cuando existan cambios de irradiación sobre algún límite establecido.

## 1.1 Antecedentes

Actualmente existen varios métodos para el control de motores Stirling mediante la modificación de las variables que están correlacionadas con el torque y la velocidad, entre los más usados se encuentran los siguientes:

- Control de temperatura.- La eficiencia térmica de todo motor depende principalmente de la diferencia de temperaturas alcanzada en el ciclo. Al variar la carga deseada en el motor, esta temperatura tendrá que variar de igual manera, siempre teniendo la máxima temperatura posible. Para hacer esto posible debe de suministrarse la cantidad de calor adecuada o extraer el calor para lograr bajar la temperatura, de igual forma también es posible ajustar la velocidad del motor para que este transforme diferentes cantidades de calor en un determinado tiempo.

- Control de la presión media.- Debido a que la potencia de un motor es directamente proporcional a la presión de trabajo, se tiene que si se logra ajustar la presión media del fluido de trabajo por un medio externo, se puede controlar la potencia desarrollada por el motor.
- Variación de volumen muerto.- El control de la potencia del motor puede lograrse mediante la variación del volumen que ocupa el gas de trabajo dentro del motor, en el cual se aplicará la presión de trabajo, para reducir la potencia del motor se puede agregar cierto volumen extra al espacio de trabajo con lo cual decrecerá la relación de compresión  $V_{\max}/V_{\min}$  y la amplitud de las variaciones de la presión.
- Variación del ángulo de desfase.- En un motor Stirling las variaciones de volumen en el espacio de expansión dirigen a los cambios en el espacio de compresión por medio del ángulo de desfase  $\alpha$  el cual es uno de los principales parámetros de diseño en un motor. Al poder variar este ángulo se puede entonces variar la potencia del motor (*Walker, 1980*).
- Variación de la carrera del pistón.- La potencia de un motor Stirling puede ser controlada por medio de la variación de la carrera de los pistones. Esta técnica puede ser aplicada tanto en pistones de simple o doble acción, pero este método es más utilizado en motores de pistón libre que en motores con un mecanismo biela-manivela.

Al estar conectado a un generador eléctrico y tener cambios repentinos en el suministro de calor hacia el motor, se busca que este tenga una respuesta inmediata para seguir entregando una potencia y velocidad deseada. De igual manera la eficiencia del sistema es también de particular importancia y dado a que la mayor parte del tiempo el motor trabaja a solo una fracción de la capacidad máxima de carga, se debe tener un control del motor que reaccione rápidamente a los cambios repentinos manteniendo la máxima eficiencia posible.

## 1.2 Justificación

Los sistemas de control son necesarios en los motores Stirling para regular la potencia de salida o torque así como su velocidad. Existen algunos casos en los cuales la velocidad se debe de mantener constante, a pesar de la carga que este tenga, como lo es el caso de la generación eléctrica, que requiere una frecuencia constante.

La mayoría del desarrollo de estos sistemas de control es generalmente para motores de alta potencia (mayor a 25 kW), los cuales son controles sofisticados que ocupan un gran espacio o son muy costosos. Por lo que utilizar ese tipo de sistemas para baja capacidad no resulta muy atractivo en un sistema de generación eléctrica con motor Stirling de baja potencia.

El sistema trabaja en un entorno donde el calor suministrado proviene del sol, el cual es variable y al mismo tiempo se tiene un comportamiento no muy fácil de predecir, por lo que es necesario conocer este comportamiento, para poder evaluar la potencia y eficiencia del sistema al momento de variar la energía que se le suministre. Es por esto que existe la necesidad de seleccionar, definir y desarrollar un control adecuado para los sistemas de estas capacidades.

## 1.3 Hipótesis

La creación de un simulador numérico permitirá estudiar la interacción entre un motor Stirling solar y diferentes técnicas de control, permitiendo seleccionar y diseñar en estado estable un sistema de control mecánico para la regulación de la energía eléctrica producida.

## 1.4 Objetivo General

Desarrollar un sistema de control para un motor Stirling con un generador asíncrono de 3 kW bajo condiciones de suministro de calor variable que controle la potencia y velocidad del motor, considerando insolación anual,

propiedades mecánicas del calentador, eficiencia global, límites de frecuencia y voltaje para sistemas de pequeña escala interconectados a la red eléctrica.

## 1.5 Objetivos Específicos

- Simular el comportamiento de distintos sistemas de control existentes e identificar la técnica que tenga una mayor facilidad de implementación, controle el sistema con mayor facilidad y mejore la eficiencia para esta escala de potencias.
- Simular el comportamiento de un generador eléctrico de inducción y obtener sus características de operación.
- Analizar el comportamiento que se tendrá al acoplar el motor Stirling a un generador de inducción utilizando el sistema de control.
- Determinar la mejor operación del sistema manteniendo la mayor eficiencia posible, suministrando una estabilidad de tensión y frecuencia, con las normas correspondientes.
- Realizar el diseño mecánico del sistema de control, considerando las características de un prototipo de motor Stirling con una capacidad de 2 kW.
- Incluir en el sistema dispositivos o configuraciones novedosas que permitan patentar el sistema de control.

## 1.6 Metodología

El presente estudio está basado en simulación numérica donde se desarrolló un modelado matemático y el procedimiento para el control de la potencia de un sistema de generación eléctrica de concentrador solar con motor Stirling. Para hacer esto se desarrolló un algoritmo en Matlab™ para simular el comportamiento de las 5 diferentes técnicas de control antes mencionadas, las cuales se integraron con el modelo reportado por (Beltrán 2011).



Para obtener el comportamiento de la energía eléctrica generada por todo el sistema, se caracterizó un generador asíncrono realizando las pruebas de rotor bloqueado, al vacío y prueba de C.D. descritas por (Chapman, 2000) en el Laboratorio de Electrónica de Potencia en el Instituto Tecnológico de Chihuahua.

Una vez obtenido el comportamiento termodinámico y dinámico del motor y generador eléctrico al trabajar con el sistema de control, se realiza el diseño en los capítulos 2 y 3, y la ingeniería básica del sistema en el capítulo 4.

## Motor Stirling y Técnicas de Control

Los procesos para conversión de energía solar a mecánica por medios térmicos son fundamentalmente similares a otros procesos termodinámicos, así que los principios básicos así como la radiación, materiales, colectores y tipos de ciclos o sistemas son la base para estimar el desempeño de un sistema de generación de energía eléctrica termosolar.

Si se utilizará solamente el 1% de la superficie del Sahara con plantas termo solares se podría abastecer la demanda total de energía eléctrica para todo el mundo, logrando generar esta energía a un bajo costo (Earthscan LLC, 2010). Existen esencialmente tres tipos diferentes de plantas termo-solares:

- *Plantas de canal parabólico*
- *Plantas de torres solares*
- *Sistemas de disco parabólico y motor Stirling*

Cualquier tecnología que se utilice para el aprovechamiento de energía tiene dos características muy importantes, una es el umbral de funcionamiento, es decir, saber cuál es el rango de energía que se necesita para realizar el proceso para el que fue creado y la segunda es la energía de entrada necesaria para alcanzar su máxima eficiencia. Si se conocen ambos valores y se conoce la distribución energética y temporal de la

radiación solar, se podrá predecir con mucha precisión cuál será su desempeño.

Se ha comprobado desde su invención en 1816 por Robert Stirling que el motor Stirling es un dispositivo muy significativa práctica y teóricamente siendo un motor simple, seguro y confiable. Este motor trabaja en un ciclo termodinámico regenerativo el cual puede trabajar con un pequeño diferencial de temperatura y además lograr una eficiencia, de hasta 40% (R.Aishwarya, 2011). Esta máquina térmica básicamente funciona en un ciclo de expansión y compresión del fluido de trabajo con un diferencial de temperatura en el cual se transforma el calor suministrado en energía mecánica, donde al acoplarse un generador eléctrico, esta energía es capaz de convertirse en energía eléctrica.

Así mismo los motores Stirling tienen muchas características atractivas para aplicaciones de generación eléctrica ya que tienen una respuesta rápida a cambios de carga repentinos y un desempeño excelente con cargas parciales además de tener el potencial para operar por muy largos periodos con un mantenimiento mínimo (Walker, 1980).

## **2.1 Descripción de Motor Stirling**

El motor Stirling es un dispositivo que opera en un ciclo termodinámico regenerativo en el cual existe una expansión y compresión del fluido de trabajo a diferentes niveles de temperatura. Este fluido es controlado por cambios de volumen en los que existe una conversión cíclica de calor a trabajo y viceversa. Esto se hace expandiendo un gas de trabajo a alta temperatura. Debido a que el trabajo producido durante expansión es mayor al trabajo requerido para comprimir el gas a baja temperatura el resultado después de un ciclo del motor es una cantidad de trabajo mecánico útil.

El mecanismo del motor consta de dos cilindros, dos pistones y un regenerador entre ellos como se muestra en la figura 2.1. El regenerador funciona como un contenedor térmico, absorbiendo y cediendo calor, donde el gradiente de temperatura ( $T_{max} - T_{min}$ ) se mantiene entre las orillas del generador. El cilindro del lado derecho del regenerador es el cilindro de compresión y el lado izquierdo es el de expansión. El cilindro de expansión se mantiene a alta temperatura y el cilindro derecho a baja temperatura, tomando en consideración que no existe transferencia de calor longitudinalmente.

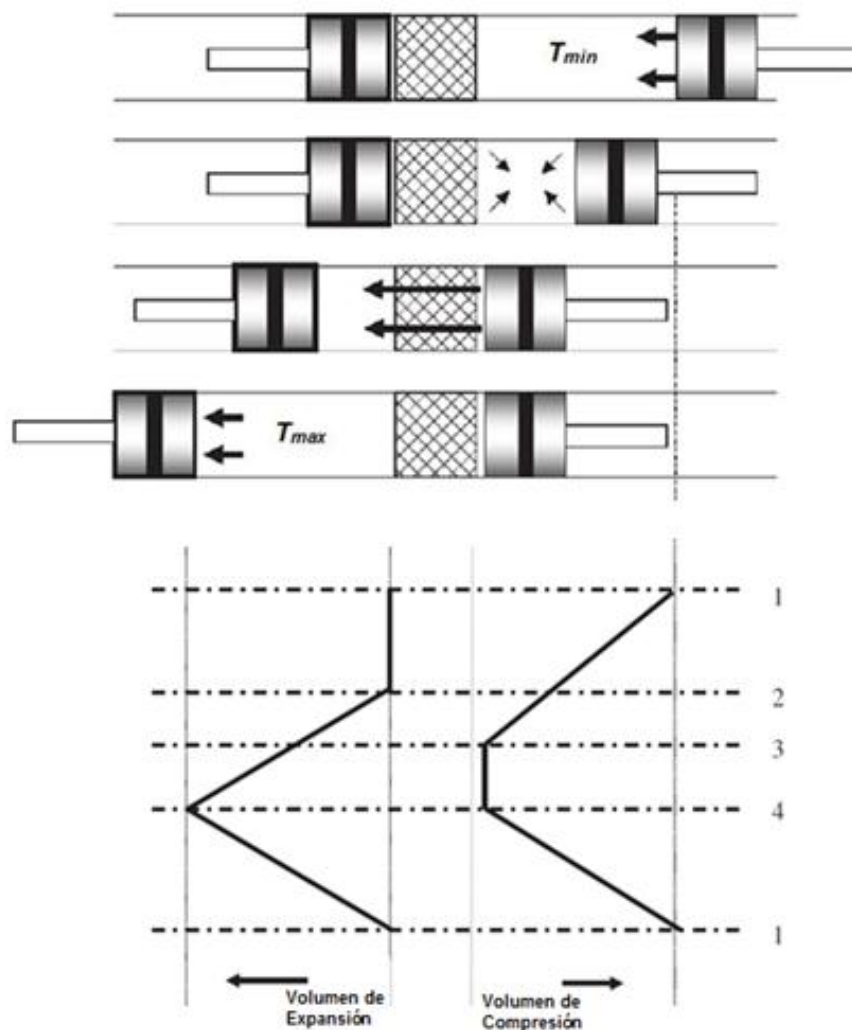


Figura 2.1. Arreglo del motor y tiempos de desplazamiento

El ciclo ideal consiste en cuatro procesos llamados compresión-expansión isotérmica y suministro-desecho isentropico. Este ciclo empieza asumiendo que todo el fluido de trabajo está en el espacio de compresión, el volumen de esta cámara está en su máxima magnitud, mientras que la temperatura y presión están en la parte mínima del ciclo, el cual será el punto 1 en el diagrama presión-volumen y temperatura-entropía que se muestra en la figura 2.2.

La posición de los pistones para el inicio del ciclo sería: el lado de compresión en su límite derecho y el pistón izquierdo enseguida del regenerador. Tomando esto en cuenta se pueden mostrar los cuatro procesos del ciclo termodinámico, los cuales son (Thombare, 2006):

Proceso 1-2 "compresión isotérmica".- Durante la compresión de 1 a 2 el pistón de compresión mueve al fluido hacia el regenerador, mientras el pistón de expansión se mantiene fijo, el fluido de trabajo se comprime y así este pasa de  $P_1$  a  $P_2$ . La temperatura se mantiene constante debido a que el calor fluye del pistón de compresión (lado de baja temperatura) hacia los alrededores, entonces el trabajo hecho en el fluido de trabajo es igual al calor retirado en el ciclo, no existiendo algún cambio en la energía interna pero si un decrecimiento en la entropía. La compresión isotérmica del flujo de trabajo lleva acabo entonces el rechazo del calor del sistema en el enfriador alcanzando la  $T_{\min}$  en el cilindro de compresión.

Teniendo entonces:

$$P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2} = P_1 r_v \quad (2-1)$$

$$T_1 = T_2 = T_{\min} \quad (2-2)$$

$$Q_c = W_c \quad (2-3)$$

$$W_c = P_1 V_1 \ln(1/r_v) \quad (2-4)$$

$$S_2 - S_1 = R \ln(1/r_v) \quad (2-5)$$

Proceso 2-3 "Proceso de transferencia en el regenerador a volumen constante".- En este proceso ambos pistones se mueven simultáneamente, dirigiéndose el pistón de compresión al regenerador y el de expansión alejándose de este, así el volumen no cambia pero la temperatura del fluido si pasa de  $T_{\min}$  a  $T_{\max}$  al absorber el calor contenido en las mallas del regenerador y así la presión del flujo de trabajo incrementa proporcionalmente al aumentar la temperatura. De la misma manera aumenta la entropía y energía interna en el sistema debido a que no existe trabajo hecho pero si el aumento en la presión.

$$P_3 = \frac{P_2 T_3}{T_2} = \frac{P_2}{\tau} \quad (2-6)$$

$$\tau = T_2/T_3 \quad (2-7)$$

$$Q_{\text{reg}} = C_v(T_3 - T_2) \quad (2-8)$$

$$W_{\text{reg}} = 0 \quad (2-9)$$

$$S_3 - S_2 = C_v \ln(1/\tau) \quad (2-10)$$

Proceso 3-4 "Proceso de expansión isotérmica.- En este proceso el pistón de expansión continua alejándose del regenerador mientras que el pistón de compresión continua en la misma posición. Mientras el pistón de expansión se aleja, la presión disminuye al ir incrementando el volumen, sin embargo la temperatura se mantiene constante al suministrar calor de la fuente externa que se encuentra a la  $T_{\max}$ , así el trabajo hecho por el flujo de trabajo sobre el pistón es igual al calor suministrado. No existe algún cambio en la energía interna pero si un incremento en la entropía del flujo de trabajo.

$$P_4 = \frac{P_3 V_3}{V_4} = \frac{P_3}{r_v} \quad (2-11)$$

$$T_4 = T_3 = T_{\max} \quad (2-12)$$

$$Q_H = W_H = P_3 V_3 \ln r_v \quad (2-13)$$

$$S_4 - S_3 = R \ln r_v \quad (2-14)$$

Proceso 4-1 "Proceso de transferencia en el regenerador a volumen constante".- En este proceso ambos pistones se mueven simultáneamente para mover el fluido de trabajo del cilindro de expansión hacia el de compresión a volumen constante, pasando por el regenerador, donde este absorbe el calor del fluido pasando de  $T_{\max}$  a  $T_{\min}$ . No existe ningún trabajo y existe un descenso en la energía interna como en la entropía.

$$P_1 = \frac{P_4 T_4}{T_1} = P_1 \tau \quad (2-15)$$

$$V_1 = V_4 \quad (2-16)$$

$$Q = C_v(T_1 - T_4) \quad (2-17)$$

$$S_1 - S_4 = C_v \ln \tau \quad (2-18)$$

Entonces sí:

$$r_v = V_4/V_3 = V_1/V_2 \quad (2-19)$$

El calor total suministrado sería  $= RT_3 \ln r_v$  y el calor desechado  $= RT_1 \ln r_v$

Entonces la eficiencia sería descrita por:

$$\eta = \frac{mRT_3 \ln r_v - mRT_1 \ln r_v}{mRT_3 \ln r_v} \quad (2-20)$$

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_3} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}} = 1 - \tau \quad (2-21)$$

Este ciclo Stirling sería un ciclo ideal, que para cumplirse sería necesario que los intercambiadores de calor fueran totalmente eficientes y existiera una transferencia de calor entre las paredes de los cilindros y el flujo de trabajo infinita, además que no existieran pérdidas mecánicas, transferencias de calor no deseadas, ni volúmenes muertos, entre otras irreversibilidades (Thombare, 2006).

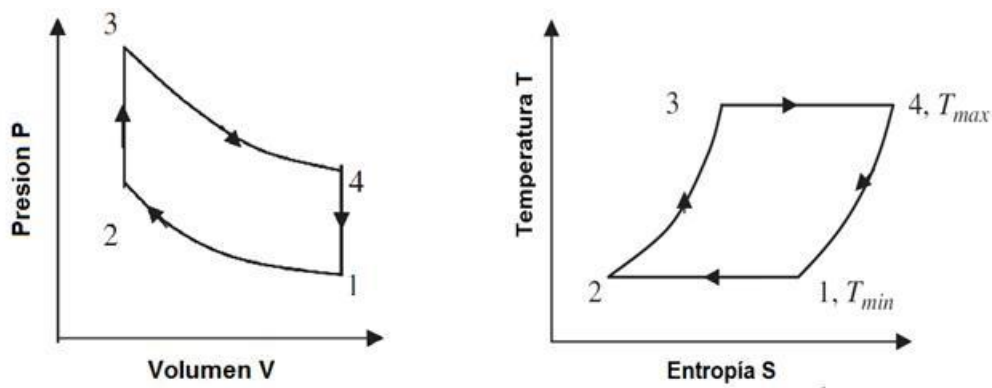


Figura 2.2. Diagrama PV y TS de un motor Stirling

El motor Stirling del presente estudio utiliza nitrógeno ( $N_2$ ) como fluido de trabajo y tiene dos pistones de acción simple en acoplamiento tipo alfa, un regenerador de mallas metálicas y un enfriador de tubo y coraza.

El simulador que se utiliza trabaja con un método de segundo orden, el cual calcula el calor requerido ideal y la potencia ideal producida. Luego calcula las principales pérdidas del motor. Donde la potencia neta es la diferencia entre la potencia ideal y las pérdidas por fricción mecánica y del fluido. De la misma manera el calor neto requerido es la suma entre el calor ideal requerido y las pérdidas de calor en las partes del cilindro de expansión, conducción térmica a través de sólidos y fluidos, pérdidas por oscilación de temperatura entre otras. La eficiencia neta se define como la relación entre la potencia neta producida y el calor neto suministrado.



Para validar el flujo de calor suministrado y la potencia producida por el motor, este se comparó con resultados experimentales del motor GPU-3, donde el flujo de calor suministrado resultó con un error promedio de 5.7% y un error máximo de 9.6%, mientras que la potencia producida a una presión de operación de 6.89 MPa, resultó con error de -8.2% con lo que se observa que el modelo de segundo orden para la simulación del motor Stirling tiene una representatividad aceptable (Beltrán, 2012).

## 2.2 Técnicas de Control

En general todas las técnicas a utilizar sirven para controlar la potencia del motor al variar la carga aplicada, sin embargo lo que se buscó en este estudio, es mantener una potencia constante dentro de cierto rango, al cambiar el suministro de calor hacia el sistema, cambiando al momento de ir aumentando o disminuyendo la irradiancia solar captada y al mismo tiempo tener trabajando al motor en un punto de alta eficiencia.

El simulador numérico de (Beltran, 2011) para el sistema disco-Stirling sirvió como herramienta para el análisis de las diferentes técnicas de control, con las cuales se observó el cambio de potencia y eficiencia al variar los parámetros de entrada, en donde los parámetros se variaron de una forma físicamente posible. Se pretende que el sistema de control mantenga una potencia constante a partir de una irradiancia de  $950 \text{ W/m}^2$ . Para evaluar y seleccionar la técnica más adecuada, se mantuvo una velocidad de 360 rpm y una temperatura ambiente de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Se observó cómo los cambios de las variables que pudieran servir como control afectan al sistema y con esto poder evaluar cuáles de estas variables son las más óptimas para desarrollar un adecuado sistema de control. Una vez vistos los cambios de potencia y eficiencia que se tienen, se intentará mantener estas lo más alto posible pudiendo manipular adecuadamente las variables de control.

Entre las técnicas más utilizadas para el control de motores Stirling que están correlacionadas con el torque y la velocidad, se encuentran las siguientes:

- Variación del ángulo de desfase.- En un motor Stirling las variaciones de volumen en el espacio de expansión, dirigen a los cambios en el espacio de compresión por medio del ángulo de desfase  $\alpha$  el cual es uno de los principales parámetros de diseño en un motor. Al poder variar este ángulo se puede entonces variar la potencia del motor (*Walker, 1980*).

Se realizó una variación del ángulo del desfase entre los pistones en un rango de  $70^\circ$  a  $140^\circ$ , obteniendo como resultado las potencias mostradas en la figura 2.3. Los resultados indican una variación de 34.42% en la potencia pudiendo tener control de esta, hasta de 733.8 W a la irradiancia dada. Sin embargo este tipo de técnica de control no es muy buena opción para sistemas biela-manivela debido a la complejidad de los mecanismos necesarios para poder cambiar el ángulo de desfase.

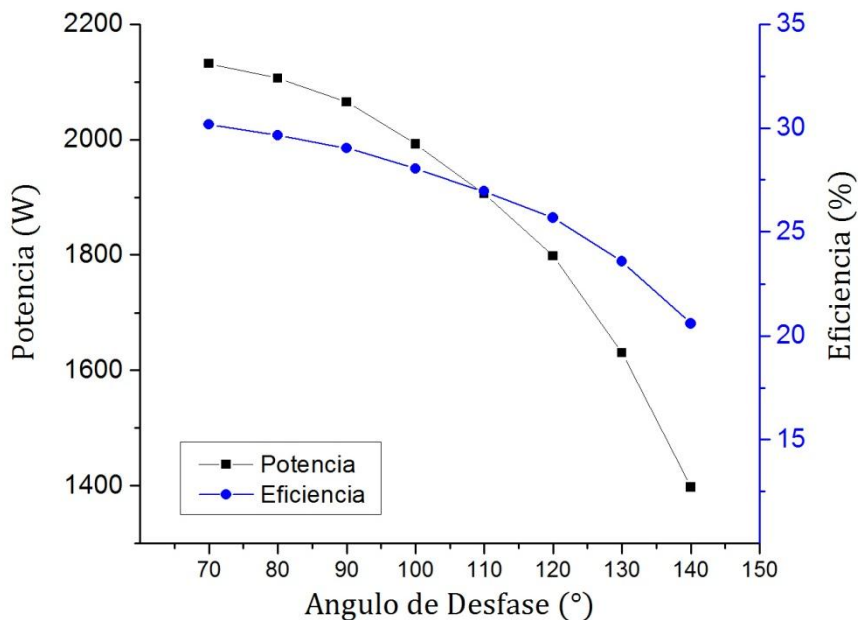
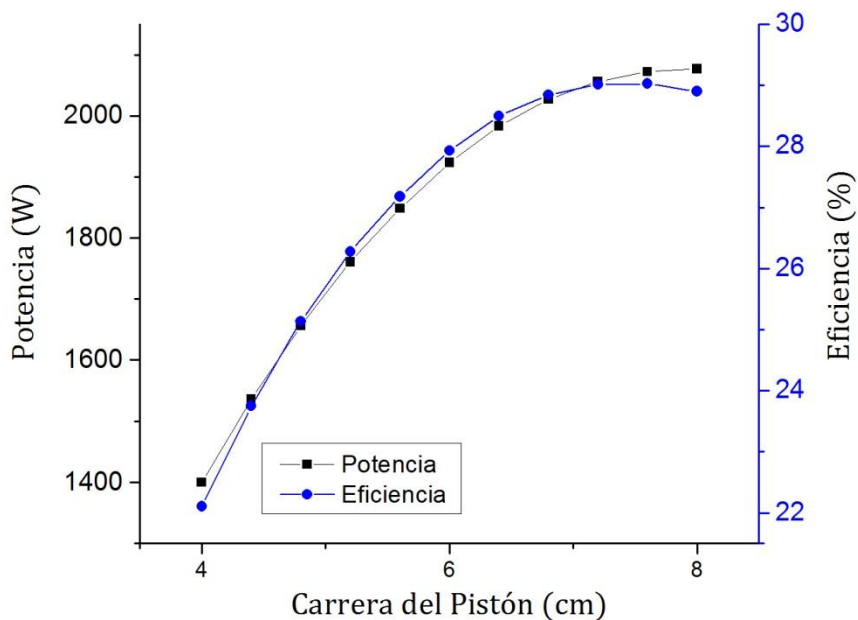


Figura 2.3. Variación de ángulo de desfase

- Variación de la carrera del pistón.- La potencia de un motor Stirling puede ser controlada por medio de la variación de la carrera de los pistones. Esta técnica puede ser aplicada tanto en pistones de simple o doble acción, pero este método es más utilizado en motores de pistón libre que en motores con un mecanismo biela-manivela. La carrera del pistón se varió de 4 a 8 cm trabajando normalmente con una carrera de 7.4 cm con lo cual se obtuvo un cambio de potencia de hasta el 32.6%, variando la potencia hasta 676.7W, como se muestra en la figura 2.4. Lo cual no es un control de potencia alto para ser una técnica tan complicada de manejar, por lo cual no es una forma muy adecuada para este caso.



**Figura 2.4. Variación de la carrera del pistón**

- Control de temperatura.- La eficiencia térmica de todo motor depende principalmente de la diferencia de temperaturas alcanzada en el ciclo. En los motores Stirling la temperatura máxima del flujo de trabajo se alcanza en los tubos del calentador y esta debe llevarse hasta el punto que el material de estos tubos pueda

soportar. Entonces para mantener la máxima eficiencia posible se debe de tener la mayor temperatura permisible y así al variar la carga deseada en el motor, esta temperatura tendrá que variar de igual manera, siempre teniendo la máxima temperatura posible. Para hacer esto posible, debe de suministrarse la cantidad de calor adecuada o extraer el calor para lograr bajar la temperatura. De igual forma también es posible ajustar la velocidad del motor para que este transforme diferentes cantidades de calor en un determinado tiempo. Para cambiar la temperatura de operación se varió la irradiancia de 350 a 950 W/m<sup>2</sup> con lo cual se obtuvo una diferencia en la temperatura de 382.95 a 794.19 K y un cambio de potencia de 1810.5 W, con una diferencia en la eficiencia del 19.8% como se puede ver en la figura 2.5. Se observa que se pudiera tener un gran control en la potencia de salida si se pudiera controlar el calor entregado al sistema, sin embargo poder hacer esto con precisión es muy complicado, debido a que cualquier desviación en un parámetro de control del calor suministrado, ocasionarían una variabilidad grande en la potencia del motor.

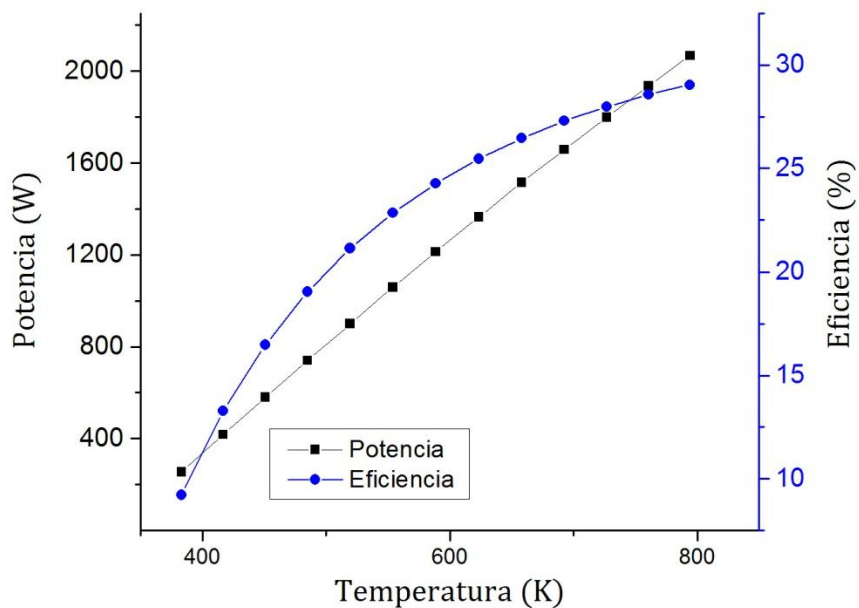


Figura 2.5. Variación de la temperatura

- Control de la presión media.- La variación de la presión media del fluido de trabajo es la forma más conocida y utilizada para el ajuste de la potencia en motores Stirling (*Walker, 1980*), debido a que la potencia de un motor es directamente proporcional a la presión de trabajo. Por lo que al ajustar la presión media del fluido de trabajo por un medio externo, se puede controlar la potencia desarrollada por el motor. La forma más sencilla de hacer esto es retirando masa de trabajo para reducir la potencia y reabastecer el flujo de trabajo para aumentarla.

Se realizaron diferentes simulaciones variando la presión media de 2.22 hasta 7 MPa por medio del control del fluido de trabajo que se encuentra dentro del sistema. Es decir se simuló el sistema trabajando con diferentes cantidades de masa variando esta de 6 a 22 gr, logrando obtener una variación de la potencia del 52.28% pudiendo variarla desde 2065.6 hasta 985.7 W como se muestra en la figura 2.6.

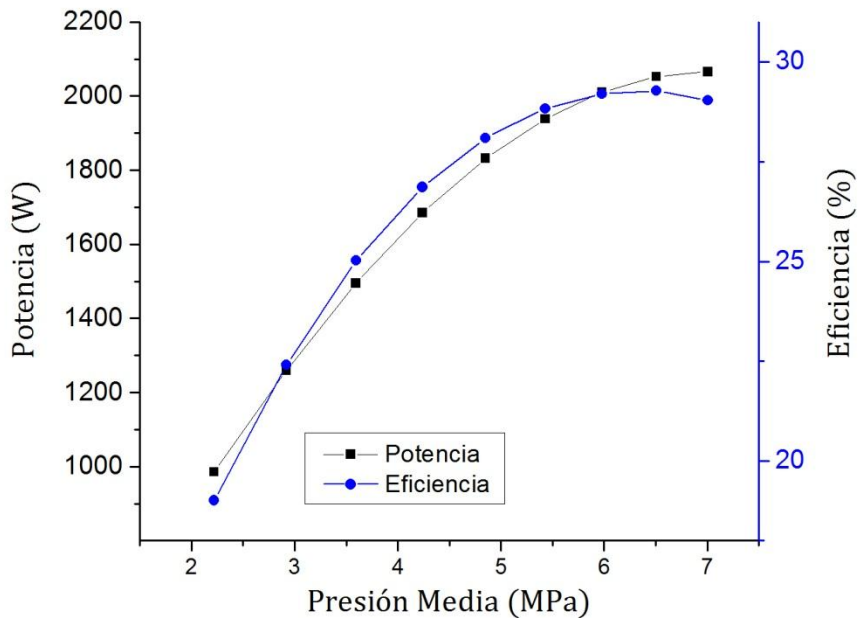
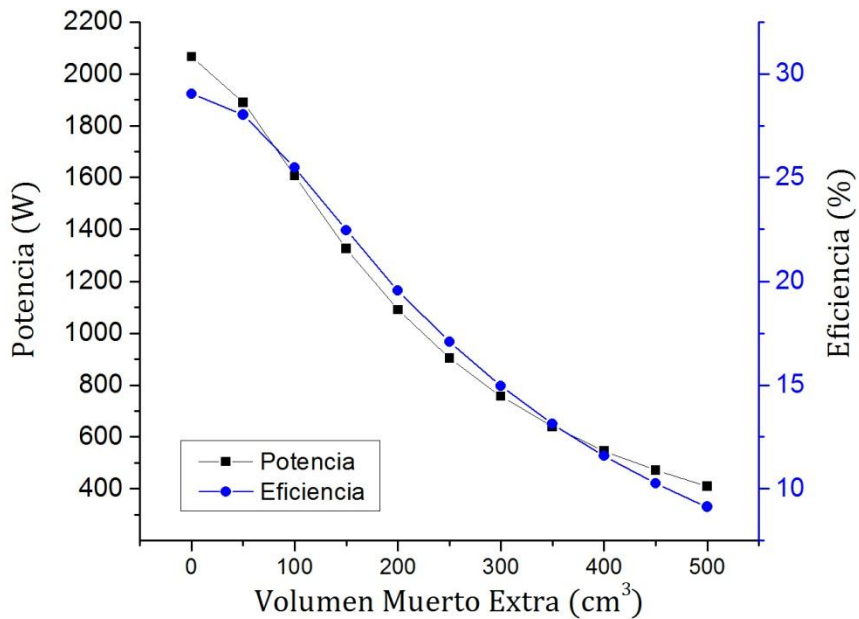


Figura 2.6. Variación de la presión media

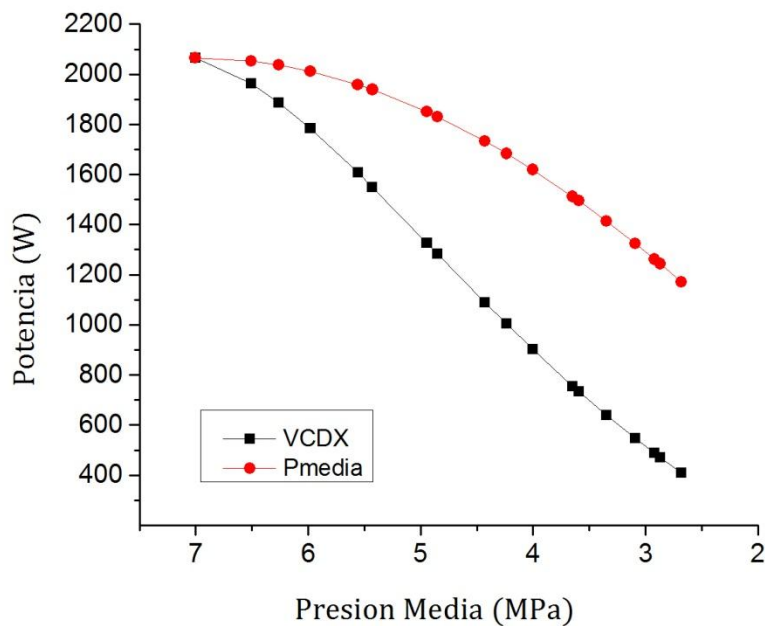
- Variación de volumen muerto.- Se considera el volumen muerto en un motor Stirling a la cantidad de volumen de fluido de trabajo en los espacios muertos del motor (*Kongtragool, 2005*). La masa contenida dentro de los intercambiadores de calor impide que la totalidad de la masa contenida en el motor efectúe los procesos que se requieren. Debido a esto, se define como volúmenes muertos a los volúmenes que contienen fluido de trabajo y que se encuentran fuera de los volúmenes barridos por los pistones. El control de la potencia del motor puede lograrse mediante la variación del volumen donde se aplicará la presión de trabajo, pudiendo agregarse este volumen en los cilindros o en los intercambiadores de calor. Para reducir la potencia, se puede agregar cierto volumen extra al espacio de trabajo con lo cual decrecerá la relación de compresión  $V_{\max}/V_{\min}$ , que al mismo tiempo reduce la amplitud de las variaciones de la presión.

Para reducir la potencia del motor se varió desde 0 hasta 500 cm<sup>3</sup> con lo cual se obtuvo un cambio de 2065.6 hasta 409.52 W lo que corresponde a un 80.17% la variación de potencia y una disminución de la eficiencia hasta un 19.9% como se puede observar en la figura 2.7.



**Figura 2.7. Variación del volumen muerto**

Al observar los resultados de las técnicas aplicadas se obtuvo que las técnicas más viables de utilizar, fueron las técnicas por presión media y volumen muerto. En la figura 2.8 se muestra la comparación de las presiones que se manejan mediante estas técnicas, con lo que se puede observar que el control por la técnica de volumen muerto en este motor, resulta de una forma más eficiente. Logrando conseguir con la técnica de volumen muerto una potencia de 410 W mientras que con la técnica de presión media una potencia de 1,171 W a una misma presión de trabajo de 2.68 MPa, mostrando entonces tener un mejor control de la potencia con el volumen muerto mediante una misma presión.



**Figura 2.8. Comparación de técnica VCDX y Pmedia**

Una vez obtenidos los resultados de cómo estas variables del sistema pudieran afectar a la potencia del motor, se estudian algunos dispositivos patentados, con el propósito de ver la factibilidad técnica de diseñar un nuevo dispositivo. Logrando obtener cuáles de ellos o con cual técnica se puede realizar el control de una manera sencilla, intentando lograr que el dispositivo a diseñar tenga la menor cantidad de piezas móviles, cause menores pérdidas y consuma la menor cantidad de energía posible. A continuación se muestran algunos dispositivos que fueron desarrollados para regular la potencia en motores Stirling que presentan directa o indirectamente la aplicación de las técnicas de control de las cuales se hicieron mención:

- *Stirling Engine Control System (Bennethum, 1971)*

Se muestra un modelo de control por presión media el cual consta de una reserva de gas y un compresor. Este sistema es para un motor de doble acción, donde se utiliza este tanque con fluido de trabajo el cual sirve para



almacenar la presión por medio del fluido, así como para abastecer al sistema durante la operación a una presión más alta. Sin embargo se ha visto que el uso de esta alta presión resulta como una gran desventaja debido a que para mantener el gas a esta presión se requiere una entrada de energía en el compresor relativamente alta, lo cual hace al sistema poco eficiente, así como un mecanismo complejo con muchas piezas móviles.

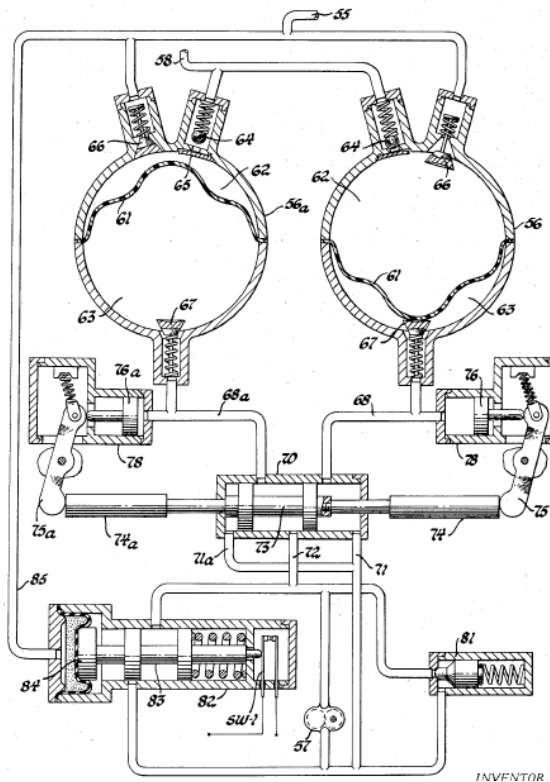


Figura 2.9. Esquema de patente US3'699,770

- *Power-Control System for Stirling Engines (Jaspers, 1975)*

Este sistema trabaja el control del motor Stirling mediante la regulación de la presión media del motor. Este sistema en vez de utilizar un compresor y una cámara de almacenamiento (como generalmente se utiliza), maneja una cámara con fuelle la cual en una parte contiene un gas azeotrópico, siendo una mezcla de metano y butano, el cual evapora y condensa dando la presión necesaria al sistema. Esta cámara se encuentra

conectada mediante un juego de válvulas con líneas de carga y descarga, donde en conjunto se logra tener un control adecuado del motor.

- *Idling Speed Control for Stirling Cycle Engine (Hakansson, 1974)*

Este dispositivo controla al motor por medio de adición de volumen muerto, mediante diferentes cámaras de distinto volumen conectadas a una cámara principal, cada una con una válvula solenoide las cuales van abriendo como sea necesario. Estas son válvulas de no retorno, haciendo así que todas las cámaras mantengan la presión correspondiente a la presión promedio al momento de estar cerradas.

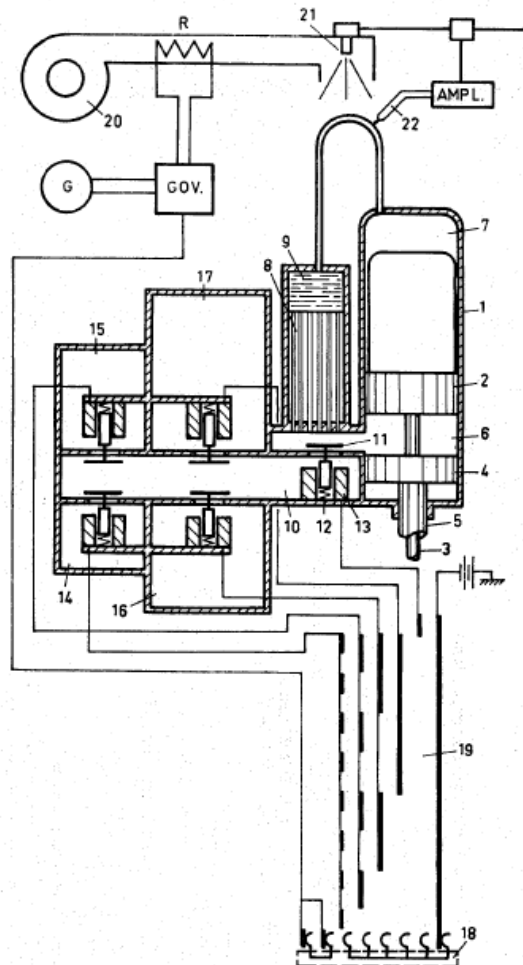


Figura 2.10. Esquema de patente US3'782,106

- *Speed and power control of an engine by modulation of the load torque (Ziph, 1999).*

Este sistema es capaz de controlar la velocidad y potencia del motor al cambiar el torque aplicado hacia este, es decir cuenta con una "carga" (motor-generator) utilizado como sistema de control, el cual varia ayudándole a entregar potencia o servir como freno hasta lograr entregar el torque y velocidad deseados. Este tipo de sistema no es muy conveniente de utilizar debido a cuestiones de costo y peso del sistema y al ser utilizado para controlar un sistema con fuente de calor variables, ocasionaría que estuviera el sistema de control trabajando constantemente, consumiendo una gran cantidad de energía.

- *Speed control valves for Stirling type hot gas engines (Bergman C. , 1975)*

El dispositivo cuenta con una cámara de volumen muerto variable conectada mediante una válvula, la cual nos da diferentes posiciones, abriendo cámaras de diferente tamaño según la presión que estemos manejando en el sistema. La cámara es controlada con 2 válvulas de no retorno y además una cámara grande de volumen muerto marcada con el (9), esto para poder trabajar en altas o bajas presiones que presente el sistema.

- *Stirling Engine Power Control (Fraser, 1983)*

Este sistema de control cuenta con un bypass y dos líneas conectadas, una entre el bypass y el cilindro y la otra entre el regenerador y enfriador, estas líneas se conectan mediante una válvula la cual permite o no, que el fluido pase por el calentador, provocando que la potencia disminuya hasta lograr obtener la potencia requerida.

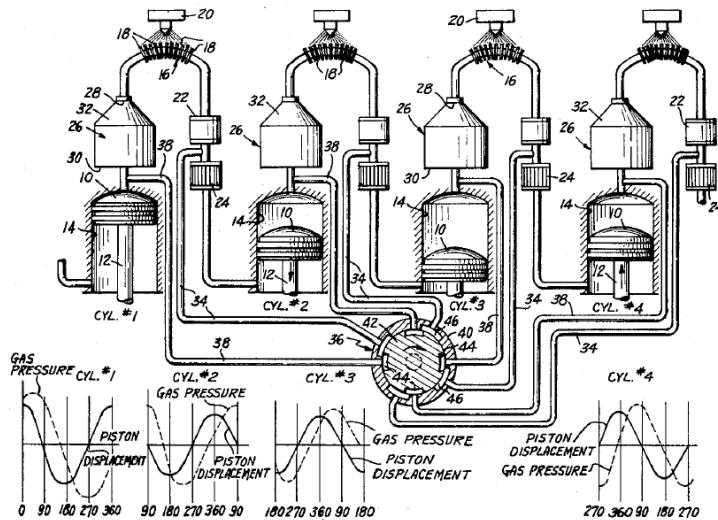


Figura 2.11. Esquema de patente US4'395,881

- *Stirling Engine Power Control Means (Bergman C. , 1975)*

La invención consta de un juego de válvulas y una cámara de almacenaje para el flujo de trabajo, donde al existir una presión mayor a la necesaria, los pistones bombean el fluido hacia el tanque, teniendo estos conductos válvulas de no retorno, y al ser necesario una válvula solenoide cambia de posición permitiendo el flujo del gas hacia la parte del enfriador, logrando aumentar hasta llegar a la presión media requerida para mantener una potencia constante.

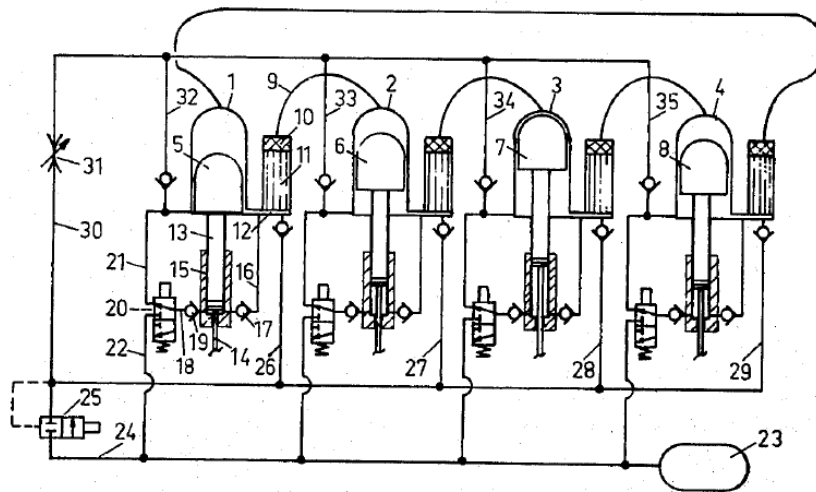


Figura 2.12. Esquema de patente US3'914,940

- *Stirling Engine Power Control and Motion Conversion Mechanism (Marks, 1983)*

El mecanismo incluye levas y palancas situadas en el cárter, por encima del cigüeñal, las cuales sirven para cambiar la carrera del pistón, así que para poder tener control sobre el torque entregado por la flecha, el sistema realiza los cambios suavemente variando la carrera del pistón. Como desventajas tiene el aumento de tamaño y peso del motor, así como componentes móviles que necesitan una mayor lubricación que el gas a utilizar pudiera brindar, por lo que el sistema requiere de una lubricación extra y un diseño más robusto.

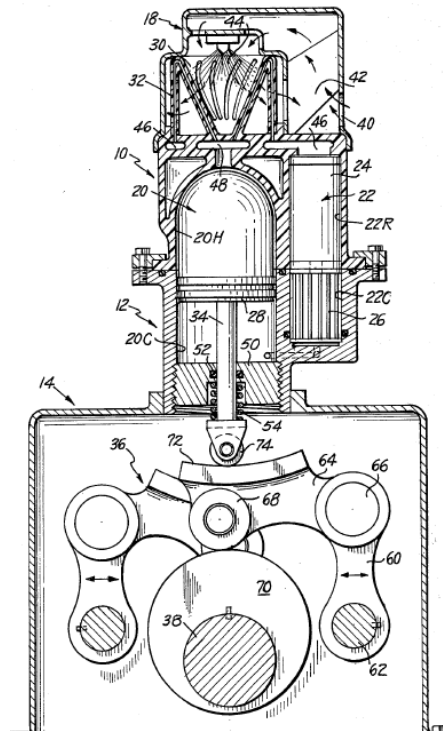


Figura 2.13. Esquema de patente US4'392,350

Al haber analizado estos dispositivos de control, se observa que los sistemas de control por volumen muerto son los que muestran un esquema más simple y aparentemente fácil de utilizar. A la vez, al tener

los resultados obtenidos del simulador, se puede ver que esta técnica de control es una de las que mejor respuesta tienen en el control de la potencia, pudiendo utilizar magnitudes no muy grandes de volumen muerto para controlar el motor Stirling.

Sin embargo en estos dispositivos no es posible controlar de una forma exacta la cantidad de volumen que se quiera agregar al sistema, debido a que al tener cámaras con un volumen establecido, al momento de abrir la válvula que gobierna una cámara en particular, el volumen total de la cámara será añadido al sistema (ver dispositivos de (Hakansson, 1974), (Anders, 1973)).

Por otra parte también se puede notar que cierta cantidad de fluido quedara atrapada al momento de cerrar una de estas cámaras y aunque estas válvulas son de tipo no retorno conectadas al sistema y suponiendo que el flujo de trabajo regresa al sistema general, no es posible saber qué cantidad de fluido quedaría atrapada. Esto debido a que la presión media del motor no es constante y al variar la presión, una diferente cantidad de masa quedaría en las cámaras, por lo que no es posible garantizar que esta técnica sea adecuada para controlar al motor.

Así que para poder trabajar con un dispositivo basado en esta técnica, es indispensable resolver esta problemática o tener una manera diferente de controlar el volumen muerto extra del sistema, cuestiones que se describen a detalle a continuación.

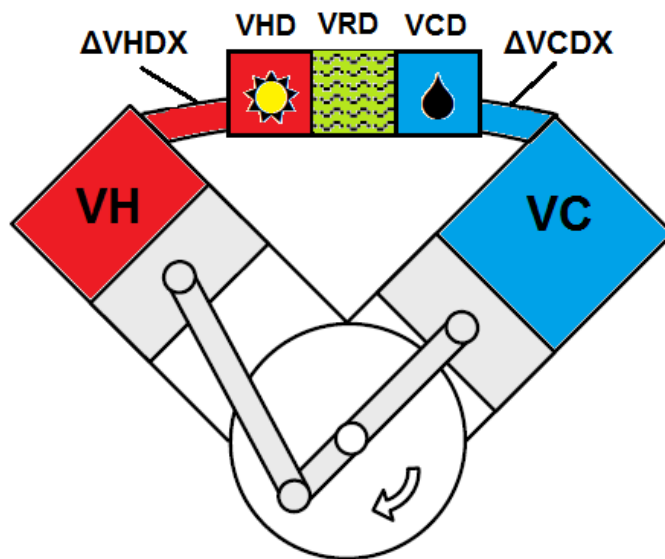
### **2.3 Técnica de control a implementar (VCDX)**

La técnica de control por volumen muerto fue una de las mejores técnicas para poder controlar la potencia de este motor, de una forma sencilla y con pocas partes móviles con respecto a otras técnicas. Es por esto que en este estudio se seleccionó esta técnica, sin olvidar las desventajas que se observaron al momento de analizar los dispositivos presentados (no tener

un manejo aceptable del fluido de trabajo en las cámaras así como no contar con una forma adecuada para devolverlo al sistema general).

Al requerir motores de mayor capacidad, las necesidades de suministro y remoción de calor demandan intercambiadores de calor (calentador VHD y enfriador VCD en figura 2.14) más grandes, los cuales aumentan el volumen y cantidad de masa del fluido de trabajo

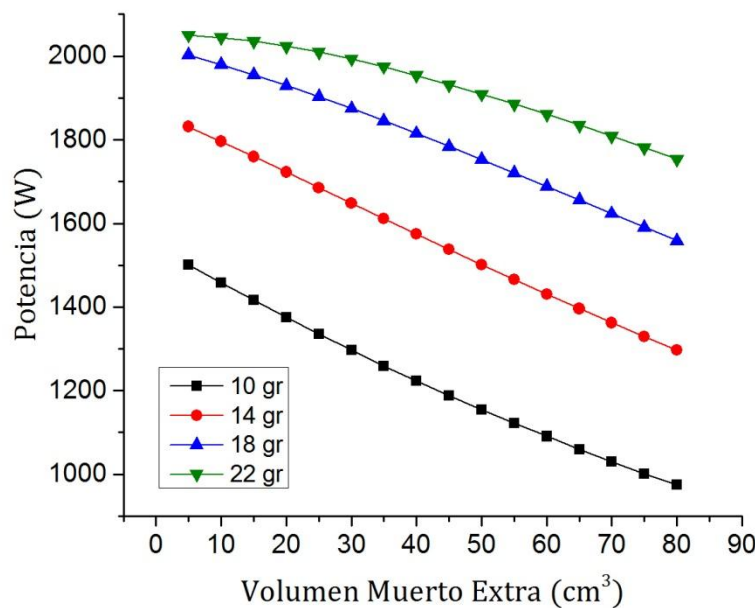
La figura 2.14 muestra esquemáticamente la distribución de los volúmenes que forman el circuito del fluido, donde el volumen total es dividido en tres secciones, calentador (H), regenerador (R) y enfriador (C), definiendo a VCDX como el volumen extra requerido por la "conexión" entre el enfriador del motor y el cilindro donde se comprime el gas a baja temperatura.



**Figura 2.14. Esquema de motor Stirling con volúmenes de trabajo**

Dentro de los intercambiadores de calor, el aumento de volumen muerto modifica el rendimiento del motor, no únicamente debido a la reducción de la masa que recorre el circuito, sino también por que disminuye la relación de expansión y compresión, disminuyendo las variaciones dentro del motor y como resultado el trabajo producido.

En la figura 2.15 podemos observar que para poder trabajar con cierto volumen muerto extra, es indispensable establecer primeramente la cantidad de fluido de trabajo con la cual se va a operar. Debido a que estos dos parámetros afectan directamente a la presión que se tiene dentro del motor. En el grafico se ven los cambios de potencia mecánica entregada por el motor suministrándole una cantidad de calor constante con una irradiancia de  $950 \text{ W/m}^2$ .



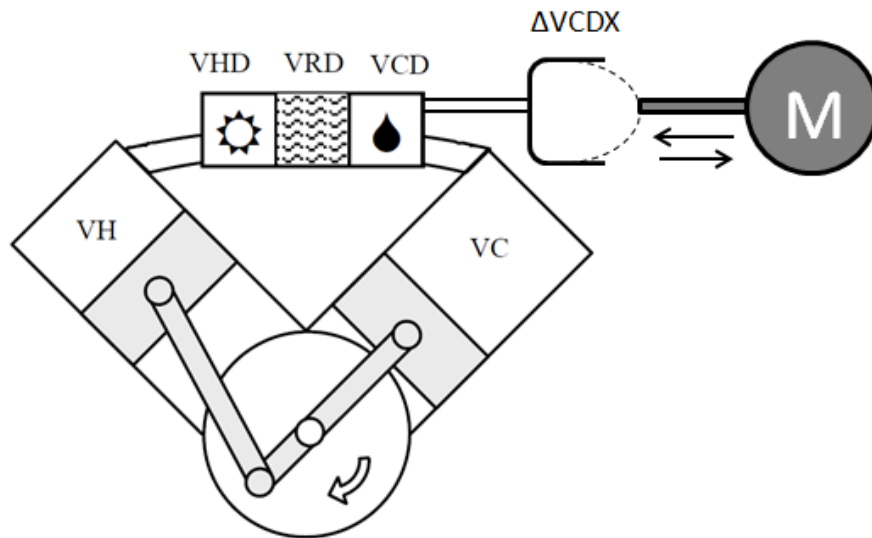
**Figura 2.15. Influencia de cantidad de fluido y volumen muerto**

Mostrando que para poder realizar un diseño que funcione adecuadamente será necesario establecer las condiciones que mejor se adapten para la operación del motor, determinando la cantidad de masa y velocidad de operación conforme a las irradiancias existentes.

Se contempla utilizar una cámara de volumen variable, comprendida por un diafragma y un actuador para proporcionar la cantidad deseada de volumen como se muestra esquemáticamente en la figura 2.16, logrando



evitar las desventajas que se observaron en otros dispositivos. El diseño y funcionamiento se mostrará en el capítulo 4.



**Figura 2.16. Esquema de motor Stirling y sistema de control**

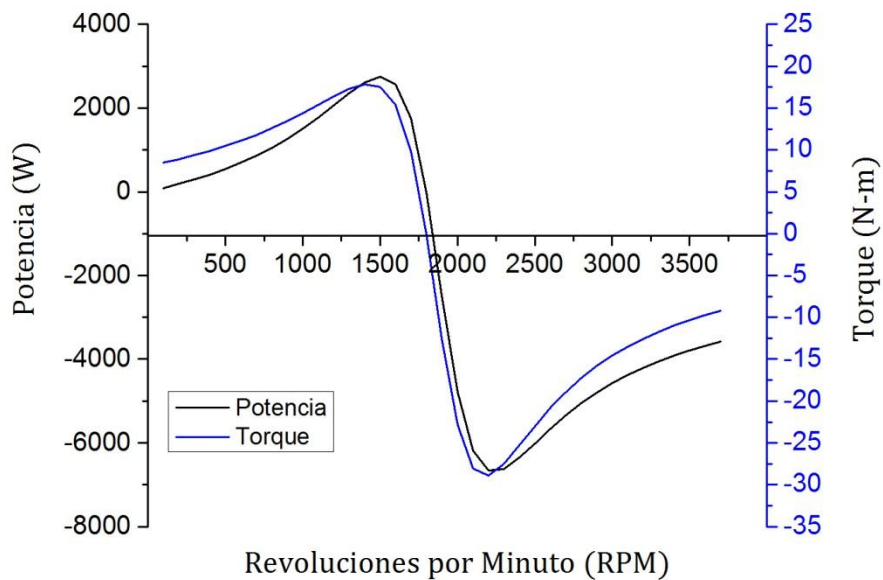
Una vez obtenido el método de control que se desarrollará, es necesario ver los límites o condiciones que se tienen para trabajar, conociendo en sí que magnitudes de potencia será necesario controlar y las características que necesita tener la potencia entregada por el motor Stirling en velocidad angular y torque. Por lo que se requiere conocer los requerimientos de potencia del generador eléctrico y los parámetros en que este entregaría la energía eléctrica.

## Generador Asíncrono

El generador asíncrono cuenta con múltiples virtudes al momento de utilizarse en sistemas de energía renovable o máquinas de velocidad variable debido a su fácil operación, la posibilidad de trabajar con velocidades fijas o variables así como en tiempos intermitentes o continuos debido a su construcción robusta, además de ser ligeros y bajo costo a comparación con otro tipo de generadores, lo cual lo hace más atractivo para una inversión inicial debido a que permite una amortización más pronta del sistema en general (Simões, 2008).

Los generadores de inducción generalmente son apropiados para sistemas pequeños ya que tienen la ventaja de proveer a una frecuencia casi contante con una velocidad variable.

En la figura 3.1 se muestra la curva característica de velocidad-torque, donde se puede observar que si un motor de inducción esta accionado a una velocidad mayor que la velocidad de sincronismo  $n_{sinc}$  por un motor primario externo, la dirección de su par inducido se invertirá y operará como generador. Así, al aumentar el par aplicado a su eje por el motor primario, se incrementa la cantidad de potencia producida por el generador de inducción hasta cierto límite (Chavez, 2007; Simões, 2008; Chapman, 2000).



**Figura 3.1. Curva característica de máquina de inducción**

La gran ventaja de un generador de inducción es su simplicidad, dado a que este no necesita un circuito de campo separado y no debe estar accionado continuamente a una velocidad fija. Mientras la velocidad de la maquina alcance algún valor mayor que  $n_{sinc}$ , este funcionará como generador en el sistema de potencia, así mientras mayor sea el par aplicado a su eje (hasta cierto punto), mayor será la potencia de salida resultante. Otra ventaja es que este tipo de generadores cuentan con una protección natural contra corto circuitos, lo cual ocurre cuando la carga de corriente se va por encima de ciertos límites, el magnetismo residual tiende a cero y el generador se desexcita.

Sin embargo el generador de inducción tiene algunas limitaciones ya que este no puede producir potencia reactiva, de hecho el generador de inducción consume potencia reactiva y por esto se le debe conectar una fuente externa de potencia reactiva todo el tiempo para poder mantener su campo magnético estático como se muestra en la figura 3.2. Esta fuente externa de potencia reactiva también debe controlar el voltaje en

los terminales del generador (sin corriente de campo, un generador de inducción no puede controlar su propio voltaje de salida). Normalmente el voltaje del generador es mantenido por el sistema de potencia externo al cual se encuentra conectado, pero la corrección del factor de potencia y voltaje se puede efectuar por capacitores, si este fuera el caso.

Como se mencionó, es posible que una máquina de inducción funcione como un generador de inducción auto-excitado (GIAE) o generador aislado, siempre y cuando haya capacitores disponibles para suministrar la potencia reactiva requerida por el generador y por las cargas conectadas a este (Chapman, 2000) como se muestra en la siguiente figura:

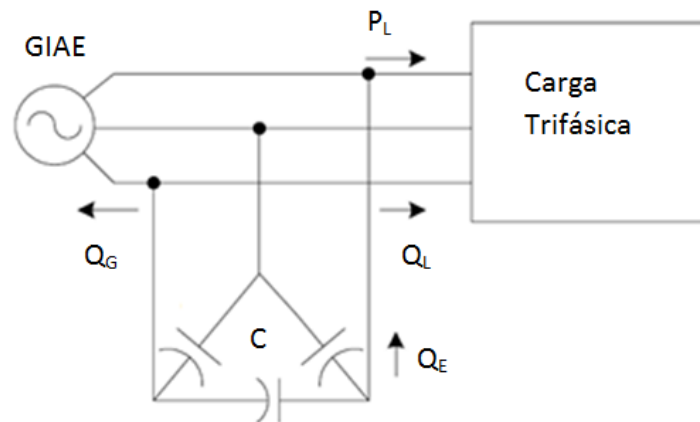


Figura 3.2. Generador de inducción aislado con banco de capacitores

### 3.2 Simulación Numérica de un Generador Asíncrono

Con la finalidad de poder observar el comportamiento que se pudiera tener al conectar el motor Stirling a un generador asíncrono y poder conocer las magnitudes o parámetros de la energía eléctrica generada, se incluyó en el simulador un modelo matemático para simular el comportamiento. Esto con el propósito de lograr diseñar un sistema de control que pueda regular adecuadamente el motor Stirling junto con el generador, otorgando al generador una potencia mecánica con las características necesarias para

que este produzca energía eléctrica con los requerimientos necesarios para su interconexión a la red.

El simulador numérico considera el modelo de circuito equivalente, curvas de magnetización y el proceso de autoexcitación. Que al variar los parámetros suministrados por el motor Stirling de torque, velocidad y capacitancia, se pueden obtener como respuesta la eficiencia, voltaje, frecuencia y potencia eléctrica entregada por el generador.

El sistema de ecuaciones que comprende el algoritmo fue programado en Matlab™, trabajando en conjunto con el simulador numérico del sistema Disco-Stirling descrito anteriormente, para obtener las variables mencionados de la energía eléctrica en estado estable.

A continuación se muestra como realizar la determinación de los parámetros del generador así como las pruebas de laboratorio necesarias para poder caracterizar correctamente un generador asíncrono, describiendo como se llega a los resultados obtenidos.

### *3.1.1 Determinación de los Parámetros del Circuito Equivalente*

El circuito equivalente de un motor de inducción es una herramienta con la cual se puede determinar la respuesta que tendrá el motor o generador de inducción a los cambios de carga que pudieran existir. Sin embargo, para poder conocer estos comportamientos es indispensable determinar los valores de  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $X_1$ ,  $X_2$ , y  $X_M$ .

Para poder conocer estas magnitudes es necesario realizar una serie de pruebas al motor de inducción, semejantes a las pruebas de cortocircuito y de circuito abierto realizadas en un transformador. Para obtener estos parámetros es necesario realizar tres pruebas (ver Apéndice I):

-Prueba de Vacío.

-Prueba de CD para determinar la resistencia del estator.

-Prueba de rotor bloqueado.

Es importante recalcar que es imprescindible realizar estas pruebas de laboratorio para cualquier máquina de inducción con la que se quiera trabajar dado a que estos parámetros antes mencionados son los que describen el comportamiento que tendrá el generador.

### *3.2.1 Curvas de Magnetización y Autoexcitación*

La corriente de magnetización  $I_m$  es indispensable para describir la operación del generador de inducción, siendo esta la que determina la tensión suministrada por el sistema. Esta se puede obtener alimentando al generador como un motor de inducción sin carga y midiendo la corriente en función de la variación del voltaje terminal. Esta curva empieza con el valor del magnetismo residual existente sin pasar por él ninguna corriente.

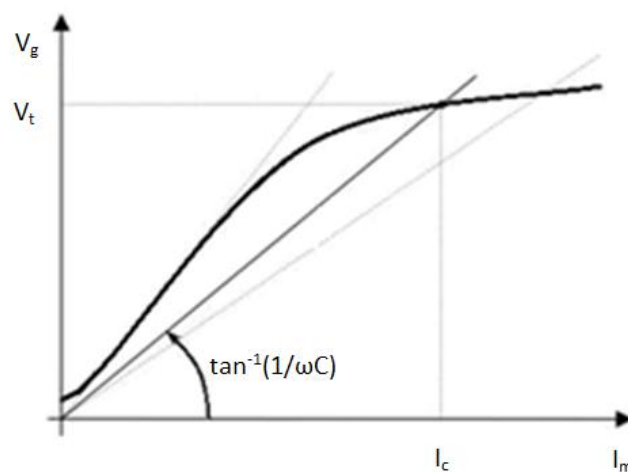
La curva de magnetización, está relacionada directamente con la calidad del hierro, dimensiones básicas, geometría general y devanado de la bobina. En otras palabras, las características del generador de inducción determinan la tensión del terminal para una corriente de magnetización dada a través de los devanados.

La autoexcitación se causa con el magnetismo residual en el hierro que produce un pequeño voltaje el cual provoca una corriente capacitiva. Esta corriente entonces, produce un aumento de voltaje que provoca un mayor incremento de la corriente capacitiva y así sucesivamente, hasta la saturación del campo magnético del hierro.

Para el funcionamiento como un generador autónomo, este debe de conectarse a un banco de capacitores trifásico. Como la curva de excitación (figura 3.3), la reactancia capacitiva será una línea recta que pasa a través de cero y está dada por:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (3-1)$$

El valor de  $C$  se puede elegir para una rotación dada de tal manera que la línea recta de la reactancia capacitiva intercepte la curva de magnetización en el punto del voltaje nominal deseado ( $V_{nominal}$ ). Esto significa que la intersección de estas dos líneas es el punto en el que la potencia reactiva necesaria del generador se suministra sólo por los capacitores. Después de esto, para llevar a cabo el proceso de excitación, este valor debe estar entre la pendiente de la línea recta que pasa a través del origen y la tangente a la parte más pendiente de la curva de excitación, que también pasa por el origen. La corriente que corresponde al punto de intersección no deberá ser muy superior a la corriente nominal de la máquina como se puede observar en la figura 3.3.



**Figura 3.3. Curva de magnetización de un generador de inducción**

La variación de la inductancia de magnetización es el factor principal en el proceso de aumento y estabilidad de voltaje en la operación del generador de inducción autoexcitado. Debido a que la inductancia de magnetización  $L_m$  se derivan de la relación entre el voltaje del entrehierro  $V_g$  y la corriente de magnetización  $I_m$ , como resultado se tienen funciones no lineales.

En la literatura se han mostrado otras formas de relacionar el voltaje del entrehierro y la corriente de magnetización. La forma más aceptable es mediante la utilización de la ecuación no lineal:

$$V_g = FI_m(K_1 e^{K_2 I_m^2} + K_3) \quad (3-2)$$

Dónde:

$K_1$ ,  $K_2$ , y  $K_3$  - Son constantes a determinar para estimar la característica de magnetización.

$V_g$  - Es el voltaje del entrehierro a través de la reactancia de magnetización.

$F$  -Es la frecuencia *p.u.* definida como:

$$F = \frac{f}{f_{base}} \quad (3-3)$$

Dónde:

$f$  -Es la frecuencia del rotor.

$f_{base}$  -Es la frecuencia de referencia usada en las pruebas para obtener la curva de excitación (usualmente 60 Hz por la red de distribución).

En este caso, la reactancia de magnetización puede ser obtenida como:

$$X_m = \omega L_m = \frac{V_g}{I_m} = F(K_1 e^{K_2 I_m^2} + K_3) \quad (3-4)$$

Con esto, para obtener los valores de  $K_1$ ,  $K_2$  y  $K_3$  y la curva de magnetización es necesario tomar tres mediciones y así poder calcularlas, teniendo los valores adecuados del voltaje y corriente. De las tres mediciones del voltaje en las terminales del generador sin carga ( $V_g$ ) y la corriente de magnetización ( $I_m$ ), siendo esta la corriente suministrada por el banco de capacitores, con lo que se tendrá:

$$\begin{aligned} V_{g1} &= (K_1 e^{K_2 I_{m1}^2} + K_3) I_{m1} \\ V_{g2} &= (K_1 e^{K_2 I_{m2}^2} + K_3) I_{m2} \\ V_{g3} &= (K_1 e^{K_2 I_{m3}^2} + K_3) I_{m3} \end{aligned} \quad (3-5)$$



Así en la tabla 3.1 se muestra las fórmulas de una forma resumida con las cuales se pueden tener muy buenas aproximaciones para la determinación de las constantes K.

**Tabla 3.1. Determinación de Constantes K**

Medición	Corriente medida	Voltaje medido	$X_m$	Fórmulas para K's
<b>1</b>	$I_{m1} = I_{m1}$	$V_{g1}$	$a = \frac{V_{g1}}{I_{m1}}$	$K_1 = (c - K_1) \left( \frac{a - b}{b - c} \right)^{\frac{49}{24}}$
<b>2</b>	$I_{m2} = 5I_{m1}$	$V_{g2}$	$b = \frac{V_{g2}}{I_{m2}}$	$K_2 = \frac{49 \ln \left( \frac{b - c}{a - b} \right)}{24 I_{m3}^2}$
<b>3</b>	$I_{m3} = 7I_{m1}$	$V_{g3}$	$c = \frac{V_{g3}}{I_{m3}}$	$K_3 = \frac{b^2 - ac}{2b - (a + c)}$

La curva de excitación representada por la ecuación 3-4 puede ser usada para conocer el voltaje final del generador de inducción como función de la capacitancia de excitación. Para esto, el punto de intersección entre la línea recta de  $V_t = I_t/F\omega C$  y la curva de excitación puede ser determinado sustituyendo  $I_m$  en la ecuación 3-4 por  $I_t = F\omega CV_t$  para así obtener:

$$\frac{1}{\omega C} = F^2 \left( K_1 e^{k_2(\omega C F V_t)^2} + K_3 \right) \quad (3-6)$$

Expresando la ecuación en términos de  $V_t$  se tiene:

$$V_t = \frac{1}{\omega C F \sqrt{K_2}} \sqrt{\ln \left( \frac{1}{\omega C F^2 K_1} - \frac{K_3}{K_1} \right)} \quad (3-7)$$

Esta ecuación impone el límite existente de  $V_t$  el cual es:

$$\frac{1}{\omega C F^2 K_1} > \frac{K_3}{K_1} \quad o \quad C < \frac{1}{\omega F^2 K_3} \quad (3-8)$$

### 3.2.2 Descripción Matemática del Proceso de Autoexcitación.

La descripción matemática del proceso de autoexcitación puede basarse en el modelo del circuito de Doxey, el cual se muestra en la figura 3.4 y es un

modelo clásico para representar la máquina de inducción en estado estable, debido a que la impedancia de excitación es mucho más grande que cualquier impedancia de los devanados, además que por simplicidad se muestran de forma separada las resistencias, pérdidas y la carga como se muestra en la figura 3.4.

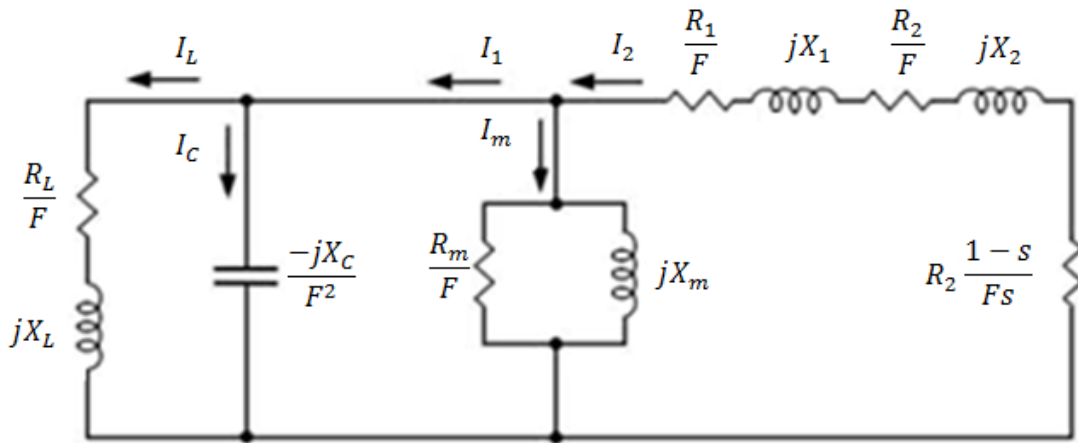


Figura 3.4. Modelo clásico simplificado por fase del generador

Otra manera de representar este modelo se muestra en la figura 3.5, donde el circuito de carga está en paralelo, separado de las resistencias y reactancias del sistema.

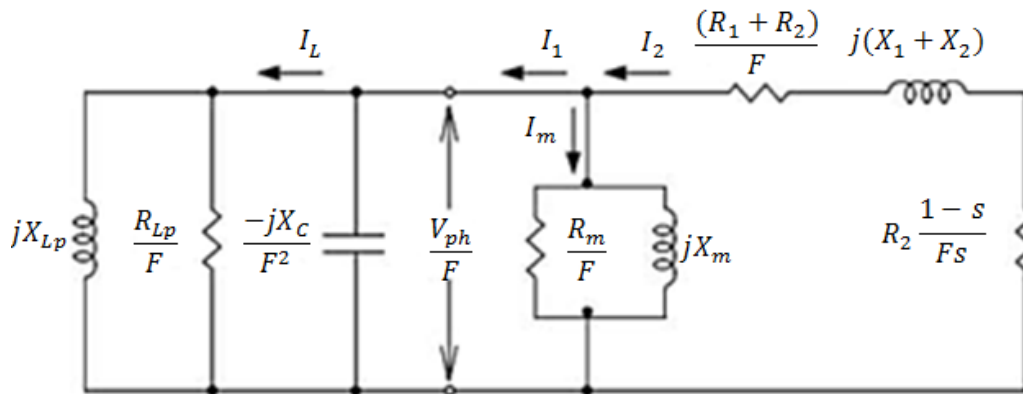


Figura 3.5. Circuito equivalente con carga en paralelo

Las pérdidas del núcleo son representadas por  $R_m$  las cuales son las pérdidas por histéresis, corrientes parasitas y resistencia al aire, las cuales

no tienen nada que ver con alguna carga aplicada, pero si son totalmente dependientes de factores como la temperatura, voltaje y frecuencia. Este parámetro se puede medir haciendo girar al motor asíncrono a su velocidad síncrona ( $S=0$ ) lo que permite separar las pérdidas mecánicas de las pérdidas totales, midiendo la potencia activa por fase  $P_0$ , voltaje por fase  $V_0$  y corriente por fase  $I_0$  teniendo que:

$$R_m = \frac{V_0^2}{P_0 - I_0^2 R_1} \quad (3-9)$$

Considerando que una impedancia de carga en serie  $Z$  puede ser transformada a su configuración en paralelo de la siguiente forma:

$$Z = R_s + jX_s = \frac{jX_p R_p}{R_p + jX_p} = \frac{R_p X_p^2 + jX_p R_p^2}{R_p^2 + X_p^2} \quad (3-10)$$

Dónde:

$$R_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{R_s} = \frac{|Z_s|^2}{R_s}; \quad X_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{X_s} = \frac{|Z_s|^2}{X_s} \quad (3-11)$$

Así, para  $\frac{Z_L}{F}$  se tiene:

$$\frac{Z_L}{F} = \frac{R_L}{F} + jX_L = \frac{jX_{LP} \frac{R_{LP}}{F}}{jX_{LP} + \frac{R_{LP}}{F}} \quad (3-12)$$

Las ecuaciones 4.2 y 4.3 nos permiten determinar el ángulo de potencia de la carga como:

$$\theta_L = \tan^{-1} \left( \frac{FX_L}{R_L} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{R_{LP}}{FX_{LP}} \right) \quad (3-13)$$

También de las ecuaciones 3.11 y 3-12 se puede demostrar que:

$$R_{LP} = \frac{|Z_L|^2}{FR_L} \quad X_{LP} = \frac{|Z_L|^2}{F^2 X_L} \quad P_L = \frac{V_{ph}^2}{FR_{LP}} = \frac{V_{ph}^2}{|Z_L|^2} R_L \quad (3-14)$$

Dónde:  $P_L$  es la potencia de salida o de la carga.

Con lo anterior el modelo del circuito de Doxey de la figura 3.5 queda simplificado al circuito de la figura 3.6 y las ecuaciones 3-15 y 3-16 representan a  $X_p$  y  $R_p$  respectivamente.

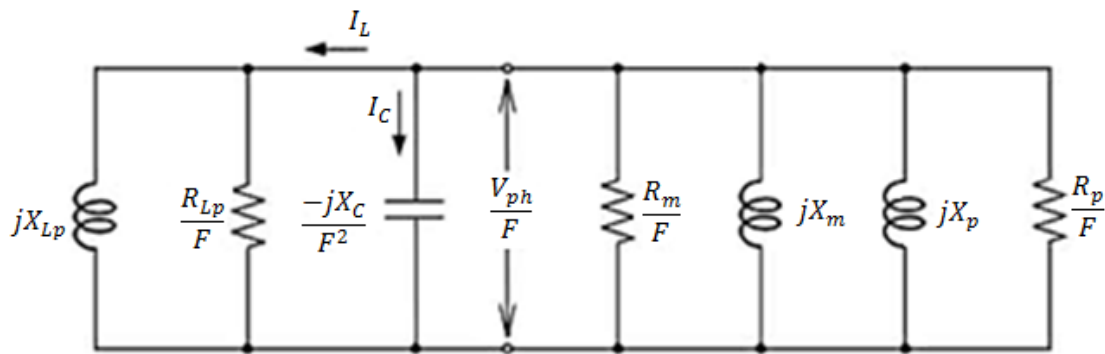


Figura 3.6. Modelo simplificado de Doxey

$$X_p = \frac{\left(\frac{R_1}{F} + \frac{R_1}{F_s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}{X_1 + X_2} \quad (3-15)$$

$$R_p = \frac{\left(\frac{R_1}{F} + \frac{R_1}{F_s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}{R_1 + R_2/S} \quad (3-16)$$

Teniendo la inductancia en paralelo de  $X_{LP}$  con  $X_C$ , la reactancia inductiva de la carga entonces disminuye el valor de la capacitancia efectiva de excitación, este valor se puede estimar con la siguiente ecuación:

$$C_{ef} = C - \frac{L}{R_L^2 + (\omega_s L)^2} \quad (3-17)$$

Para valores pequeños de la inductancia de la carga  $L$  no se aprecia una influencia en gran medida en la capacitancia efectiva de excitación, sin embargo para un valor alto de  $L$  el efecto sobre la capacitancia de excitación es tal que puede provocar un colapso en el voltaje generado. Lo positivo de eso es que una resistencia de carga pequeña lo que sería el caso ante una sobrecarga o una resistencia cero durante un cortocircuito, entonces ocurriría una descarga rápida del capacitor de excitación con lo cual se lograra protección contra altas corrientes y cotos circuitos.

Para poder evaluar el desempeño del generador es necesario considerar las cargas activas y reactivas, siendo las potencias activas, la potencia que entra al circuito eléctrico proveniente de la maquina primaria, en este caso el motor Stirling que es el que acciona el generador asíncrono, así para las

sumas algebraicas de las potencias activas y reactivas en el circuito de la figura 3.6 son:

$$I_2^2 R_2 \left( \frac{1-s}{s} \right) + I_2^2 (R_1 + R_2) + \frac{V_{ph}^2}{R_m} + \frac{V_{ph}^2}{R_{LP}} = \sum P = 0 \quad (3-18)$$

$$\frac{V_{ph}^2}{X_p} + \frac{V_{ph}^2}{X_m} - \frac{V_{ph}^2}{X_c} + \frac{V_{ph}^2}{X_{LP}} = \sum Q = 0 \quad (3-19)$$

Dónde:

$$X_m = \omega_s L_m \quad (3-20)$$

El primer término de la ecuación 3-18 es la energía mecánica suministrada al generador, dividiendo esta ecuación entre  $I_2^2$  se logra simplificar de la siguiente manera:

$$\frac{R_2}{s} + R_1 + \frac{V_{ph}^2}{I_2^2} \frac{1}{R_{mL}} = 0 \quad (3-21)$$

Dónde:

$$\frac{1}{R_{mL}} = \frac{1}{R_m} + \frac{1}{R_{LP}} \quad (3-22)$$

De la figura 3.6 se tiene:

$$\frac{V_{ph}^2}{F^2 I_2^2} = \left( \frac{R_2}{F_s} + \frac{R_1}{F} \right)^2 + (X_1 + X_2)^2 \quad (3-23)$$

Entonces la ecuación 3-21 queda:

$$\frac{R_2}{s} + R_1 + \left[ \left( \frac{R_2}{s} + R_1 \right)^2 + F^2 (X_1 + X_2)^2 \right] \frac{1}{R_{mL}} = 0 \quad (3-24)$$

Ó

$$\left( \frac{R_2}{s} + R_1 \right) R_{mL} + \left( \frac{R_2}{s} + R_1 \right)^2 + F^2 (X_1 + X_2)^2 = 0 \quad (3-25)$$

Si los parámetros son constantes, la ecuación 3-25 es de segundo grado, el valor correspondiente de  $s$  para las condiciones de potencia de entrada y potencia de salida entregada puede ser calculada como:

$$s = \frac{2R_2}{-2R_1 - R_{mL} \pm \sqrt{R_{mL}^2 - 4F^2(X_1 + X_2)^2}} \quad (3-26)$$

Considerando el caso práctico de que  $s$  depende de la resistencia de carga y teniendo en cuenta que  $X_1+X_2$  es pequeño, la carga  $R_{mL}$  tendría poca influencia en  $s$ , que no puede ser el caso. Por lo tanto, es conveniente algunas veces aproximar la ecuación 3-26 asociándola a la ecuación 3-21 para obtener la siguiente expresión:

$$s \cong -\frac{R_2}{R_1 + R_{mL}} = -\frac{R_2(R_m + R_{Lp})}{R_1R_m + R_1R_{Lp} + R_mR_{Lp}} \quad (3-27)$$

Es necesario un proceso numérico o iterativo cuando usamos la ecuación 3-26 en lugar de la ecuación 3-27 ya que  $F$  depende de  $\omega_s$  y esta de  $s$ .

La regulación de voltaje también depende de la variación de  $X_m$ , donde su valor se obtiene despejando de la ecuación 3-19, es decir:

$$X_m = \frac{1}{F^2\omega_s C - \frac{1}{X_p} - \frac{1}{X_{Lp}}} \quad (3-28)$$

La eficiencia puede ser estimada por:

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} = \frac{P_{entrada} - P_{perdida}}{P_{entrada}} \quad (3-29)$$

Si se considera que la potencia de entrada es la potencia mecánica la cual es representada por  $R_1+R_2$  y  $R_m$ , de la ecuación 4.7 se deduce que la potencia trifásica de salida es:

$$P_{out} = P_{in} - P_{losses} = 3I_2^2 R_2 \frac{1-s}{s} + 3I_2^2 (R_1 + R_2) + \frac{3V_{ph}^2}{R_m} = -\frac{3V_{ph}^2}{R_{LP}} \quad (3-30)$$

Dónde:

$$P_{in} = 3I_2^2 R_2 \frac{1-s}{s} \quad (3-31)$$

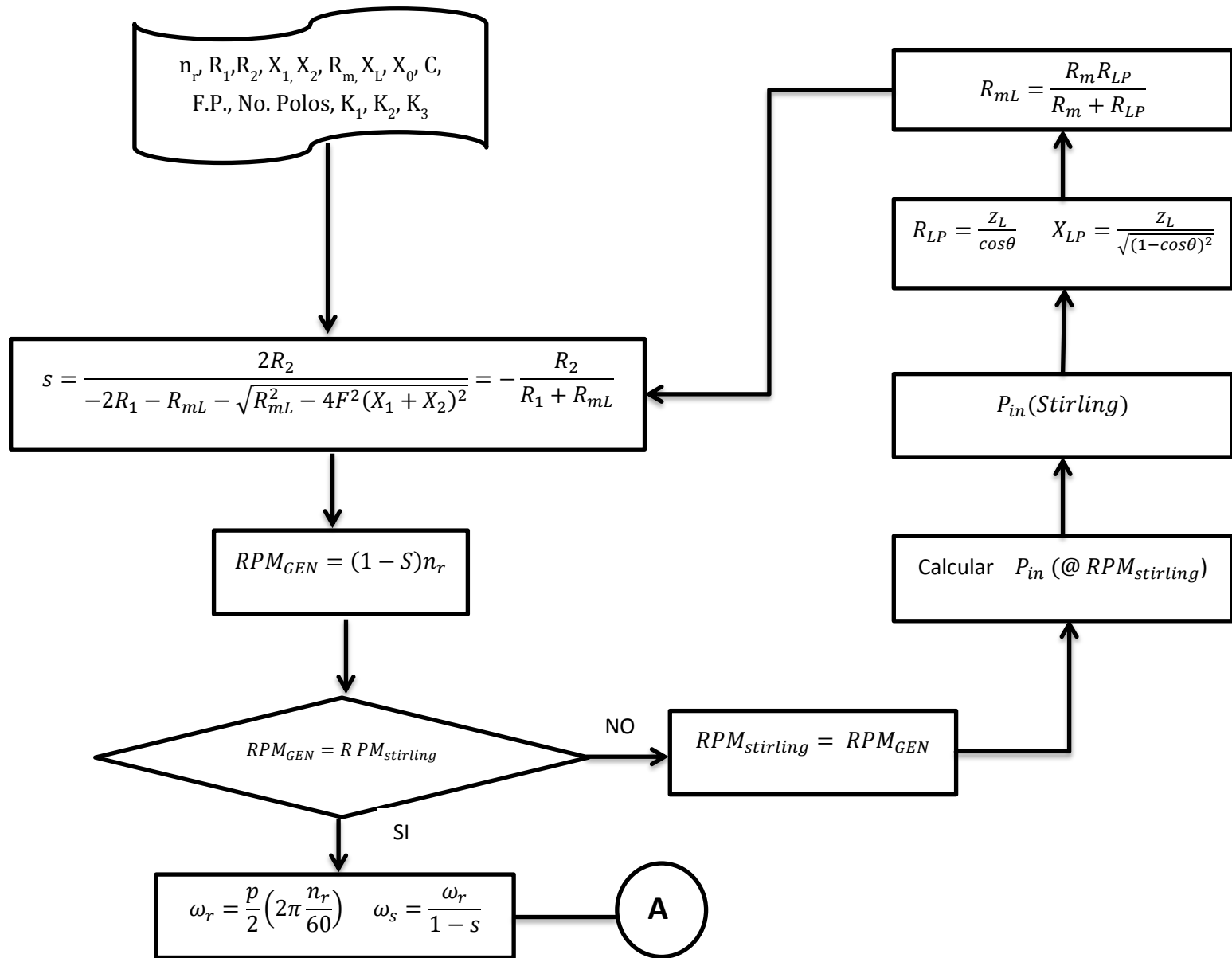
Usando estos valores en la ecuación 4.15 y simplificando se tiene:

$$\eta = \frac{I_2^2 R_2 \frac{1-s}{s} + I_2^2 (R_1 + R_2) + \frac{V_{ph}^2}{R_m}}{I_2^2 R_2 \frac{1-s}{s}} \quad (3-32)$$

Dividiendo el numerador y el denominador de la ecuación 3-32 por  $I_2^2$  y usando la ecuación 3-23, obtenemos:

$$\eta = \frac{\left(\frac{R_2}{s} + R_1\right) + \frac{1}{R_m} \left[\left(\frac{R_2}{s} + R_1\right)^2 + F^2 (X_1 + X_2)^2\right]}{R_2 \frac{1-s}{s}} \quad (3-33)$$

Al haber escogido un generador de inducción en particular y teniendo su ficha técnica es posible conocer sus parámetros del circuito equivalente ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $X_1$ ,  $X_2$ , y  $X_M$ ) mediante las pruebas descritas anteriormente y al aplicarle la potencia reactiva deseada, se puede observar el comportamiento en estado estable que este tendría. Por lo cual se procedió a realizar el algoritmo de la figura 3.7, con la operación de dicho generador de inducción autoexcitado, conectándolo al motor Stirling para que le proporcione la potencia activa que este requiera, logrando observar cómo serán sus características de entrega de la energía eléctrica generada.





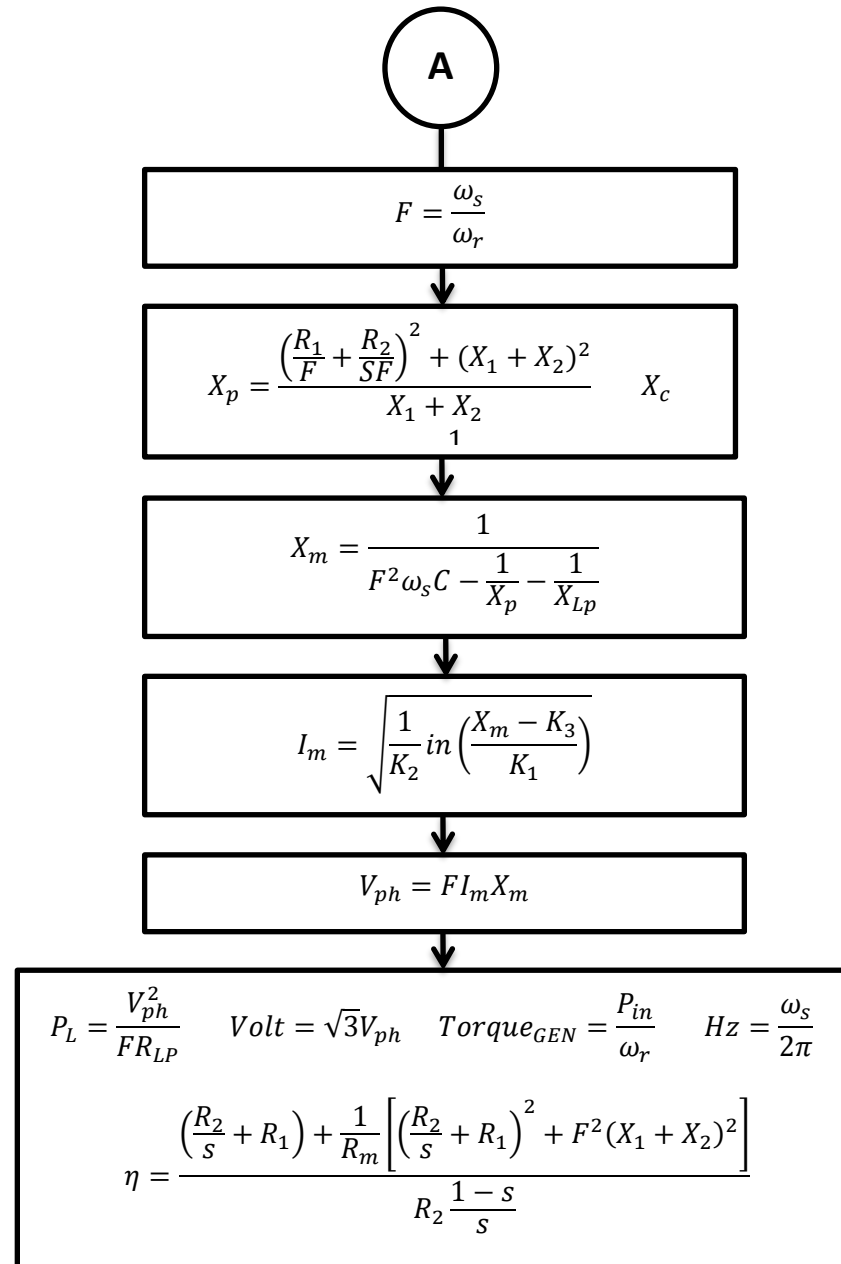


Figura 3.7 Diagrama de flujo de funcionamiento sistema Disco-Stirling con GIAE

### 3.3 Requisitos de Interconexión para Sistemas de Energía Renovable

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) tiene gran interés hacia el desarrollo sustentable y por consiguiente al desarrollo de tecnologías que impulsen las energías renovables, dado que esto apoya al mismo aprovechamiento de estas fuentes de energía en nuestro país, ayudando a que exista una diversificación de la generación de energía eléctrica. Las energías renovables permiten disminuir la dependencia de los hidrocarburos y ayudan al desarrollo de regiones rurales donde existan fuentes potenciales de energía de este tipo, entre otros muchos beneficios más. Es por lo que la CFE pone a disposición su infraestructura así como los requerimientos necesarios para la interconexión. En este caso se tienen algunos requerimientos básicos (CFE, 2012), para regular la instalación de sistemas de energías renovables de sistemas de pequeña escala ( $\leq 10$  kW).

Se tiene que los límites permitidos tanto de voltaje como de frecuencia, indican que para que una fuente de energía distribuida pueda estar interconectado al Sistema Eléctrico Nacional, es necesario mantener la frecuencia en un rango de 59.3 a 60.5 Hz y un desbalance máximo en la tensión nominal del  $\pm 5\%$ . El cual en el caso particular donde el voltaje del generador propuesto brinda un voltaje nominal trifásico de 460 V, representa una caída permitida de hasta 437 V aproximadamente.

### 3.4 Selección de Generador de Inducción

En la tabla 3.2 se muestran los parámetros del circuito equivalente y las constantes  $K$  de una máquina de inducción. El motor analizado es un motor de 3 kW, voltaje por fase 220 V, una frecuencia de 60 Hz, 4 polos y una velocidad nominal de 1800 rpm.

**Tabla 3.2. Parámetros de Generador de Inducción (Simões, 2008)**

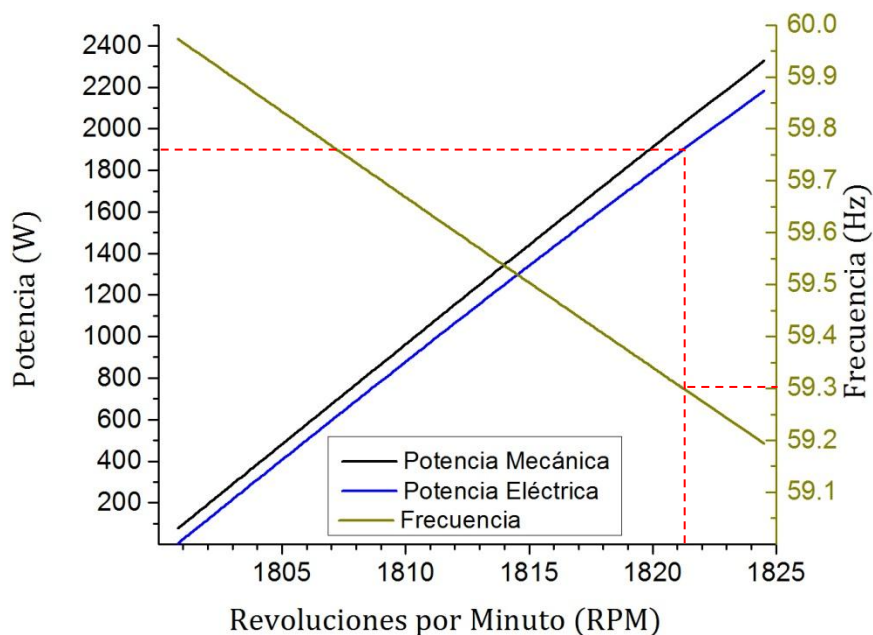
Parámetros del Circuito Equivalente		
R1 = 0.575 $\Omega$	X1 = 1.3074 $\Omega$	K1 = 11.88
R2 = 0.404 $\Omega$	X2 = 1.3074 $\Omega$	K2 = -0.002202
Rm = 962.5 $\Omega$	F.P. = 1	K3 = 7.68

Se eligió caracterizar el comportamiento del generador de esta capacidad, controlándolo con la carga reactiva suministrada para obtener una potencia eléctrica de salida de cerca de los 2 kW, potencia que el motor Stirling analizado puede brindar trabajando a condiciones aceptables.

Al tener estos datos e implementarlos en el algoritmo mostrado en la figura 3.7 es posible observar el comportamiento del generador al conectarse al sistema Disco-Stirling en estado estable, siendo este el que le brinde la potencia mecánica necesaria para generar la energía eléctrica requerida, logrando obtener el comportamiento de ambos dispositivos interconectados.

Para obtener la potencia eléctrica aproximada de 2 kW dentro de los límites de CFE como un sistema aislado, se contempla un banco de capacitancias con 240  $\mu\text{F}$  para mantener un voltaje mínimo de 437 V y una frecuencia no menor a 59.3 Hz.

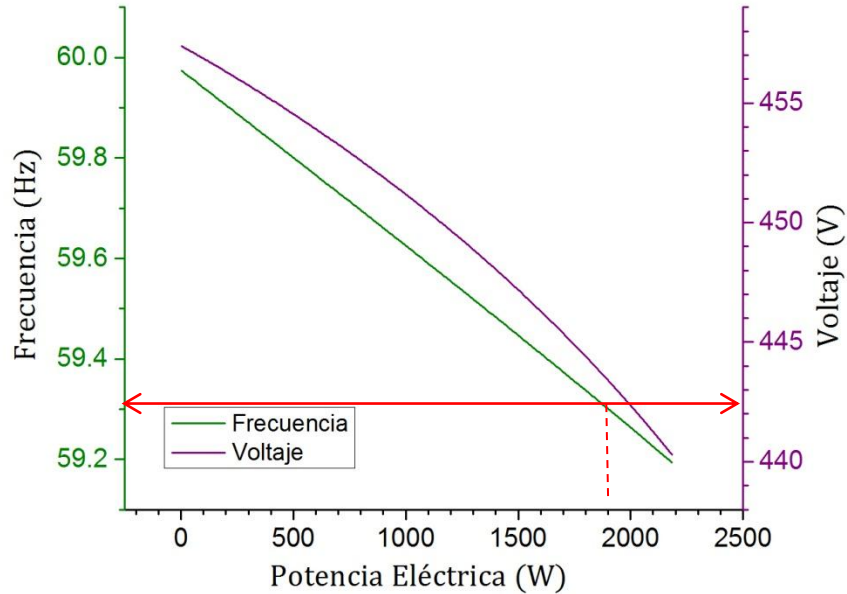
La potencia mecánica del motor es de 2090 W (a una irradiancia de 950  $\text{W}/\text{m}^2$  y a una temperatura ambiente de 25°C), a partir de este punto se disipa la energía excedente, para que el generador eléctrico pueda generar energía eléctrica dentro de los límites. En la figura 3.8 se observa que a este le corresponde una velocidad de 1821 rpm y una potencia eléctrica de 1900 W.



**Figura 3.8. Potencia y velocidades de operación del generador**

Como es posible observar en la figura 3.8, al ir aumentando la velocidad del generador, este ira incrementando su potencia de salida. Al ir aumentando la velocidad, la frecuencia de la fuente va disminuyendo al estar relacionada la velocidad del generador con la frecuencia. Por lo que al tener cierto límite en la frecuencia, es necesario trabajar dentro de este rango.

Es necesario suministrar la capacitancia necesaria para que el sistema genere la potencia requerida dentro de una velocidad deseada y un voltaje aceptable, manteniendo una buena eficiencia del generador. En la figura 3.9 se muestran el comportamiento del voltaje y frecuencia al incrementar la velocidad, suministrando una carga capacitiva de  $240\mu\text{F}$ .



**Figura 3.9. Frecuencia y voltaje contra potencia entregada**

Como lo muestra la figura 3.9 se tiene entonces una potencia eléctrica máxima permitida de 1900 W, con las características del generador de inducción mencionado.

Aunque en este estudio no se ha pretendido una interconexión física a la red eléctrica, se tomaron en cuenta estos valores como límite, dado a que se considera que estas magnitudes no podrían dañar la integridad de equipos eléctricos que pudieran estar conectados o simplemente para tomarlos como base para entregar energía eléctrica dentro de una norma establecida y poder contemplar en algún proyecto posterior la interconexión a la red, logrando cumplir los requerimientos establecidos por CFE.

## Estudio y Diseño del Sistema de Control

Para aprovechar adecuadamente la energía solar, es adecuado tener un estudio de la disponibilidad de este recurso en la región que se quiere trabajar. Una vez obtenida la disponibilidad de la energía térmica entregada y las limitantes que se tienen para la potencia eléctrica o de salida (obtenidos con el generador eléctrico y las normas a cumplir), se continúa a desarrollar un sistema de control adecuado e ingeniería básica de este. Trabajando con las limitantes que ofrece el sistema disco-Stirling y logrando cumplir el objetivo de controlar la potencia.

### 4.1 Disponibilidad de Energía Solar

Para realizar un adecuado diseño de algún sistema que requiera energía solar, es imprescindible saber la irradiación solar que se tiene en la localidad. La mejor evaluación que se podría tener sería la medición directamente de la radiación en un largo término de tiempo, para poder medir los diferentes parámetros solares. Sin embargo algunas veces no es posible tener estas lecturas en ciertas localidades por lo cual es necesario obtener estos datos con algún modelo que proporcione estos comportamientos y parámetros.

En este estudio, se tomó la disponibilidad de energía solar a partir de los datos obtenidos de un año meteorológico típico (TMY), para la localidad de Chihuahua, tomando la irradiación directa para un plano con

seguimiento en dos ejes. Estos datos son obtenidos a partir de (meteonorm, 2013) que otorga la irradiancia solar, temperatura y otros parámetros requeridos. Para poder estimar el recurso solar disponible en el sitio de estudio en una forma esquemática, ésta se puede obtenerse a partir de las curvas de frecuencia acumulada de la irradiancia solar promedio durante el año. Las curvas de frecuencia acumulada se definen como aquellas que representan la frecuencia en términos del número de horas promedio, con la que la irradiancia incidente está dentro de cierto rango.

Con estos niveles de irradiancia, se puede conocer cuales aportan una mayor cantidad de irradiación, lo cual sirve para observar que rango de irradiancia será la mejor opción para aprovechar la mayor cantidad de energía. Conociendo esto se intenta hacer el sistema lo más eficiente posible a esa irradiancia y se obtiene en qué nivel de irradiancia es adecuado implementar el sistema de control. Para eficientar el sistema, se utilizaran como variables la velocidad del motor y la cantidad de flujo de trabajo a utilizar.

A continuación se muestra la frecuencia acumulada de un año meteorológico típico para intervalos de cada 25 W/m<sup>2</sup> obtenida para la ciudad de Chihuahua, con mediciones cada 7.5 min, así como la cantidad de energía disponible en kWh para cada nivel crítico. En la tabla 4.1 se muestra la irradiancia directa sobre una superficie seguimiento en dos ejes. En dicha tabla se tiene una irradiación aproximada disponible de 2,349 kWh/m<sup>2</sup> con la sumatoria de todas las diferentes irradiancias. Se puede observar también que la mayor frecuencia acumulada obtenida es de 1,307 ocasiones (periodo de 9,802.5 min) con una irradiancia entre 850-875 W/m<sup>2</sup> dando un promedio de 140.9 kWh/m<sup>2</sup>.

Tabla 4.1. Frecuencia acumulada para la ciudad de Chihuahua

W/m <sup>2</sup>	Frecuencia Acumulada	kWh/m <sup>2</sup> Promedio	W/m <sup>2</sup>	Frecuencia Acumulada	kWh/m <sup>2</sup> Promedio
<b>0-25</b>	1008	3.2	<b>550-575</b>	856	60.2
<b>25-50</b>	645	3.0	<b>575-600</b>	956	70.2
<b>50-75</b>	472	3.7	<b>600-625</b>	938	71.8
<b>75-100</b>	581	6.4	<b>625-650</b>	986	78.6
<b>100-125</b>	593	8.3	<b>650-675</b>	929	76.9
<b>125-150</b>	576	9.9	<b>675-700</b>	995	85.5
<b>150-175</b>	552	11.2	<b>700-725</b>	923	82.2
<b>175-200</b>	544	12.8	<b>725-750</b>	967	89.1
<b>200-225</b>	573	15.2	<b>750-775</b>	1020	97.2
<b>225-250</b>	595	17.7	<b>775-800</b>	997	98.1
<b>250-275</b>	590	19.4	<b>800-825</b>	970	98.5
<b>275-300</b>	591	21.2	<b>825-850</b>	1128	118.1
<b>300-325</b>	629	24.6	<b>850-875</b>	<b>1307</b>	<b>140.9</b>
<b>325-350</b>	708	29.9	<b>875-900</b>	1177	130.6
<b>350-375</b>	656	29.7	<b>900-925</b>	1065	121.5
<b>375-400</b>	742	35.9	<b>925-950</b>	1010	118.4
<b>400-425</b>	734	37.8	<b>950-975</b>	985	118.5
<b>425-450</b>	756	41.3	<b>975-1000</b>	654	80.7
<b>450-475</b>	806	46.6	<b>1000-1025</b>	363	45.9
<b>475-500</b>	832	50.7	<b>1025-1050</b>	184	23.9
<b>500-525</b>	856	54.8	<b>1050-1075</b>	13	1.7
<b>525-550</b>	851	57.2	Irradiación=	2349.1 kWh/año	

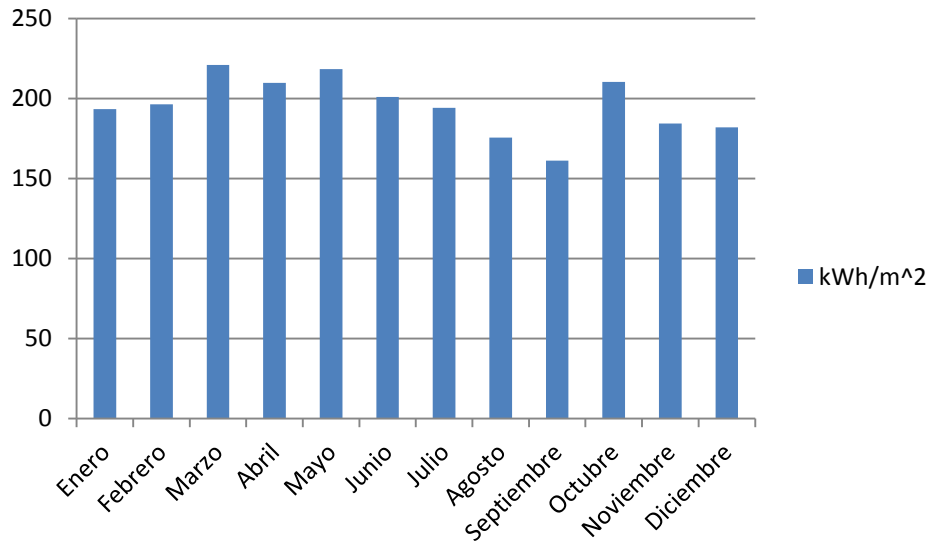


Los resultados de la tabla 4.2 indican que a un nivel crítico de  $950 \text{ W/m}^2$  se obtiene la mayor cantidad de irradiación aprovechable con  $2244 \text{ kWh/m}^2$ , por lo que el diseño del sistema de control se realiza para que sea lo más eficiente posible en una irradiancia de  $850 \text{ W/m}^2$  y limite la máxima potencia del motor a partir de  $950 \text{ W/m}^2$ .

**Tabla 4.2. Distribución de Irradiación a Niveles de Irradiancia**

$\text{W/m}^2$	$\text{kWh/m}^2$
800-825	2158.59
825-850	2183.23
850-875	2204.35
875-900	2221.38
900-925	2234.74
925-950	2244.77
950-975	2251.64
975-1000	2255.43
1000-1025	2257.18
1025-1050	2257.80
1050-1075	2257.84

Para poder observar la distribución de la energía total durante el año y las temperaturas ambientes que se tienen, se obtuvo la energía promedio por mes otorgada por la radiación directa, sobre una superficie con seguimiento en dos ejes (figura 4.1).



**Figura 4.1. Distribución mensual de irradiación**

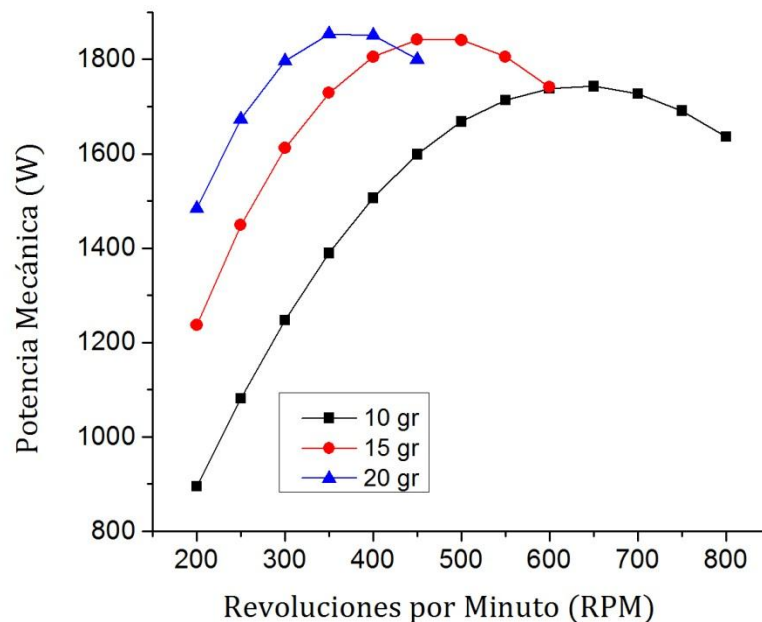
Con las irradiancias dadas se podrá adaptar el sistema de generación, obteniendo las temperaturas que se pudieran tener en el calentador, dado que esta es la parte crítica del sistema o el lugar donde este pudiera fallar debido a una presión o temperatura alta.

## 4.2 Determinación de Punto de Operación de Motor Stirling

Una vez conocido en que rango de irradiancia se tiene la mayor irradiación al año, se continúa con tratar de optimizar la funcionalidad del sistema para que su eficiencia sea la mayor posible en ese rango y así generar la mayor cantidad de energía eléctrica. La eficiencia ideal de los motores Stirling aumenta con el aumento de la diferencia de temperatura entre ambos intercambiadores. En la práctica la presión y temperatura del calentador se ve limitado por las propiedades de los materiales utilizados. Se prosigue en buscar las condiciones en el que el motor muestra un mejor desempeño, variando la velocidad y flujo

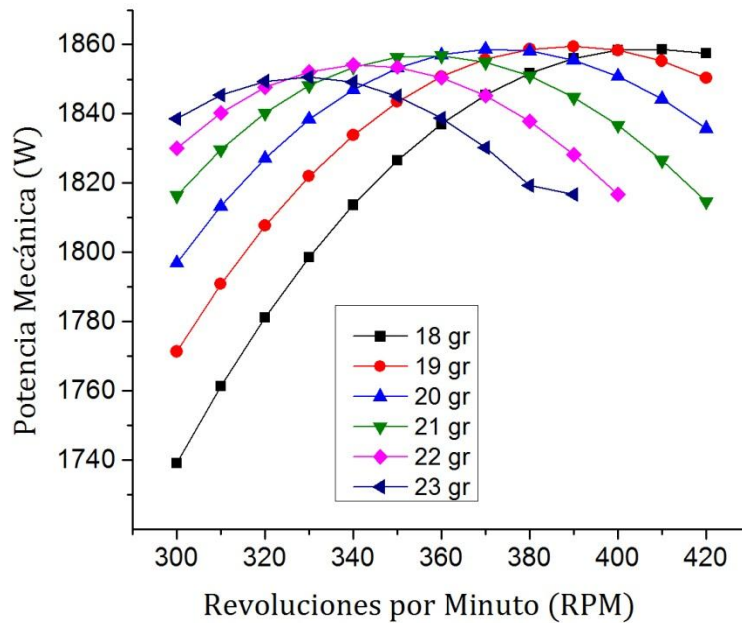
másico del motor, para incrementar la potencia de salida del motor sin comprometer la vida útil del calentador.

La velocidad del motor y la cantidad de fluido de trabajo se varia para observar en qué punto el motor puede dar una mayor potencia, manteniendo una irradiancia de  $875 \text{ W/m}^2$  y una temperatura ambiente de  $21.87 \text{ }^\circ\text{C}$  (dado a que esta es la temperatura promedio a la cual se tiene esta irradiancia). Se puede ver en la figura 4.2 que a 350 RPM y 20 gr de fluido de trabajo, se tiene la mayor potencia. Al ir aumentando la cantidad de fluido, la velocidad óptima de operación es cada vez menor. Al aumentar la cantidad de fluido no es posible trabajar en altas velocidades debido a que se superan los límites de la correlación utilizada para el cálculo de la caída de presión y del coeficiente de transferencia de calor por convección.



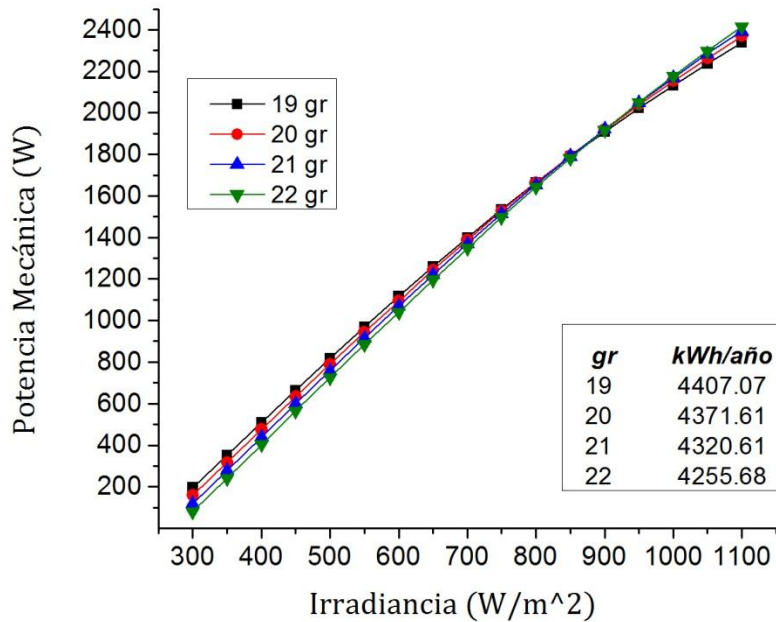
**Figura 4.2. Influencia de rpm y la cantidad de fluido en potencia**

Teniendo estos datos se analiza el sistema en rangos más precisos, en los que se observó una mejor operación del sistema, obteniendo de la figura 4.3 que la mejor opción sería trabajar con 19 gr de masa, a una velocidad de 390 rpm.



**Figura 4.3. Obtención de punto de operación**

Dado a que la velocidad síncrona del generador a utilizar es de 1800 rpm, se utilizará una velocidad nominal de 360 rpm para tener un multiplicador de velocidad 1:5. A estas condiciones corresponde una masa de 20 gr la cantidad de fluido ideal para trabajar a esta velocidad y a esta irradiancia, sin embargo se requiere conocer con cuál de estas masas se tiene una menor temperatura de operación. Al aplicar la irradiación de un año meteorológico típico, a las diversas irradiancias existentes se observa en la figura 4.4 que la generación de energía mecánica es muy parecida difiriendo por aproximadamente 150 kWh/año de 19 a 22 gr.



**Figura 4.4. Energía eléctrica generada con diferente cantidad de fluido**

Dadas estas condiciones de operación se revisan las temperaturas máximas que se pudieran tener, para lograr trabajar sin exceder la temperatura y presión permisible del calentador.

El calentador está construido con acero inoxidable 316, teniendo los tubos un diámetro externo de 0.635 cm y un diámetro interno de 0.3048 cm, donde la máxima presión permisible de trabajo para tubos delgados de acero se calcula mediante (K. Lingaiah, 2003):

$$p = \frac{2\sigma_{sa}}{d_o} (h - 1.625 \times 10^{-3}) - 0.9 \quad (4-1)$$

Dónde:  $h$ ,  $d_o$  está en m,  $p$  y  $\sigma_{sa}$  en MPa.

De esta fórmula y las tablas de máximo estrés permitido a diferentes temperatura de (K. Lingaiah, 2003) se obtuvo la tabla 4.3, la cual muestra las presiones máximas de trabajo permitidas para el material y dimensiones de los tubos del calentador.

**Tabla 4.3. Presión Permitida en los Tubos del Calentador**

T(K)	$\sigma_{sa}$ (MPa)	P (MPa)
311.15	130	67.68
366.15	130	67.68
423.15	127	66.1
478.15	125	65.04
533.15	124	64.51
588.15	117	60.82
643.15	112	58.18
700.15	110	57.13
755.15	107	55.54
811.15	106	55.02
866.15	85	43.94
923.15	51	26.00
977.15	28	13.87
1033.15	16	7.54
1088.15	9	3.85

Para encontrar con que cantidad de masa se obtiene la menor temperatura en el calentador, se realizaron las pruebas a una irradiancia de  $1100 \text{ W/m}^2$ , (considerando que pudiera ser la máxima irradiación directa que se pudiera tener) y a una  $T_{amb}$  de  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  para obtener la temperatura de operación máxima del motor. Se muestra en la tabla 4.4 que con 22 gr se obtiene la menor temperatura a 889.5 K con una potencia mecánica de 2,355.5 W, por lo que se establece esta masa como punto de diseño, considerando su mínima temperatura y despreciable disminución de la energía mecánica producida como se observó en la figura 4.4.

**Tabla 4.4. Temperaturas en el calentador a distinta cantidad de masa**

MG (gr)	P(W)	TH (K)	PMAX(MPa)
19	2295.4	968.55	9.97
20	2321.5	940.77	10.37
21	2340.2	914.13	10.76
22	2355.5	889.48	11.15

El diseño del sistema trabaja a una velocidad de 360 RPM y 22 gr de nitrógeno ( $N_2$ ) dado a que es como se tiene una menor temperatura en el calentador sin sacrificar mucha potencia. El sistema se simula con estas condiciones esperando en ningún punto sobrepasar una temperatura máxima de 1000 K cuando la radiación solar directa tenga un valor de  $1100 \text{ W/m}^2$ .

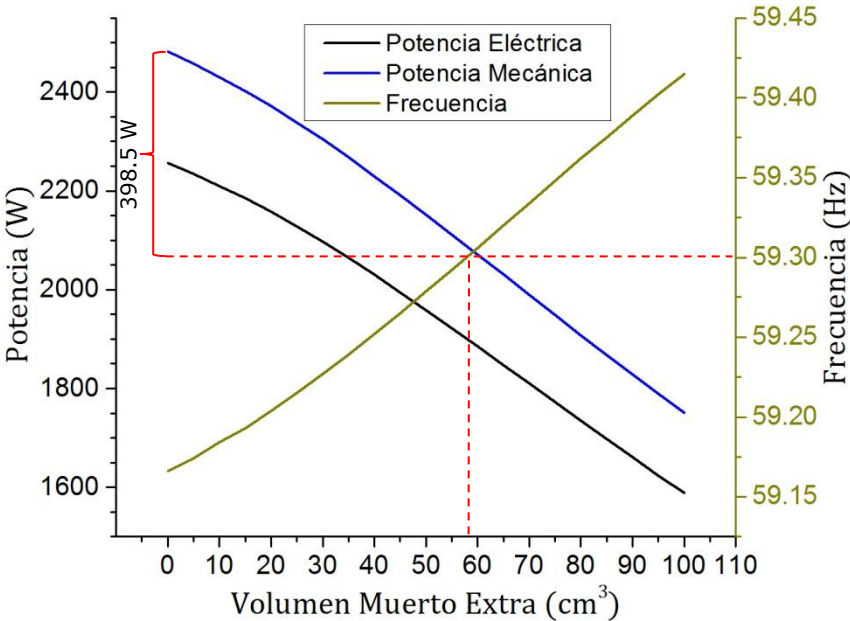
Una vez definidos los requerimientos del sistema de control, es posible desarrollar un diseño adecuado del dispositivo.

### **4.3 Diseño e Ingeniería Básica del Modelo**

El diseño del dispositivo de control mediante volumen muerto, se orientó a generar la mayor cantidad de energía dentro de los límites requeridos, controlando la potencia y velocidad del motor. También se tomó en consideración la insolación anual, propiedades mecánicas del calentador y límites de frecuencia y voltaje para sistemas de pequeña escala interconectados a la red eléctrica.

Primeramente es necesario obtener la cantidad de volumen muerto necesario en el sistema, por lo que se requiere conocer la cantidad de potencia máxima que se requerirá controlar. En la figura 3.8 se obtuvo que para mantener al sistema dentro de los rangos requeridos de frecuencia, se debe mantener una potencia eléctrica  $\leq 1900 \text{ W}$  que

corresponde a una potencia mecánica entregada por el motor de 2090 W aproximadamente. Como escenario crítico para fines de diseño, se considera una irradiancia directa máxima de 1100 W/m<sup>2</sup> y una temperatura ambiente de 0 °C. En la figura 4.5 se puede observar el comportamiento del sistema con estas condiciones y se obtiene que se requeriría controlar una potencia aproximada de 398.5 W utilizando un volumen adicional (VCDX) de 57 cm<sup>3</sup>.

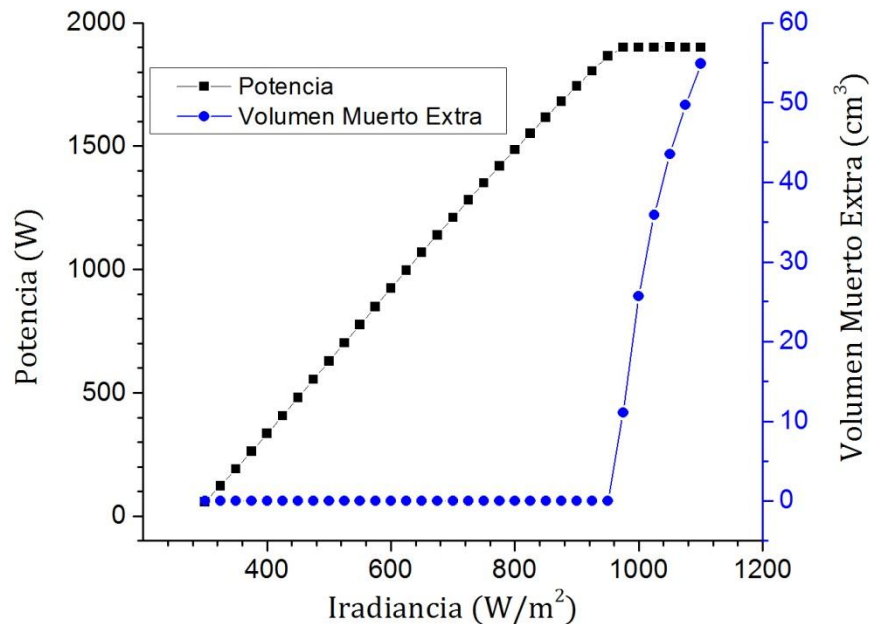


**Figura 4.5. Influencia del volumen muerto en potencia**

El volumen muerto máximo que se debería necesitar para controlar el sistema es de 57 cm<sup>3</sup>, sin embargo sería una pérdida de potencia si se aplicara esta cantidad de volumen muerto al momento que el motor superara la potencia límite, por lo que se busca que este volumen aumente de manera gradual, intentando solo regular la potencia que exceda el límite a según la irradiancia momentánea. Es decir, se requiere que este volumen incremente y reduzca proporcionalmente al aumenta o disminuir la irradiación solar, permitiendo que el generador



siempre entregue la máxima potencia. Esto entre los parámetros establecidos, como se puede observar en la figura 4.6, donde se varió la irradiancia entregada al sistema de 300 a 1110 w/m<sup>2</sup> a una temperatura ambiente de 25 ° C.



**Figura 4.6. Requerimiento de VCDX para regular la potencia**

De esta forma el sistema de control aumentara o disminuirá la cantidad de volumen muerto en el sistema según sea requerido, manteniendo la potencia dentro de los límites establecidos e intentando mantener la potencia lo más alto posible. De la tabla 4.4 se puede obtener que la presión máxima que pudiera tener en el sistema es de 11.15 MPa (presión que se tendría a una irradiancia de 1100 w/m<sup>2</sup> sin aplicar volumen extra, dado que al aplicar volumen la presión descenderá), por lo tanto el dispositivo a utilizar debe de soportar esta presión, otorgando el volumen requerido.

Otro parámetro a considerar es la velocidad de respuesta del sistema de control, el cual para poder determinarlo es necesario ver como actuaría el motor Stirling en la situación donde se pudiera necesitar respuesta inmediata. El sistema de estudio cuenta con un volante el cual tiene un momento de inercia de masa de  $1.4984 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$  que sirve para regular la velocidad del sistema almacenando o liberando la energía cinética.

En términos de velocidad de operación, se considera que la situación más crítica donde el sistema de control pudiera trabajar, es cuando el sistema de control estuviera manteniendo una potencia constante, para evitar estar por debajo del límite inferior de la frecuencia. De las lecturas tomadas del TMY se encontró que el máximo cambio de irradiancia directa dentro del rango  $\leq 950 \text{ W/m}^2$  (irradiancia a partir de la cual el sistema de control debe mantener la potencia constante) fue de un aumento de  $27.56 \text{ W/m}^2$ , pasando de una irradiancia de  $969.08 \text{ W/m}^2$  a una de  $996.04 \text{ W/m}^2$ . Al tener un diámetro de disco de  $3.345 \text{ m}$  y una reflectancia de  $0.93$  a lo que corresponde un aumento de la tasa de transferencia de calor hacia el calentador de  $87 \text{ W}$ . Las lecturas del TMY se disponen en intervalos de  $7.5 \text{ min.}$ , asumiendo que el caso extremo corresponde a un cambio de irradiancia de  $1 \text{ s}$  y esta se mantiene constante. Se tendría con esto un cambio de potencia mecánica de  $2088.8 \text{ W}$  a  $1821.25 \text{ RPM}$  en el generador entregando un torque de  $11.09 \text{ N}\cdot\text{m}$ , cambiando a una potencia de  $2156 \text{ W}$  con una velocidad a  $1821.95 \text{ RPM}$  y un torque de  $11.44 \text{ N}\cdot\text{m}$ . Conociendo el momento de inercia de masa del volante se tiene una aceleración angular de:

$$\alpha = \frac{T}{I} \quad \alpha = \frac{0.35 \text{ N}\cdot\text{m}}{1.4984 \text{ kg}\cdot\text{m}^2} = 0.2336 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \quad (4-2)$$

Al tener una velocidad inicial de  $190.72 \text{ rad/s}$  ( $1821.25 \text{ rpm}$ ) y una final de  $190.794 \text{ rad/s}$  ( $1821.95 \text{ rpm}$ ) se observa que con la aceleración

angular dada en 0.317 s se alcanzaría el nuevo estado, teniendo que el sistema de control debería ser capaz de mitigar este cambio de potencia en un menor tiempo. Se deberá entregar un aumento de 19.6 cm<sup>3</sup> extra para mantener la potencia constante de 2088.8 W con el aumento de dicha irradiancia.

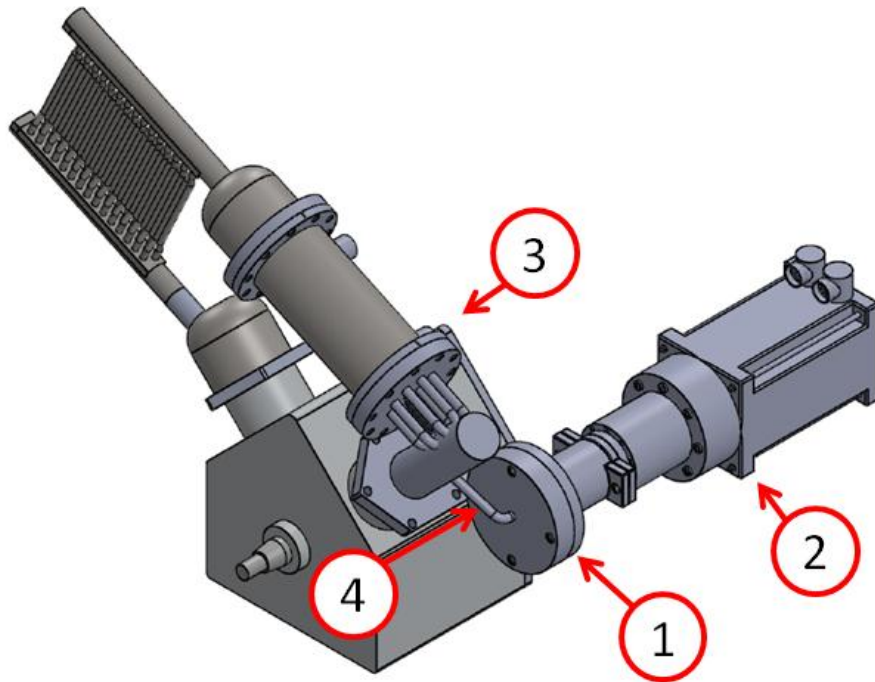
Sin embargo se asume que el tiempo en el que sistema reaccionaria, sería menor que el tiempo de cambio termodinámico de los máximos cambios de irradiación mencionados. Si esto no fuera así, se podría tener la opción de poder colocar un volante de mayor tamaño (con mayor momento de inercia de masa) o disminuir el límite de frecuencia de operación para el control, es decir en vez de tener un límite de 59.3 Hz que este fuera por ejemplo 59.32 Hz. Así al llegar a existir un incremento grande en la irradiación en un pequeño lapso de tiempo, la aceleración del motor pudiera reducirse.

#### 4.4 Descripción del Diseño

El sistema consta de una cámara de volumen ajustable mediante un actuador electromecánico, la cual se modifica para cambiar la proporción de volumen de compresión  $V_{\max}/V_{\min}$  modificando la potencia entregada y también permitiendo que la cantidad de fluido de trabajo requerida sea barrida por los pistones del motor.

En la figura 4.7 se muestra el sistema de control conectado al motor Stirling, este dispositivo de control consta de una cámara de volumen variable (1) la cual es conformada por un diafragma, el cual es resistente a la presión máxima posible del motor y adecuado para poder flexionarse otorgando el volumen requerido por el sistema, un actuador lineal (2) que logra posicionar al diafragma en la posición deseada para producir el volumen muerto requerido. Este se conecta al enfriador del

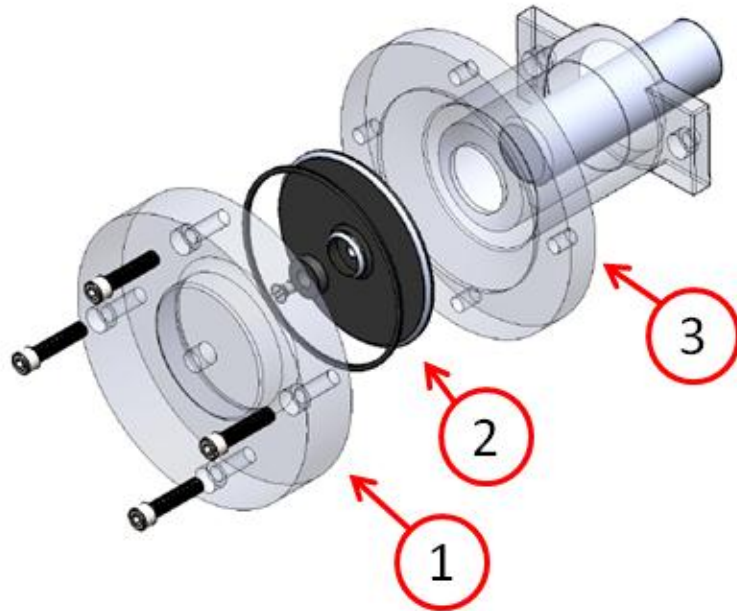
motor (3) para reducir esfuerzos por temperatura, disponibilidad de espacio y una mejor eficiencia del sistema de control que alguna otra posición. La cámara se conecta mediante un conducto de volumen despreciable (4) unido al enfriador y al cabezal del sistema de control. Los planos y dimensiones de las piezas pueden verse en el Apéndice II.



**Figura 4.7. Sistema de control conectado a motor Stirling**

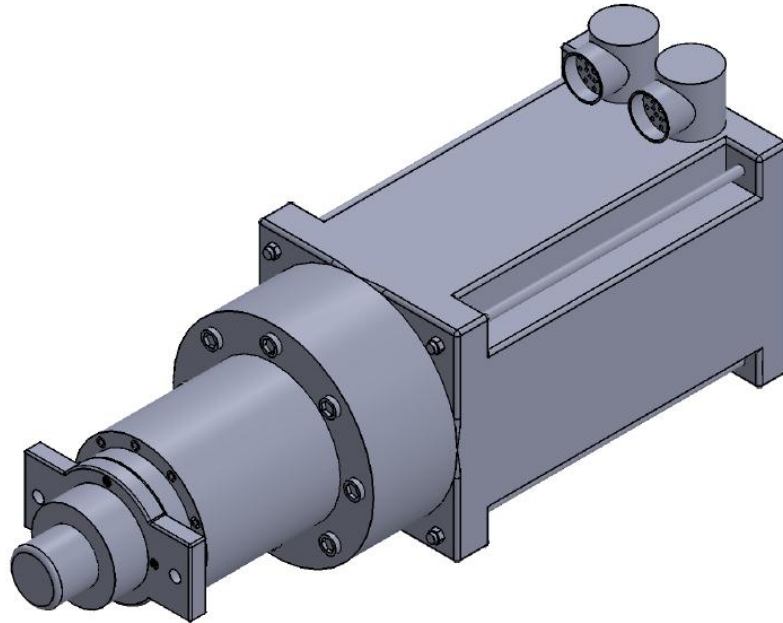
La cámara de volumen variable mostrada en la figura 4.8, consta fundamentalmente de tres partes: (1) la cabeza de la cámara, la cual consta con un volumen de  $74 \text{ cm}^3$  siendo en si la cámara que alberga el fluido de trabajo, (2) el conjunto del diafragma FLAS<sup>®</sup> el cual está hecho de un fluoroelastómero basado en un copolímero alternativo de tetrafluoroetileno y polipropileno, utilizado en bombas de diafragma de alta presión (Wanner Engineering, Inc, 2007) el cual tiene la capacidad de resistir una presión de operación de hasta 17.24 MPa (2500 psi) y (3) el cuerpo de la cámara, donde se posiciona el diafragma así como los

elementos de sujeción de este y sellado por un O-ring neumático asentado en el cuerpo de la cámara.



**Figura 4.8. Componentes de la cámara de volumen variable**

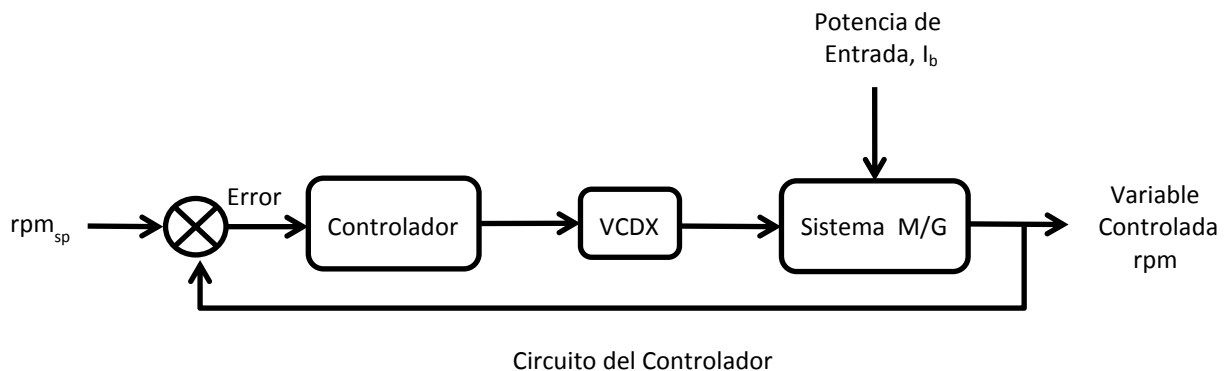
La forma de la cavidad de la cabeza de la cámara fue tomada de la misma bomba donde pertenece el diafragma, para garantizar el volumen que puede desplazar así como la magnitud lineal que el diafragma puede expandirse sin dañarlo. Este movimiento lo realiza un actuador, siendo en este caso un cilindro electromecánico compacto marca SKF modelo CEMC2404-125-1-62L (figura 4.9) el cual tiene una fuerza pico de 23.8 kN. Este actuador puede desplazar el diafragma 7.1mm a una presión de 7.69 MPa (presión media máxima que pudiera existir en el motor), que corresponde a un volumen desplazado de 20 cm<sup>3</sup> en solo 0.317 s requiriendo 485W, la cual sería la potencia máxima que en un caso critico pudiera llegar a necesitarse.



**Figura 4.9. Actuador electromecánico utilizado**

La innovación de este dispositivo consiste en que aunque se trate de un dispositivo de control por volumen muerto, este no se encuentra aislado por cámaras como los sistemas de control reportados en la literatura (Hakansson, 1974), (Anders, 1973)), sino que puede ofrecer un incremento de la variación del volumen muerto (VCDX) de manera gradual según se requiera. Es capaz de restablecer el sistema igualmente de forma progresiva, cosa que los otros sistemas de este tipo devuelven la masa al sistema por medio de diferencias de presiones al contar con válvulas de no retorno en cada cámara. El control de la potencia del motor se logra mediante la variación del volumen en el cual se aplicará la presión de trabajo. Para reducir la potencia del motor se agrega cierto volumen extra al espacio de trabajo con lo cual decrecerá la relación de volumen de compresión  $V_{\max}/V_{\min}$ , que al mismo tiempo reduce la amplitud de las variaciones de la presión. Al momento que se requiera aumentar la potencia, este volumen se reducirá.

Para realizar un control adecuado es necesario contar con un controlador, el cual manipulara al actuador al variar la radiación y/o condiciones climáticas para mantener la velocidad deseada en el generador. En la figura 4.10 se muestra el diagrama del esquema de control, donde  $VCDX$  es el parámetro de control,  $I_b$  la potencia de entrada (irradiancia) y  $rpm$  la salida controlada, la cual puede ser mantenida a un valor deseado, el cual será el punto establecido  $rpm_{sp}$ . Así al existir algún cambio repentino en  $I_b$ , el cual cambiará continuamente con respecto al tiempo, este producirá un cambio en  $rpm$  haciendo que esta tenga un valor diferente a  $rpm_{sp}$ . Por lo cual será necesario un cambio en  $VCDX$ , poder igualar  $rpm$  nuevamente con  $rpm_{sp}$  hasta que la diferencia entre estos sea menor que el error establecido, donde  $rpm_{sp}$  pudiera ser fija o variar como sea conveniente utilizando la medición de una o más variables del proceso, para poder contener los cambios de la potencia de entrada y tener un control del sistema (Edgar, 2008).



**Figura 4.10. Método de control**

En la figura 4.11 se muestra el diagrama de flujo que utilizaría el sistema de control para su adecuado funcionamiento. Teniendo en el lado derecho el modo que tendría el sistema a partir de una irradiancia de  $950 \text{ W/m}^2$ , donde el sistema mantiene una potencia constante. Por otra parte, del lado izquierdo se muestra el comportamiento en el que el

sistema no está trabajando a su máxima capacidad permitida, con lo que se buscaría aplicar la cantidad idónea de volumen muerto, intentando tener la mayor potencia posible.



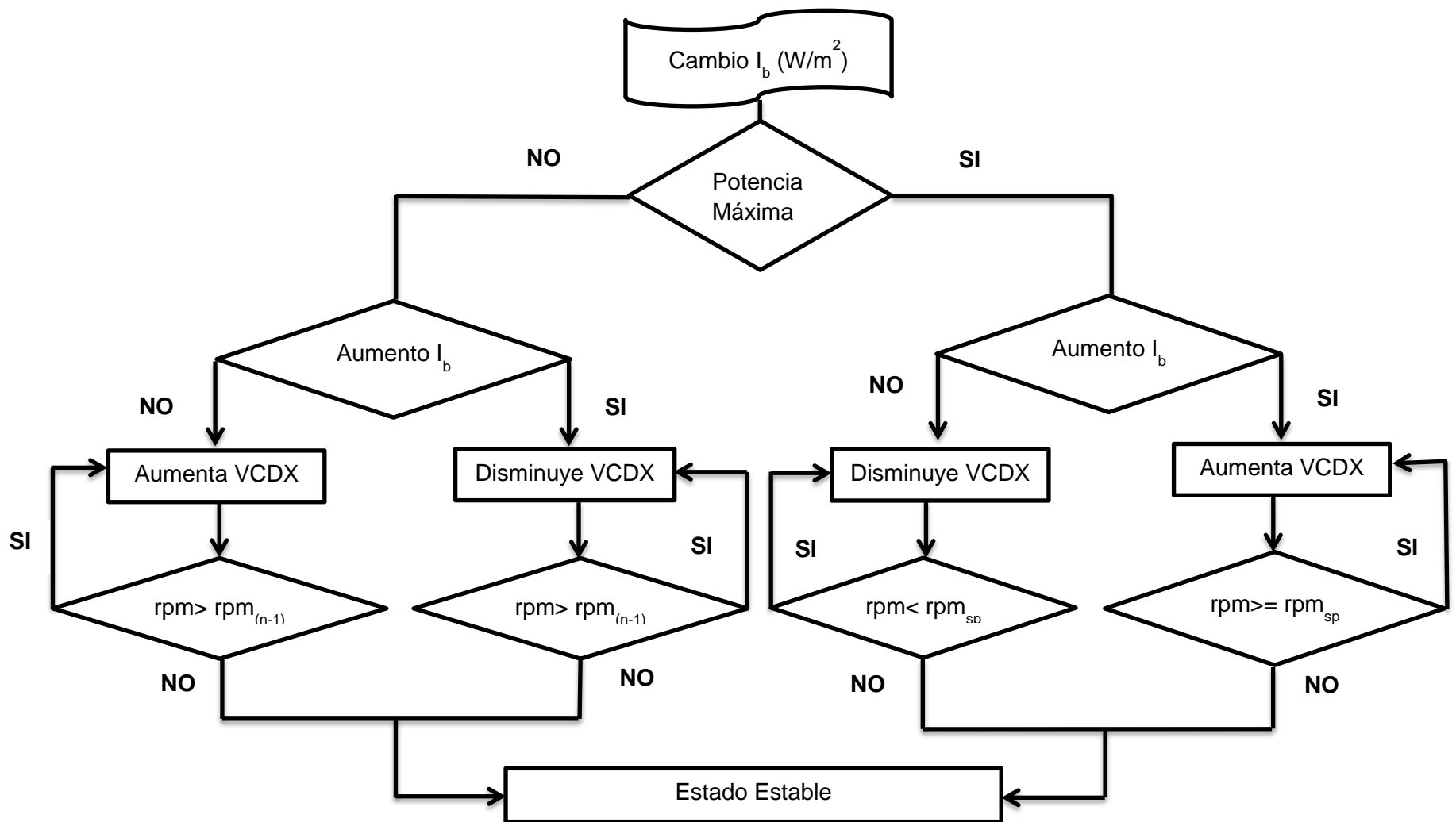
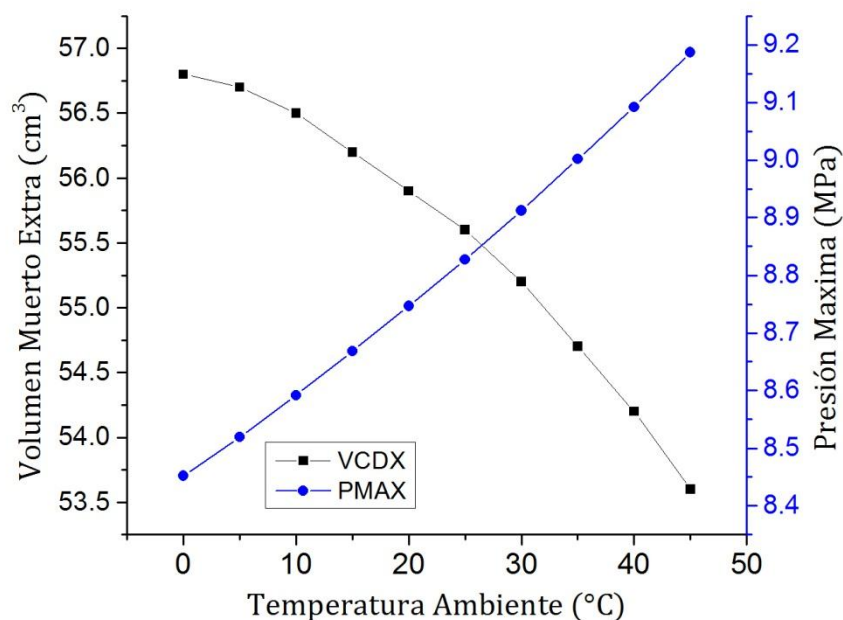


Figura 4.11. Diagrama de flujo de sistema de control

## 4.5 Alcances del Sistema de Control

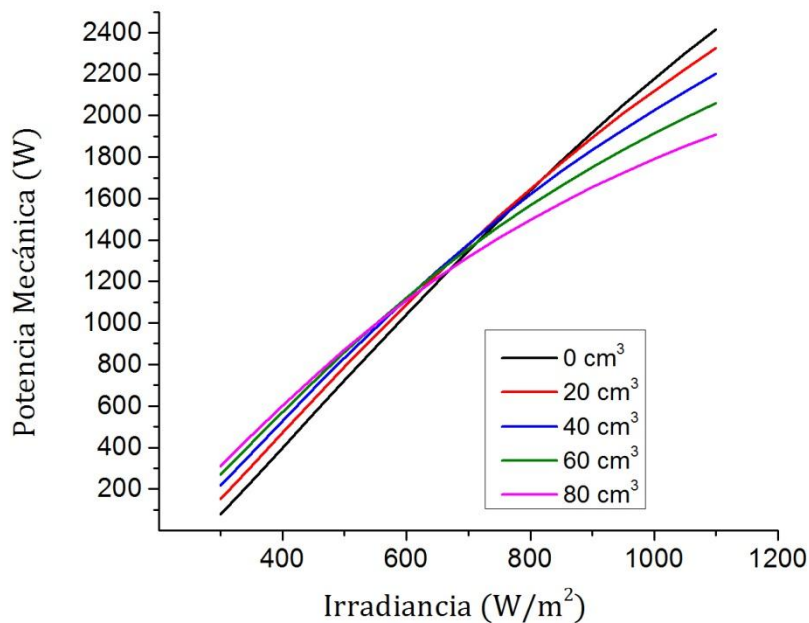
El dispositivo de control se diseñó con capacidad de controlar el sistema en cualquier circunstancia que se pudiera presentar. El volumen total de la cámara consta de  $74 \text{ cm}^3$  y puede soportar una presión máxima de  $17.24 \text{ MPa}$ . Los requerimientos del sistema para mantener una potencia constante son de máximo  $57 \text{ cm}^3$  y  $9.18 \text{ MPa}$  respectivamente. La influencia de la temperatura ambiente sobre el sistema se muestra en la figura 4.12 manteniendo una irradiancia directa de  $1100 \text{ W/m}^2$ , otorgando una potencia constante.



**Figura 4.12. Requerimientos de volumen muerto y presiones máximas**

Además de haber diseñado el dispositivo de control y demostrado que puede trabajar efectivamente, se encontró en el estudio que al aplicar el método de volumen muerto mediante esta técnica se puede aumentar la eficiencia del sistema significativamente. Se observó que manteniendo una cantidad de fluido de trabajo fija, la potencia entregada por el

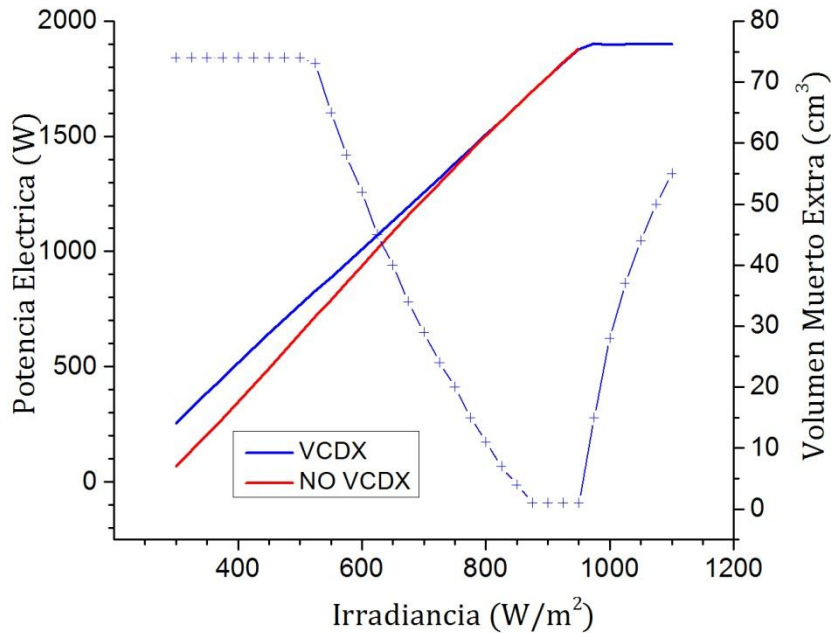
motor Stirling varia al cambiar la cantidad de volumen muerto, sin que forzosamente esta potencia disminuya al aumentar este volumen. Es decir, existe una cantidad de fluido de trabajo ideal para extraer el calor del calentador y convertirla en trabajo útil, con lo que al poder tener la cantidad idónea de fluido de trabajo barrido, se tiene la mayor eficiencia posible a condiciones dadas del sistema, evitando pérdidas por fricción y logrando obtener mayores temperaturas en el fluido. Dicho en otras palabras al tener una cámara de volumen variable, se puede controlar la cantidad de fluido barrido por los pistones y se puede obtener la cantidad de fluido óptima para la magnitud de radiación solar disponible, según la capacidad calorífica del gas y tiempo de duración del ciclo, como se muestra en la figura 4.13.



**Figura 4.13. Influencia de volumen muerto en la potencia**

Estos resultados indican que al tener la ventaja de poder trabajar con la cantidad de volumen muerto idónea (o cantidad de fluido dentro del ciclo efectivo) se logra que el sistema sea más eficiente, produciendo

una mayor cantidad de energía eléctrica. Así el control que se observó en la figura 4.6, trabajaría también en las irradiancias donde no se necesite reducir la potencia, como se muestra a continuación.



**Figura 4.14. Potencias “con” y “sin” sistema de control**

Teniendo esto en cuenta, se puede realizar una comparación de la energía producida por el sistema “con” y “sin” el sistema de control. Dicha comparación se realizó considerando irradiación y temperatura ambiente promedio para la ciudad de Chihuahua. Se encontró que se produce mayor cantidad de energía eléctrica utilizando el sistema de control, teniendo una producción aproximada de 3,322 kWh/año sin control y una de 4,043 kWh/año utilizando el sistema de control, obteniendo un 21% más de energía eléctrica al utilizar el sistema de control.

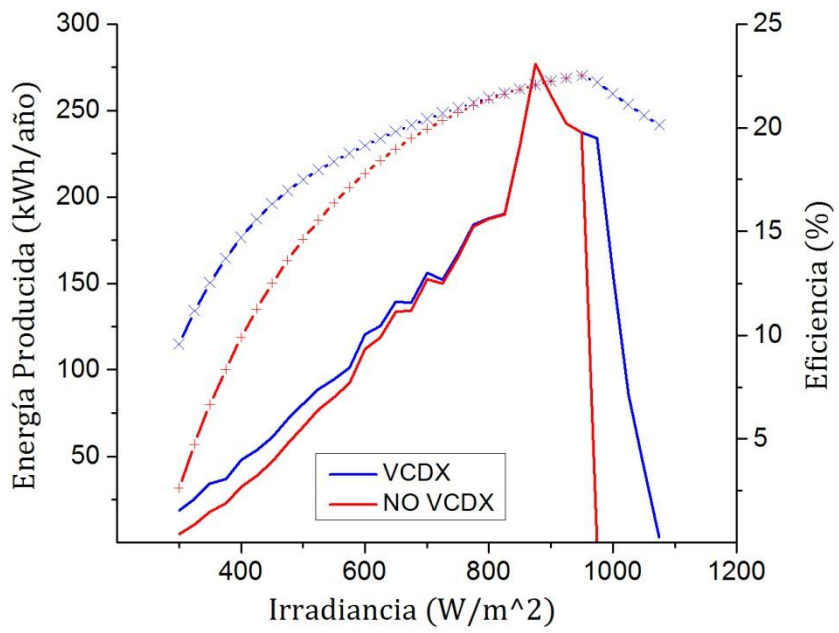


Figura 4.15. Comparación de energía eléctrica generada al año

## Conclusiones

En este estudio se evaluaron diferentes técnicas de control y se demostró que la mejor opción para trabajar con el motor Stirling descrito, fue la técnica de control por volumen muerto. Encontrando óptimos resultados para manipular la potencia, pocas piezas móviles para realizar el proceso y una forma sencilla de aplicar la técnica.

Al analizar el comportamiento del generador, se pudo conocer la potencia y velocidad necesaria que se requiere en el sistema disco Stirling para trabajar de forma acorde y observar como los cambios de potencia en el motor pueden afectar la respuesta del generador, con el fin de conocer la magnitud de volumen muerto necesaria y mantener los parámetros del generador dentro un rango permitido.

Se estudió el comportamiento y la disponibilidad del recurso solar de la región, para hacer coincidir el punto de máxima eficiencia con el rango de irradiancia con mayor aporte energético. También se obtuvieron los máximos cambios de irradiancia existentes y se diseñó el sistema para que tenga la capacidad de cambiar la magnitud de volumen aplicado a la velocidad requerida, logrando mantener una operación estable en el sistema.

Se logró regular la potencia y velocidad de motor de manera eficaz, aplicando la técnica de volumen muerto mediante una cámara de volumen adicional variable. Se simuló la conexión del motor Stirling con

un generador asíncrono, determinando cuales eran las características de operación necesarias, así como los límites de frecuencia y voltaje establecidos para la interconexión eléctrica. Se observó que el sistema de control es capaz de trabajar de forma satisfactoria para este propósito, teniendo en consideración las propiedades mecánicas del calentador y operando de una forma eficiente, con la insolación de la localidad de Chihuahua.

Se utilizó esta misma técnica de control para hacer más eficiente la operación del motor, estableciendo una cantidad de masa optima mediante la variación del volumen en función de la irradiancia, logrando obtener una mayor eficiencia al mantener la cantidad idónea de fluido en el espacio de trabajo, consiguiendo una mejora en el funcionamiento del ciclo Stirling.

Además del aumento de eficiencia, las ventajas más representativas del diseño propuesto contra los otros dispositivos estudiados son:

- Requiere de menos dispositivos o elementos mecánicos.
- Es capaz de restablecer el sistema al momento de ser requerido de manera casi instantánea.
- Tiene la ventaja de poder cambiar la potencia en una forma progresiva y no escalonada, logrando una excelente modulación de la potencia.
- No existe la necesidad de tener algún almacenamiento externo del flujo de trabajo (compresor y tanque).
- Se puede tener el sistema en el punto más eficiente en cualquier punto de operación.
- No requiere ningún tipo de lubricación.

- Es de fácil construcción, por lo que no se requiere de maquinaria o herramientas especializadas para su fabricación.
- Se tiene fácil acceso en caso de algún mantenimiento correctivo.

El dispositivo diseñado resulta una muy buena opción para utilizarse como sistema de control, dado que la técnica utilizada tiene una sencilla implementación y el funcionamiento simulado indica que operaría adecuadamente, teniendo múltiples ventajas y haciendo a este tipo de tecnología (sistema Disco-Stirling de baja potencia) más atractiva.

El diseño del dispositivo mostro un forma novedosa de implementar la técnica de control por volumen muerto mostrando importantes mejoras, lo que permitió generar una solicitud de la patente, la cual se encuentra en revisión.

## **5.1 Recomendaciones y Trabajo Futuro**

Se recomienda hacer un estudio con mediciones precisas de los cambios de radiaciones extremas para poder analizar la velocidad de reacción que se requiere por parte del sistema de control.

Antes de realizar el prototipo sería conveniente validar el diseño mediante pruebas con el motor Stirling, suministrándole el calor correspondiente a ciertas irradiancia y conectar al enfriador cámaras de volumen fijo que sean capaces de contener cierta cantidad conocida de volumen. De esta forma se podría tener lecturas reales y saber si la cantidad de volumen predicha con la simulación será suficiente para controlar el motor Stirling, para en caso de no ser así modificar el diseño de la cámara.

De igual forma se podría desarrollar un actuador especial para manipular el diafragma de este dispositivo, el cual conste de la potencia



necesaria para realizar los cambios de volumen con la velocidad requerida, haciéndolo más ligero, compacto, económico y con la carrera justa que requiere el desplazamiento lineal del diafragma (aproximadamente una pulgada). Para lo cual se requerirá un estudio extra, dado que en este estudio se pretendía realizar el diseño con piezas o equipo existente comercialmente para facilitar la construcción del dispositivo.

Dado esto, es imprescindible establecer un método de control adecuado que se pudiera necesitar en el sistema al momento de poner en marcha al sistema completo, utilizando las mediciones que se vieron en el capítulo anterior, pudiendo ser desde un algoritmo simple por retroalimentación o un sistema más complejo como un control proporcional integral (PI) que sea capaz de trabajar óptimamente con los cambios a los que el sistema se puede enfrentar.

# Bibliografía

- Alvarez-Aguirre, A. (2010). Linear Dynamics and Control of a Kinematic Wobble-Yoke Stirling Engine. *49th IEEE Conference on Decision and Control*.
- Anders, S. (1973). *Patent No. US3796018*. Suiza.
- Beltran, R. (2011). *Tesis Desarrollo de un sistema de generación*. Mexicali, Baja California.
- Beltrán, R. (2012). Análisis y diseño de un sistema de generación eléctrica termosolar con concentrador de disco parabólico y motor Stirling de 2.7 kW enfriado por aire. *Ingeniería Investigación y Tecnología*.
- Bennethum, J. E. (1971, Oct. 24). *Patent No. 3699770*. Estados Unidos.
- Bergman, C. (1975, Septiembre 2). *Patent No. 3902321*. Suecia.
- Bergman, C. (1975, Octubre 28). *Patent No. 3914940*. Suecia.
- CFE. (2012). <http://www.cfe.gob.mx/>. Retrieved 2014, from [http://www.cfe.gob.mx/ConoceCFE/Desarrollo\\_Sustentable/Lists/Energia%20renovable/Attachments/5/Especificacionest%C3%A9nicasPeque%C3%B1aEscala.pdf](http://www.cfe.gob.mx/ConoceCFE/Desarrollo_Sustentable/Lists/Energia%20renovable/Attachments/5/Especificacionest%C3%A9nicasPeque%C3%B1aEscala.pdf)
- Chapman, S. J. (2000). *Máquinas Eléctricas*. McGrawHill.
- Chavez, R. V. (2007). Tesis Simulación de un Generador de Inducción Aislado con Carga Monofásica. D.F., Mexico.
- Debnath, D. (2011). Comparative Analysis of SHS and Stirling Engine System with Proposed Voltage Controller Model and the Economic

- Viability of the System. *Power and Energy Engineering Conference*, 1.
- Earthscan LLC. (2010). *Planning & Installing Solar Thermal Systems*. Washington: Earthscan.
- Edgar, T. (2008). Process Control. In T. Edgar, *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. McGraw-Hill.
- Fraser, J. (1983, Agosto 2). *Patent No. 4395881*. Estados Unidos.
- Hakansson, S. (1974, Enero 1). *Patent No. 3782106*. Sweden.
- Jaspers, H. A. (1975, Jun 3). *Patent No. 3886744*. United States.
- K. Lingaiah. (2003). *Machine Design Databook* (Segunda ed.). McGraw-Hill.
- Kongtragool, B. (2005). Thermodynamic analysis of a Stirling engine including dead volumes of hot space, cold space and regenerator. *Renewable Energy*.
- Marks, D. (1983, Julio 12). *Patent No. 4392350*. Estados Unidos.
- meteonorm. (2013). <http://meteonorm.com/products/meteonorm-software/>.
- Mingzhen, L. (2012). Modeling and Simulation of Solar Dish-Stirling Systems. *Power and Energy Engineering Conference* .
- R.Aishwarya. (2011). Solar Powered Stirling Engine for Self-Generating Electricity. *International Conference on Recent Advancements in Electrical, Electronics and Control Engineering*.
- Ross, B. A. (1989). Stirling Machines and Atmospheric Emissions. *Energy Conversion Engineering Conference*, 1.

Simões, M. G. (2008). *Alternative Energy Systems Design and Analysis with Induction Generators*. New York: CRC Press.

Thombare, D. (2006). Technological Development in the Stirling Cycle Engines. *SciencDirect*.

Walker, G. (1980). *Stirling Engines*. New York: Oxford University Press.

Wanner Engineering, Inc. (2007, Agosto). <http://www.hydra-cell.com>. Retrieved Junio 2014

Zipf, B. (1999, Enero 26). *Patent No. 5864770*. Estados Unidos.

# APENDICE I

## A.1 Prueba de vacío

En un motor de inducción, la prueba de vacío mide las capacidades rotacionales del motor y suministra información sobre su corriente de magnetización. El circuito para esta prueba se muestra en la figura A.1, los vatímetros, un voltímetro y tres amperímetros se conectan al motor de inducción al cual se le permite girar libremente. La única carga puesta sobre el motor es su rozamiento propio y el rozamiento con el aire, de modo que  $P_{conv}$  es consumida en el motor por las pérdidas mecánicas, en este caso el deslizamiento del motor es muy pequeño (posiblemente cerca de 0.001 o menos). En la figura A.1-B se muestra el circuito equivalente de este motor. Con este pequeño deslizamiento, la resistencia correspondiente a su potencia convertida  $R_2(1-s)/s$ , es mucho mayor que la resistencia correspondiente a las pérdidas en el rotor  $R_2$  y mucho mayor que la reactancia del rotor  $X_2$ .

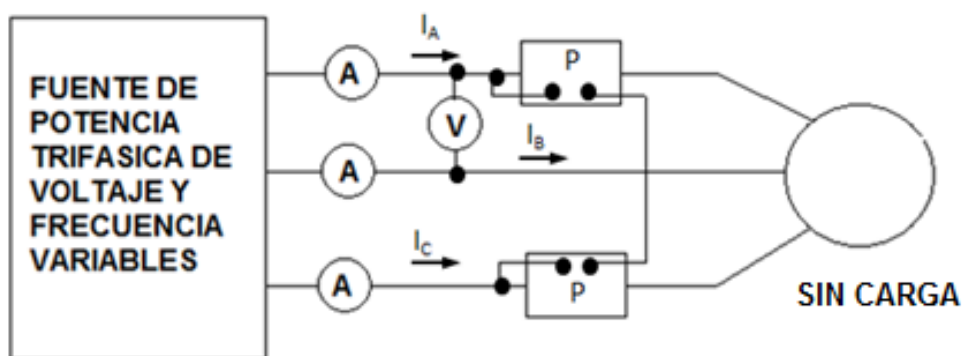


Figura A.1. Circuito para la prueba de vacío

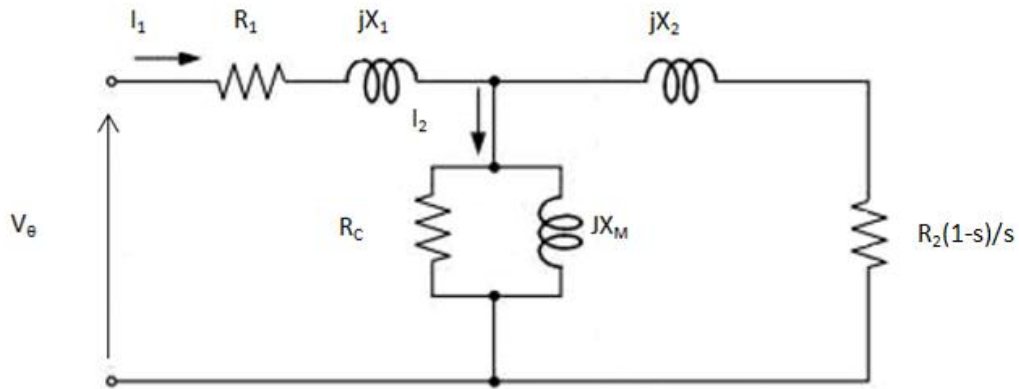


Figura A.1-A. Circuito equivalente del generador por fase

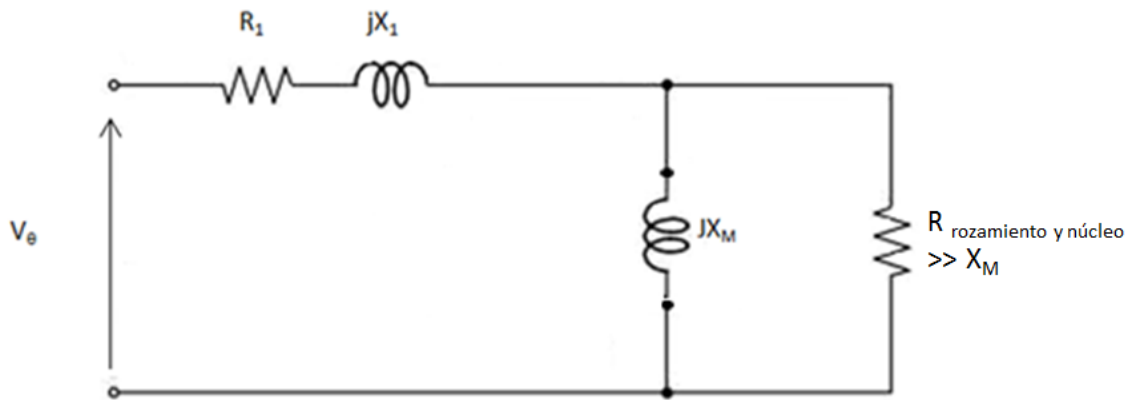


Figura A.1-B. Circuito resultante para la prueba de vacío

En este motor, en condiciones de vacío, la potencia de entrada medida por los vatímetros debe ser igual a las pérdidas en el motor. Las pérdidas en el cobre del rotor son despreciables debido a que la corriente  $I_2$  es extremadamente pequeña (debido a la gran resistencia que de la carga  $R_2(1-s)/s$ ), y por tanto puede ser despreciado. Las pérdidas en el cobre del estator están dadas por

$$P_{scl} = 3I_1^2 R_1 \tag{A-1}$$

Por lo tanto, la potencia de entrada debe ser igual a:

$$P_{IN} = P_{SCL} + P_{nucleo} + P_{F\&W} + P_{mise} = 3I_1^2 R_1 + P_{rot} \tag{A-2}$$

Donde  $P_{rot}$  son las pérdidas rotacionales del motor

$$P_{rot} = P_{nucleo} + P_{F\&W} + P_{mise} \quad (\text{A-3})$$

Entonces, dada la potencia de entrada al motor, se pueden determinar las pérdidas rotacionales de la máquina.

El circuito equivalente que describe la operación del motor en esta condición contiene las resistencias  $R_C$  y  $R_2(1-s)/s$  en paralelo con la reactancia de magnetización  $X_M$ . La corriente necesaria para establecer el campo magnético es muy grande en un motor de inducción debido a la alta reluctancia del entrehierro, de modo que la reactancia  $X_M$  será mucho menor que las resistencias en paralelo con ella y el factor de potencia total de entrada será muy pequeño. Con esa gran corriente en atraso, la mayoría de caída de voltaje se producirá a través de las componentes inductivas del circuito. La inductancia de entrada equivalente es entonces aproximadamente.

$$|Z_{eq}| = \frac{V\phi}{I_1} \approx X_1 + X_M \quad (\text{A-4})$$

Y si  $X_1$  se puede encontrar de alguna otra forma, la impedancia de magnetización  $X_M$  será conocida para el motor.

## A.2 Prueba DC para Determinar la Resistencia del Estator

La resistencia del rotor  $R_2$  juega un papel muy importante en la operación de un motor de inducción. Entre otras cosas,  $R_2$  determina la forma de la curva par-velocidad al establecer la velocidad a la cual ocurre el par máximo. Para determinar la resistencia total de circuito del motor, se puede aplicar al motor una prueba estándar llamada *prueba*

de rotor bloqueado. Sin embargo esta prueba determina sólo la resistencia total. Para encontrar la resistencia del rotor  $R_2$ , es necesario conocer  $R_1$  de forma que esta se pueda restar de la total.

Existe una prueba para  $R_1$  independiente de  $R_2$ ,  $X_1$  y  $X_2$  la cual se denomina *prueba DC*. Básicamente se aplica a un voltaje DC a los devanados del estator del motor de inducción. Puesto que la corriente es dc, no hay voltaje inducido en el circuito del motor y en este no fluye corriente resultante. Así mismo, la reactancia a corriente directa del motor es cero. Entonces, la única cantidad que limita el flujo de corriente en el motor es la resistencia del estator, y por tanto, esta puede ser determinada.

El circuito básico para la prueba dc aparece en la figura 2. Esta figura muestra una fuente de potencia DC conectada a dos de las 3 terminales de un motor de inducción conectado en Y. Para realizar la prueba, se ajusta la corriente del estator al valor nominal y se mide el voltaje en los terminales. La corriente en los devanados del estator se ajusta al valor nominal para que los devanados se calienten a la misma temperatura que tendrían durante la operación normal (recuérdese que la resistencia del devanado es función de la temperatura).

En la figura A.2, la corriente fluye a través de dos de los devanados, de modo que la resistencia total en el camino de la corriente es  $2R_1$ . Entonces:

$$2R_1 = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \quad R_1 = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}} \quad (\text{A-5})$$



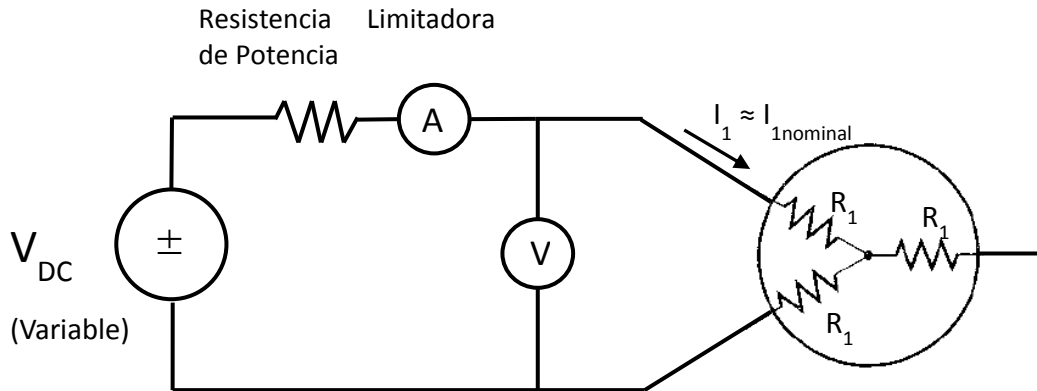


Figura A.2. Circuito para la prueba de resistencia DC

Conociendo este valor de  $R_1$  se pueden determinar las pérdidas en el cobre del estator en vacío, las pérdidas rotacionales se pueden deducir de la diferencia entre la potencia de entrada en vacío y las pérdidas en el cobre del estator.

### A.3 Prueba de Rotor Bloqueado

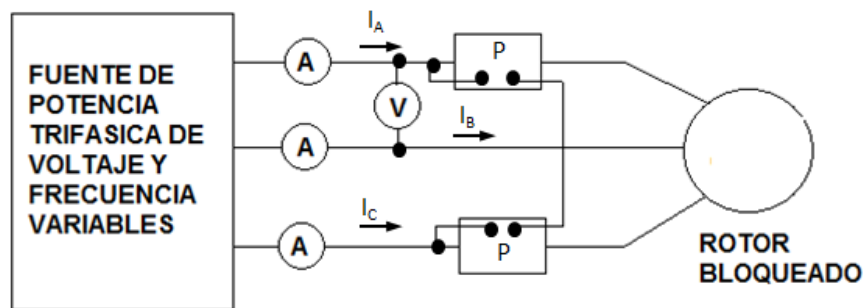
La tercera prueba que se puede realizar en un motor de inducción para determinar los parámetros de circuito se llama *prueba de rotor bloqueado*. Durante esta prueba que corresponde a la de corto circuito del transformador, se bloquea o enclava el rotor de tal forma que no se puede mover, se aplica voltaje al motor y se miden el voltaje, la corriente y la potencia resultantes.

En la figura 3-A muestra las conexiones para realizar la prueba de roto bloqueado. Para llevar a cabo la prueba de rotor bloqueado, se aplica un voltaje CA al estator y se ajusta el flujo de corriente al valor aproximado de plena carga. Cuando la corriente está en su valor de plena carga, se miden el voltaje, la corriente y la potencia resultantes que fluyen hacia el motor.

En la figura 3-B se muestra el circuito equivalente para esta prueba, se puede ver como el rotor se encuentra quieto, el deslizamiento es  $s=1$  y, por tanto, la resistencia del rotor  $R_2/s$  es justamente igual a  $R_2$  (un valor muy pequeño). Puesto que  $R_2$  y  $X_2$  son tan pequeños, casi toda la corriente de entrada fluirá a través de ellas en lugar de hacerlo a través de la reactancia de magnetización  $X_M$  que es mucho mayor. En estas condiciones el circuito es muy parecido a la combinación de  $X_1$ ,  $R_1$ , y  $R_2$ .

Después que se han fijado el voltaje y la frecuencia para las pruebas, el flujo de corriente en el motor se ajusta con rapidez cerca del valor nominal y se miden la potencia, el voltaje y la potencia de entrada, antes de que el rotor se caliente demasiado. La potencia de entrada al motor está dada por:

$$P = \sqrt{3}V_T I_L \cos \theta \quad \text{[2]}$$



$$I_L = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} = I_{Lnominal}$$

Figura A.3-A. Circuito de prueba de rotor bloqueado

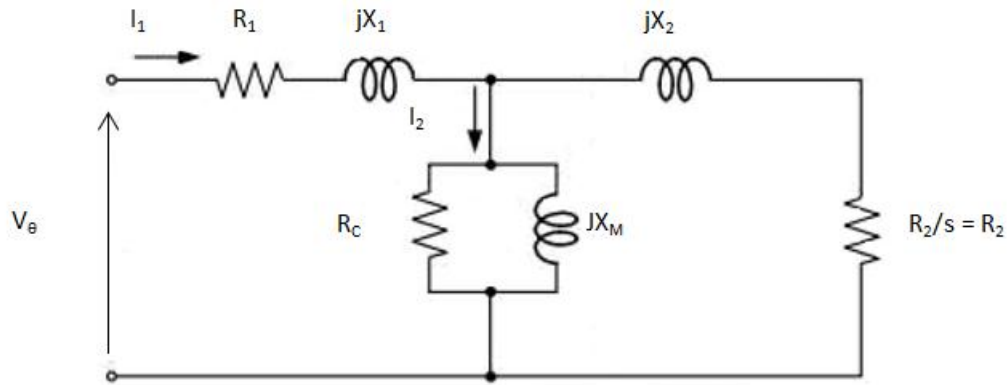


Figura 3-B Circuito equivalente de motor.

De modo que el factor de potencia del rotor bloqueado se puede encontrar como

$$PF = \cos\theta = \frac{P_{in}}{\sqrt{3}V_T I_T} \quad (\text{A-6})$$

Y el ángulo de impedancia  $\theta$  es justamente igual al coseno inverso de  $PF$ .

La magnitud de la impedancia total del circuito del motor es:

$$|Z_{LR}| = \frac{V\phi}{I_j} = \frac{V_T}{\sqrt{3}I_L} \quad (\text{A-7})$$

La resistencia de rotor bloqueado  $R_{LR}$  es igual a:

$$R_{LR} = R_1 + R_2 \quad (\text{A-8})$$

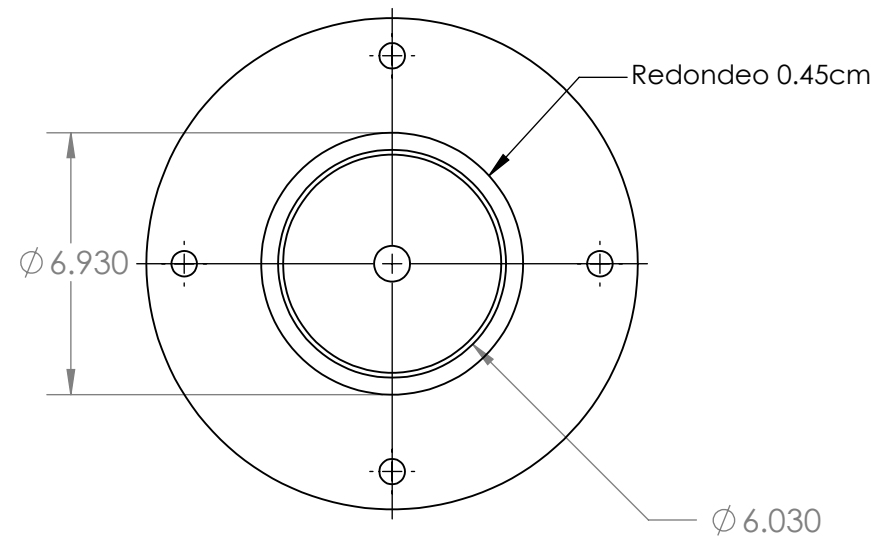
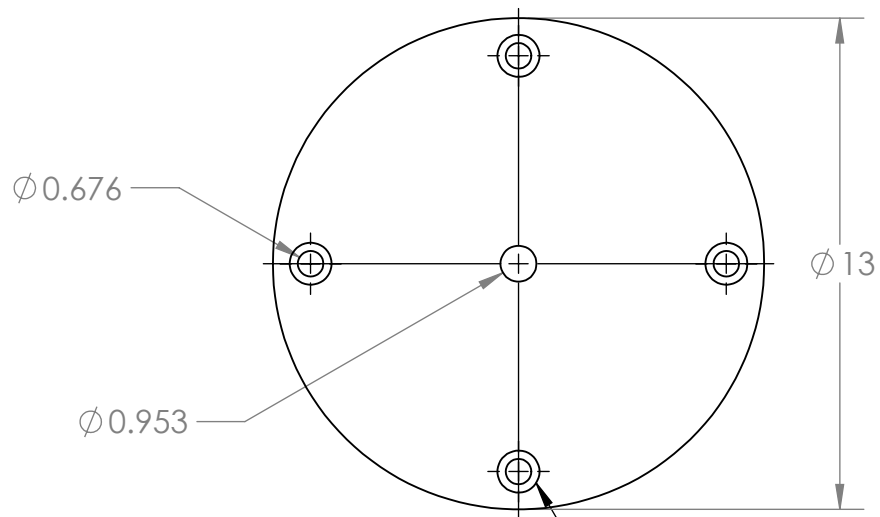
Mientras que la reactancia de rotor bloqueado  $X'_{LR}$  es igual a:

$$X'_{LR} = X'_1 + X'_2 \quad (\text{A-9})$$

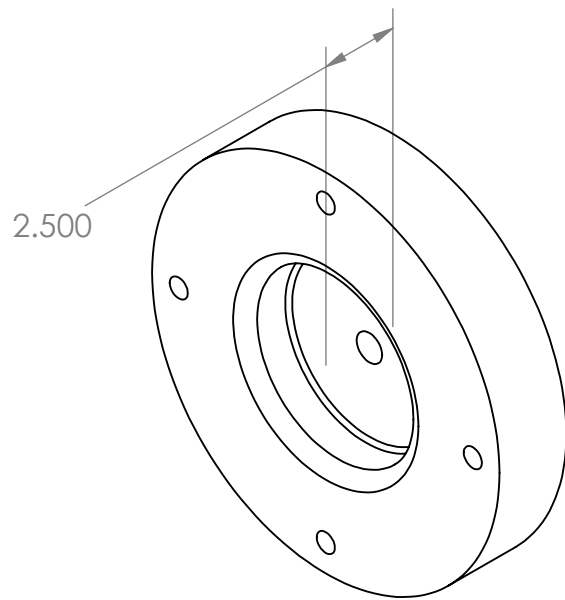
Donde  $X'1$  y  $X'2$  son las reactancias del estator y del rotor a la frecuencia de prueba, respectivamente.

Con los resultados de estas pruebas, es posible conocer las características y el comportamiento básico que pudiera tener una máquina de inducción. Al tener las constantes indispensables de  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $X_1$ ,  $X_2$ , y un valor de  $X_M$  para las corrientes y voltajes nominales. Sin embargo como se ha mencionado, tanto la potencia reactiva suministrada así como la magnetización dada al generador autoexcitado serán los que regularan el comportamiento de este.

## Planos Y Dimensiones



4 Tornillos de Cabeza Hueca  
HX-SHCS-0.25-28x1.125"x1.125"



TÍTULO:  
**CABEZA DE  
CAMARA**

DIBUJADO: DANIEL LEAL

REVISADO:

MASA: 2.18 kg

COMENTARIOS:

N.º DE DIBUJO:  
**DIBUJO 1**

REV

SIGUIENTE ENSAMBLAJE: CAMARA DE VOLUMEN VARIABLE

MATERIAL: ACERO ESTRUCTURAL A36

MODULO DE ELASTICIDAD: 200 GPa

CENTRO DE INVESTIGACION EN MATERIALES AVANZADOS, S.C.

ACABADO:

LIMITE ELASTICO: 250 MPa

DIMENSIONES: mm

ESCALA: 1:2

HOJA 1 DE 1

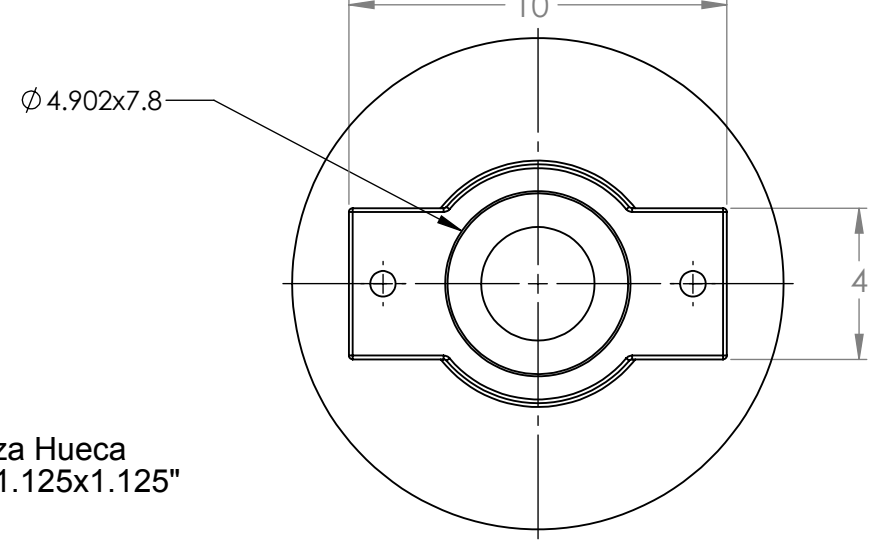
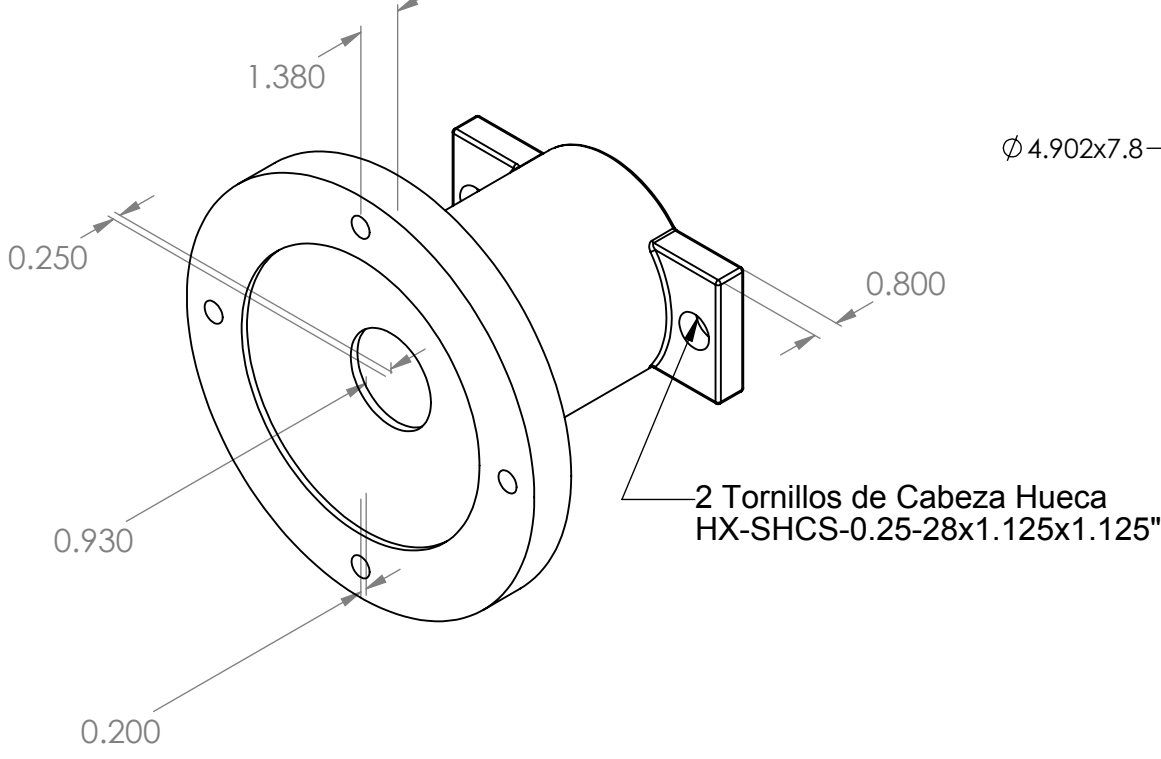
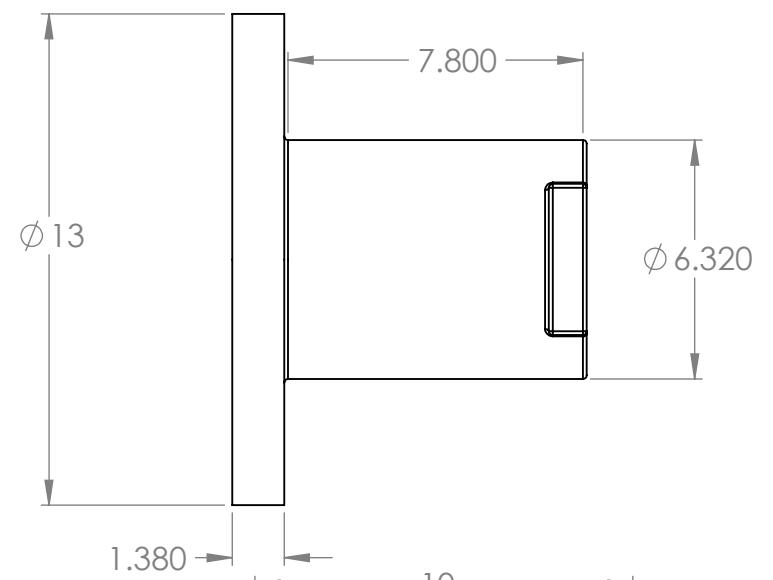
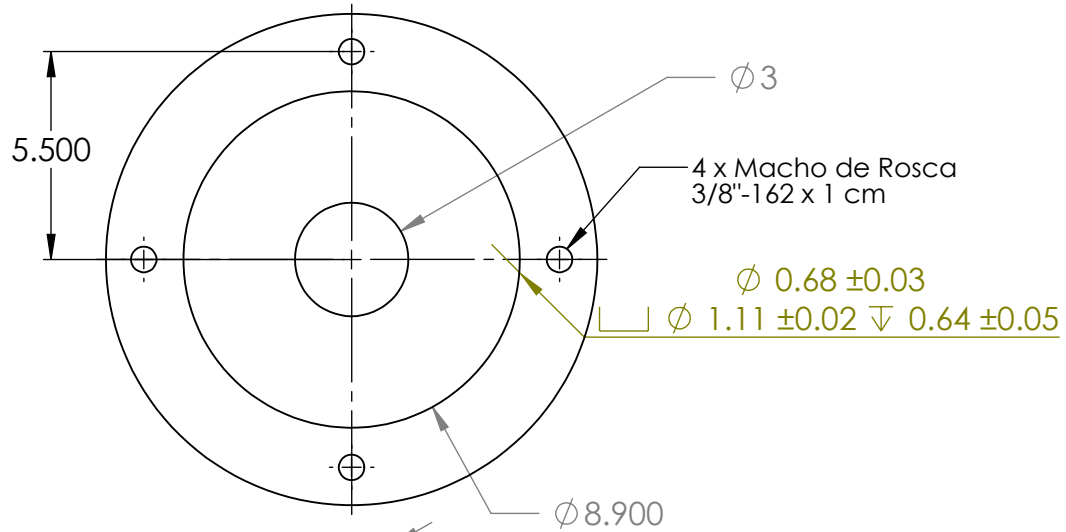
5

4

3

2

1



TITULO:  
**CUERPO DE CAMARA**

DIBUJADO: DANIEL LEAL	REVISADO:	MASA: 2.05 KG	COMENTARIOS:	N.º DE DIBUJO: <b>DIBUJO 2</b>	REV
SIGUIENTE ENSAMBLAJE: CAMARA DE VOLUMEN VARIABLE	MATERIAL : ACERO ESTRUCTURAL A36	MODULO DE ELASTICIDAD: 200 GPa			
CENTRO DE INVESTIGACION EN MATERIALES AVANZADOS, S.C.	ACABADO:	LIMITE ELASTICO: 250 MPa	DIMENSIONES: cm	ESCALA: 1:2	HOJA 1 DE 1

5

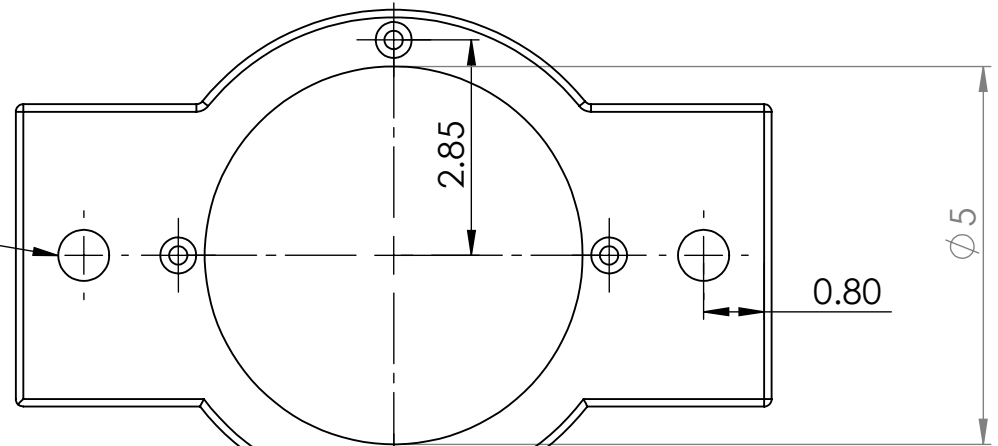
4

3

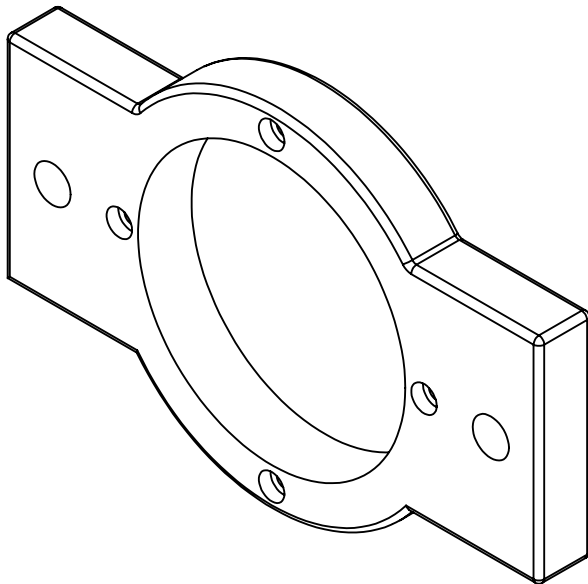
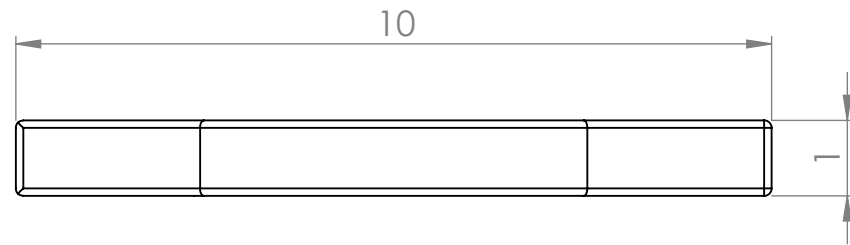
2

1

Perforado para Macho de  
Tornillo 2 x HX-SHCS-0.25-  
28x0.4375"x0.4375"



Perforado para Macho de  
Tornillo 4 x HX-SHCS-0.086-  
64"x0.625"x0.625"



TITULO:  
**BASE ACTUADOR**

DIBUJADO: DANIEL LEAL

REVISADO:

MASA: 0.22 kg

COMENTARIOS:

N.º DE DIBUJO:  
**DIBUJO 3**

REV

SIGUIENTE ENSAMBLAJE: ACTUADOR

MATERIAL : ACERO ESTRUCTURAL A36

MODULO DE ELASTICIDAD: 200 GPa

CENTRO DE INVESTIGACION EN MATERIALES AVANZADOS, S.C.

ACABADO:

LIMITE ELASTICO: 250 MPa

DIMENSIONES: cm

ESCALA: 1:1

HOJA 1 DE 1

5

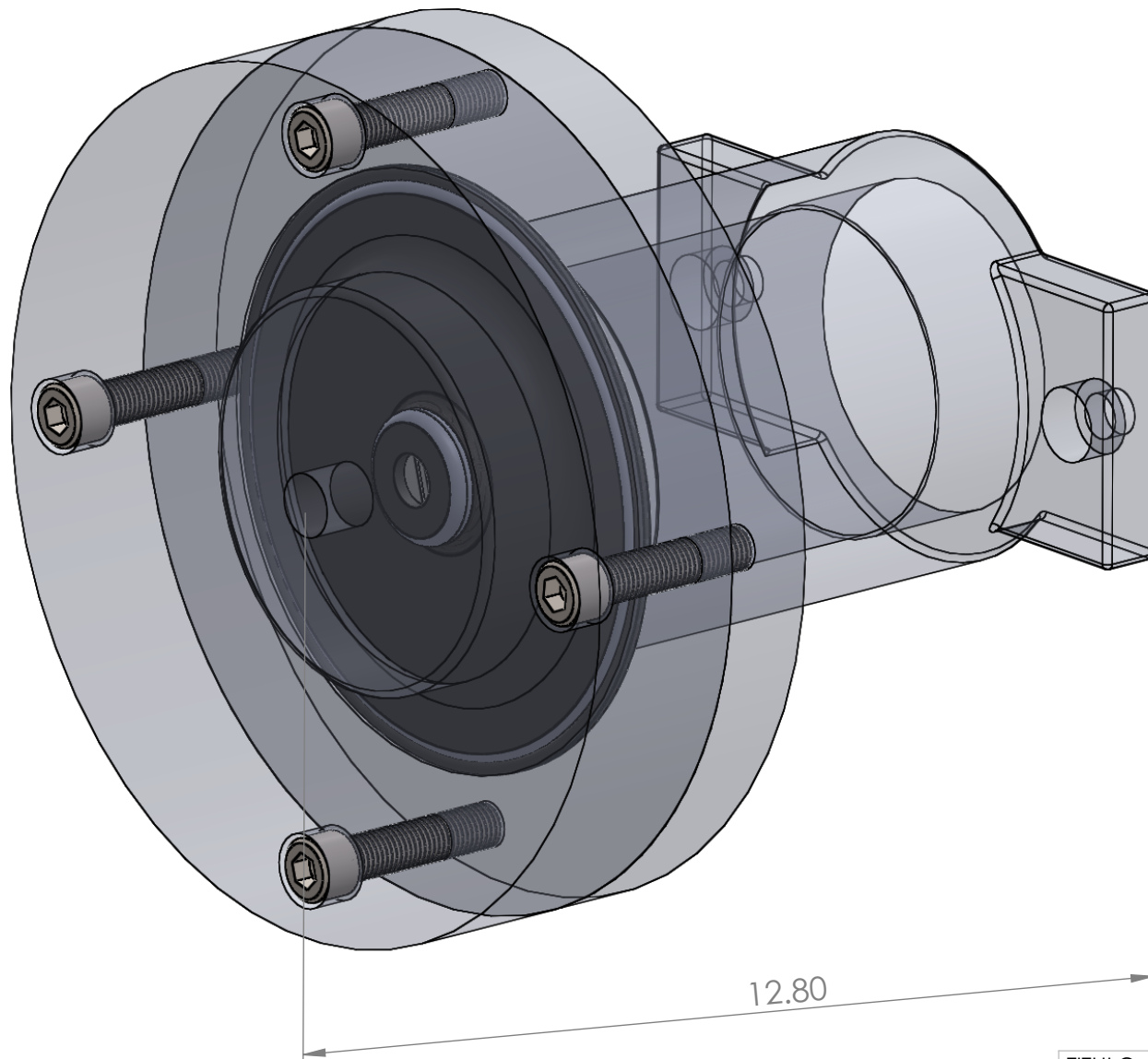
4

3

2

1





TITULO:  
**CAMARA DE  
 VOLUMEN VARIABLE**

N.º DE DIBUJO:  
**DIBUJO 4**

REV

ESCALA: 1:1

HOJA 1 DE 1

DIBUJADO: DANIEL LEAL

PIEZAS DE ENSAMBLE:  
 (1) CABEZA DE CAMARA  
 (1) CUERPO DE CAMARA  
 (1) CONJUNTO DIAFRAGMA

REVISADO:

COMENTARIOS:

SIGUIENTE ENSAMBLAJE: SISTEMA DE CONTROL

MASA: 4.24 kg

CENTRO DE INVESTIGACION EN MATERIALES AVANZADOS, S.C.

DIMENSIONES: cm

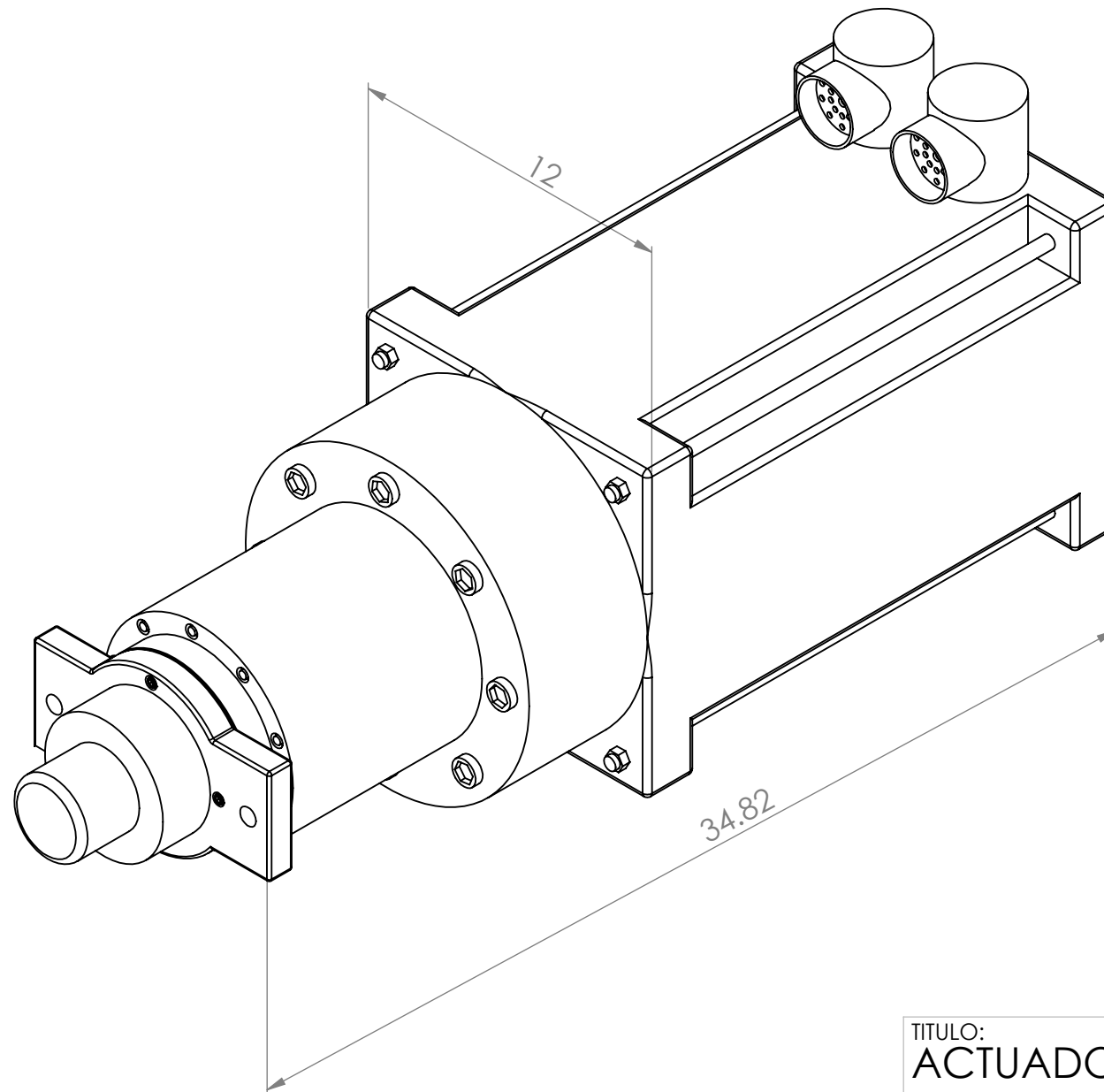
5

4

3

2

1



TITULO:  
**ACTUADOR**

DIBUJADO: DANIEL LEAL	REVISADO:	MASA: 12.92 kg	COMENTARIOS: EN EL DIBUJO SE MUESTRA INSTALADO LA BASE DE ACTUADOR DEL DIBUJO 3	N.º DE DIBUJO: <b>DIBUJO 5</b>	REV
SIGUIENTE ENSAMBLAJE: SISTEMA DE CONTROL	MARCA: SKF	FUERZA PICO: 23.8 kN			
CENTRO DE INVESTIGACION EN MATERIALES AVANZADOS, S.C.	NUMERO DE PARTE: CEMC2404-125-1-62L	LONGITUD: 40.7 cm	DIMENSIONES: cm	ESCALA: 1:2	HOJA 1 DE 1

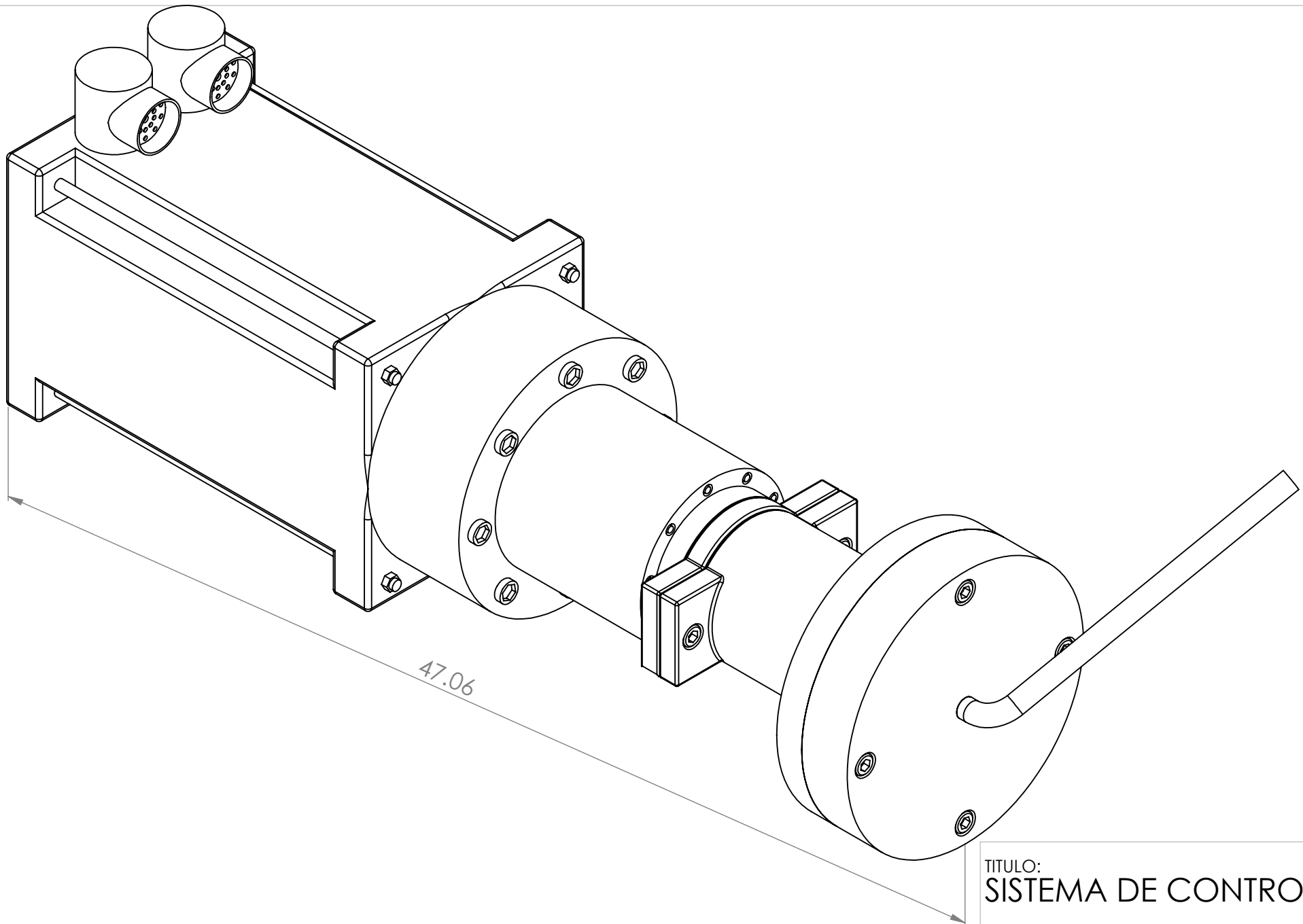
5

4

3

2

1



47.06

TITULO:  
SISTEMA DE CONTROL

DIBUJADO: DANIEL LEAL	PIEZAS ENSAMBLE: (1) CAMARA DE VOLUMEN VARIABLE (1) ACTUADOR (1) TUBO CONECTOR	REVISADO:	COMENTARIOS:	N.º DE DIBUJO: DIBUJO 6	REV
SIGUIENTE ENSAMBLAJE:		MASA: 17.17 kg		ESCALA: 1:2	HOJA 1 DE 1
CENTRO DE INVESTIGACION EN MATERIALES AVANZADOS, S.C.		DIMENSIONES: cm			

5

4

3

2

1