

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION

“CARACTERIZACIÓN DE TURBINA TESLA PARA IMPLEMENTACIÓN EN UN SISTEMA DE MICROGENERACIÓN”

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

PRESENTA:

ING. FRANSUE COCOLETZI PIANTZI

DIRECTORES DE TESIS

DR. JORGE BEDOLLA HERNÁNDEZ

DR. MARCOS BEDOLLA HERNÁNDEZ

APIZACO, TLAXCALA

SEPTIEMBRE 2018



SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de Apizaco

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Apizaco, Tlaxcala, 18/Enero/2019

Oficio No.: DEPI/038/19

ASUNTO: **Se Autoriza Impresión de Tesis de Grado.**

ING. FRANSUE COCOLETZI PIANTZI
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO
EN INGENIERÍA MECATRÓNICA
No. de Control: M07370449
P R E S E N T E.

Por este medio me permito informar a usted, que por aprobación de la Comisión Revisora asignada para valorar el trabajo, mediante la Opción: I Tesis de Grado por Proyecto de Investigación, de la Maestría en Ingeniería Mecatrónica, que presenta con el tema: "CARACTERIZACIÓN DE TURBINA TESLA PARA IMPLEMENTACIÓN EN UN SISTEMA DE MICROGENERACIÓN" y conforme a lo establecido en el Procedimiento para la Obtención del Grado de Maestría en el Instituto Tecnológico, la División de Estudios de Posgrado e Investigación a mi cargo le emite la:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Debiendo entregar un ejemplar del mismo debidamente encuadernado y seis copias en CD en formato PDF, para presentar su Acto de Recepción Profesional a la brevedad.

Sin otro particular por el momento, le envío un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Pensar para Servir, Servir para Triunfar®

DR. JOSÉ FEDERICO CASCO VÁSQUEZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN.



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

C.p. Expediente.
JFCV/RCM*mebr.



Carretera Apizaco-Tzompantepec, esquina con Av. Instituto Tecnológico S/N
Conurbado Apizaco-Tzompantepec, Tlaxcala, Mex. C.P. 90300
Tel. 01 (241) 4172010, Ext. 146, 246; e-mail: posgrado@apizaco.tecnm.mx
www.tecnm.mx | www.apizaco.tecnm.mx



SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de Apizaco

Apizaco, Tlaxcala, **11/Diciembre/2018**

ASUNTO: Aprobación del trabajo de Tesis de Maestría.

DR. JOSÉ FEDERICO CASCO VÁSQUEZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN.
P R E S E N T E.

Por este medio se le informa a usted, que los integrantes de la Comisión Revisora para el trabajo de tesis de maestría que presenta el ING. FRANSUE COCOLETZI PIANTZI con N° de control M07370449, candidato al grado de Maestro en Ingeniería Mecatrónica y egresado del Instituto Tecnológico de Apizaco, cuyo tema es "CARACTERIZACIÓN DE TURBINA TESLA PARA IMPLEMENTACIÓN EN UN SISTEMA DE MICROGENERACIÓN", fue:

A P R O B A D O

Lo anterior, al valorar el trabajo profesional presentado por el candidato y constatar que las observaciones que con anterioridad se le marcaron así como correcciones sugeridas para su mejora ya han sido realizadas.

Por lo que se avala se continúe con los trámites pertinentes para su titulación.

Sin otro particular por el momento, le envió un cordial saludo.

LA COMISIÓN REVISORA


DR. JORGE BEDOLLA HERNÁNDEZ


DR. VICENTE FLORES LARA


DR. MARCOS BEDOLLA HERNÁNDEZ


DR. CARLOS ALBERTO MORA SANTOS

C. p.- Interesado.



Carretera Apizaco-Tzompantepec, esquina con Av. Instituto Tecnológico S/N
Conurbado Apizaco-Tzompantepec, Tlaxcala, Mex. C.P. 90300
Tel. 01 (241) 4172010, Ext. 146, 246; e-mail: posgrado@apizaco.tecnm.mx
www.tecnm.mx | www.apizaco.tecnm.mx

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres Israel Cocoltzi Cahuantzi y Pascuala Gloria Piantzi Tlilayatzi quienes siempre me han brindado su apoyo y que gracias a ellos estoy realizando uno de mis sueños.

AGRADECIMIENTOS

A mis hermanas Deisy, Vianey, Briceyda y Dianelly por su apoyo incondicional.

A mi director de tesis, Dr. Jorge Bedolla Hernández por todo el tiempo que dedicó a la realización de esta tesis, así como por toda su paciencia hacía mí.

A mi comité tutorial, Dr. Marcos Bedolla Hernández, Dr. Vicente Flores Lara y Dr. Carlos Alberto Mora Santos por compartir sus conocimientos y asesoría en la realización de este proyecto.

A mis amigas de la maestría Karla “Kero”, Maria José “Majo”, quienes a pesar del poco tiempo de conocernos me han brindado su amistad y confianza, las aprecio mucho.

A mis amigos Alan, Víctor “Vicho”, Ángel, Luis amigos desde ya hace mucho tiempo y en quienes puedo confiar aún en las peores situaciones.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y a la Secretaría de Educación Pública (SEP) por el apoyo económico para la realización de este proyecto, sin su ayuda habría sido más complicado realizarlo.

Al TECNM y el Instituto Tecnológico de Apizaco por permitirme crecer y alcanzar uno de mis sueños.

Resumen

La turbina Tesla es un dispositivo desarrollado por el Ingeniero Nikola Tesla la cual, a diferencia de las turbinas convencionales, esta carece de álabes teniendo en lugar de estos una serie de discos a través de los que se hace circular un fluido y que por efecto de fricción entre el fluido y los discos se genera el movimiento rotativo en el eje de la turbina.

La aplicación más común de la turbina es como propulsora convirtiendo la energía proporcionada por el fluido que circula a través de ella a una energía que se pueda transmitir a otro dispositivo mecánico. Para el caso del presente proyecto se emplea para la generación de energía eléctrica a nivel micro, en donde se realizan pruebas de generación de electricidad y utilizando como fluido de trabajo vapor.

Índice

Índice -----	I
Lista de Figuras -----	III
Lista de Tablas -----	V
Capítulo I Acercamiento al Tema de Investigación -----	1
1.1 Introducción -----	1
1.2 Planteamiento del Problema -----	5
1.3 Justificación -----	7
1.4 Objetivos -----	9
1.5 Metodología -----	10
1.6 Estado del arte -----	11
Capítulo II Marco Teórico -----	25
2.1 Generador de Vapor -----	25
2.1.1 Rendimiento de Generador de Vapor -----	26
2.1.2 Rendimiento Estacional -----	27
2.1.3 Balance de Materia y Energía -----	28
2.2 Turbina Tesla -----	30
2.2.1 Parámetros de Diseño -----	34
2.3 Generadores Eléctricos -----	36
2.3.1 Partes de un Generador Eléctrico -----	38
2.3.2 Potencia y Energía de Un Generador -----	39
Capítulo III Desarrollo -----	41
3.1 Elementos de Medición -----	42
3.2 Generación de Vapor -----	48
3.2.1 Dimensionamiento de la Caldera -----	49
3.2.2 Desarrollo de Pruebas -----	53

3.3 Operación de la Turbina -----	55
3.3.1 Realización de Pruebas -----	56
3.4 Generación de Electricidad -----	58
Capítulo IV Análisis de Resultados -----	63
4.1 Resultados Obtenidos de Generador de Vapor -----	63
4.1.1 Obtención de la Potencia de la Caldera -----	68
4.2 Resultados de Turbina Tesla -----	69
4.2.1 Cálculo de la potencia -----	72
4.3 Generación De Energía Eléctrica -----	73
Capítulo V Conclusiones y Recomendaciones -----	79
5.1 Conclusiones -----	79
5.2 Recomendaciones -----	80
Bibliografía -----	82
Anexos -----	85

Lista de Figuras

Figura 1. 1 Consumo de energía por combustible -----	6
Figura 1. 2 Muestreo de Costos Instalados -----	9
Figura 1. 3 Características de una celda fotovoltaica a)Absorción del fotón incidente de la radiación solar y la carga de excitación de la banda de balance a la de conducción b) Corriente – Voltaje y potencia -----	13
Figura 1. 4 Celda Fotovoltaica -----	14
Figura 1. 5 Porcentaje de la producción total (MWp) a través de los años -----	15
Figura 1. 6 A. Simulación de la componente vertical del viento en el borde del techo del edificio de Bunnings Warehouse para vientos del sector suroeste (Nota. La componente vertical está representada por v en CFX). B. Simulación del contorno de la componente vertical a la mitad de Bunnings Warehouse para vientos del sector suroeste (Nota. La componente vertical es representada por v en CFX) -----	16
Figura 1. 7 A. Simulación de los vectores en el borde del techo de Bunnings Warehouse del sector suroeste. B. Simulación de los vectores de velocidad del viento del sector sureste del edificio de Bunning -----	16
Figura 1.8 Previsión de la potencia eólica acumulada por regiones en el mundo 2017-2021 -----	17
Figura 1.9 Número Mach en relación al rango de aspecto -----	21
Figura 2. 1 Modelo Básico de Caldera -----	25
Figura 2. 2 Proceso de Generación de Vapor -----	28
Figura 2. 3 Esquema de Turbina Diseñada por Tesla -----	31
Figura 2. 4 Resultados Típicos para una máxima eficiencia como una función del rango de flujo -----	32
Figura 2. 5 Cambio típico para el cambio de presión en función del flujo y la velocidad -----	33
Figura 2. 6 Fuerza electromotriz inducida en una espira que gira a una velocidad constante en un campo magnético uniforme -----	36
Figura 2. 7 Generador eléctrico Síncrono -----	37
Figura 2. 8 Esquema magnético y Eléctrico del generador -----	38
Figura 2. 9 Potencias del Generador eléctrico -----	40
Figura 3. 1 Esquema de Medición -----	41

Figura 3. 2 Manómetro Dewit -----	43
Figura 3. 3 Cronometro -----	43
Figura 3. 4 Termómetro Bimetálico -----	44
Figura 3. 5 Medidor de Flujo OPTISWIRL 407 -----	45
Figura 3. 6 Tacómetro Digital -----	46
Figura 3. 7 Multímetro FLUKE -----	47
Figura 3. 8 Caldera Usada -----	48
Figura 3. 9 Medición en instrumento de referencia -----	49
Figura 3. 10 Lecturas realizadas en recipiente de prueba -----	50
Figura 3. 11 Variación de la cantidad de líquido -----	51
Figura 3. 12 Indicador de Nivel Instalado -----	52
Figura 3. 13 Turbina Utilizada -----	56
Figura 3. 14 Acoplamiento Caldera – Turbina -----	57
Figura 3. 15 Acoplamiento Rotex -----	59
Figura 3. 16 Curva de Potencia de Alternador -----	59
Figura 3. 17 Batería 12V 35Ah -----	60
Figura 3. 18 Control de Carga -----	61
Figura 4. 1 Pruebas de Presurización Con Gas LP -----	64
Figura 4. 2 Presurización Biomasa -----	65
Figura 4. 3 Tiempo Promedio de Presurización -----	66
Figura 4. 4 Flujo Máximo -----	67
Figura 4. 5 Velocidad Máxima de la Turbina -----	70
Figura 4. 6 Flujo que circula a través de la turbina -----	71
Figura 4. 7 Voltaje Máximo Alcanzado Sin Carga -----	75
Figura 4. 8 Velocidad Para Voltaje Máximo del Alternador -----	76
Figura 4. 9 Voltaje Generado Con Batería de 12V a 35Ah -----	77

Lista de Tablas

Tabla 1. 1 Efecto de la variación de los parámetros de operación en el rendimiento de la turbina -----	19
Tabla 1. 2 Pruebas con variación en parámetros de operación -----	20
Tabla 1. 3 Parámetros Fijos de prueba -----	21
Tabla 1. 4 Comparación de los resultados experimentales y de simulación de la turbina Tesla -----	22
Tabla 1. 5 Análisis de discos en turbina Tesla -----	23
Tabla 3. 1 Especificaciones de Manómetro Dewit -----	42
Tabla 3. 2 Especificaciones de Medidor de Flujo OPTISWIRL 407 -----	45
Tabla 3. 3 Especificaciones Técnicas de Tacómetro -----	46
Tabla 3. 4 Especificaciones de Multímetro FLUKE 170 -----	47
Tabla 3. 5 Toma de Lecturas de Recipiente para pruebas -----	51
Tabla 3. 6 Características del Generador de Vapor -----	53
Tabla 3. 7 Presurización a diferentes niveles de líquido -----	54
Tabla 3. 8 Especificaciones de Turbina -----	55
Tabla 3. 9 Velocidad Máxima alcanzada con diferentes fluidos -----	58
Tabla 4. 1 Comparación Diseño - Real -----	73
Tabla 5. 1 Características de operación requeridas por la turbina -----	79

CAPÍTULO I ACERCAMIENTO AL TEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

El sector energético es uno de los más influyentes en el desarrollo de la sociedad, por lo que diversos han implementado políticas energéticas que promueven el desarrollo de éste, de tal modo que no estén en conflicto con el desarrollo de las sociedades y su entorno.

La importancia de estas políticas surge de la necesidad de buscar energías alternas a los combustibles fósiles puesto que son fuentes de energía no renovables, por lo que, esto debe ser un factor al momento de seleccionar la fuente de energía. La energía proveniente de la biomasa, el aire, el sol y la térmica son algunas de las alternativas para la sustitución o reducción de consumo de combustibles fósiles, sin embargo, aún se continúan desarrollando investigaciones que contribuyan en la mejora de la implementación de dichas fuentes de energía.

La importancia del cuidado del medio ambiente es un factor a tomar en cuenta al momento de implementar sistemas innovadores que sean accesibles, eficientes, funcionales y de bajo costo. En la actualidad ya existen sistemas que reducen las emisiones de gases invernadero ya que muchos de estos funcionan por medio de energías renovables.

La generación de energía eléctrica, a nivel mundial, depende en gran medida de las fuentes no renovables como el petróleo y el carbón, la Agencia Internacional de Energía se estima un incremento en el consumo de estos combustibles en países tales como China y La India (IEA, 2015). Las razones de este incremento se deben principalmente al crecimiento de la población y la industrialización. La India por su parte trabaja en el desarrollo de tecnologías que reduzcan las emisiones de CO₂, esto a partir de la implementación de las energías eólica y la solar puesto que debido a su posición geográfica obtiene ventaja en la implementación de esos sistemas [1].

Los combustibles fósiles representan más de la mitad de la demanda del total de la energía comercial, siendo favorecida por las aplicaciones en el desarrollo tecnológico y que a su vez responde a patrones de mercado [2].

Derivado de todo lo anterior es necesario plantear políticas que permitan hacer frente de manera óptima a los problemas de energía actuales, esto con el firme propósito de que se permita el desarrollo de las sociedades en sus diferentes estratos, tal es el caso de Europa quienes en el 2011 en su política energética establecieron se debe: 1) garantizar el funcionamiento del mercado de la energía; 2) garantizar la seguridad del abastecimiento energético en la Unión; 3) fomentar la eficiencia energética y el ahorro energético, así como el desarrollo de formas de energía nuevas y renovables; y 4) fomentar la interconexión de las redes energéticas [2].

A partir de estas políticas Europa se propone lograr 1) una reducción de al menos un 20 % en las emisiones de gases de efecto invernadero con respecto a los niveles de 1990; 2) un incremento del 20 % de la cuota de las energías renovables en el consumo de energía, y 3) una mejora de la eficiencia energética de un 20 %.

En México, por otro lado, en el año 2014 el gobierno mexicano a través de la Estrategia Nacional de Energía establece la implementación de diversas reformas estructurales las cuales se regulan la gestión de recursos como el petróleo y la electricidad las cuales se realizan a través de PEMEX y CFE respectivamente [3].

Resultado de este plan energético implementado en el año 2014 se crea el Fondo Mexicano del Petróleo para la Estabilización y el Desarrollo. El Fondo permitirá generar ahorros monetarios para destinarlos al desarrollo de educación, ciencia y tecnología, energías renovables entre otros. Esto pretende promover y aprovechar los conocimientos y tecnologías de la industria para así lograr la reducción progresiva de la emisión de contaminantes a la atmosfera y hacer frente al cambio climático, lo que a su vez disminuirá los riesgos ambientales que afectan a la sociedad mexicana [4].

La política energética en México promueve el desarrollo y la implementación de energías verdes, con el objetivo de convertirlo en un país más competitivo en materia energética, tanto hacia el interior como el exterior, debido a que se estará promoviendo la competencia, factor que generará que haya precios más justos y una menor dependencia de los combustibles fósiles.

La energía eléctrica es uno de los servicios más importantes en la vida de las personas puesto que tiene una amplia gama de aplicaciones en electrodomésticos, equipos de cómputo, alumbrado público y máquinas industriales. Esto facilita la realización de tareas que en el pasado eran complicadas y que incluso resultaban peligrosas para quienes las realizaban. Para lograr proporcionar electricidad a los diferentes usuarios se requiere que su producción se lleve a cabo en centrales eléctricas a partir de las cuales se transporta hasta las zonas habitadas mediante tendidos de cables conductores a alta tensión hasta los puntos de distribución. La tensión es acondicionada a un valor más bajo de acuerdo a las zonas de consumo, ya sea industrial o residencial. Las operaciones de bajada y subida de tensión se llevan a cabo en las estaciones transformadoras, que se sitúan a la salida de las centrales, a la entrada de las ciudades y en los nudos de distribución de la red.

Las estaciones que pertenecen al proceso de Generación Distribuida son plantas generadoras, pero en este caso, a menor escala y que consisten en la generación de energía eléctrica por medio de muchas pequeñas fuentes de energía en lugares lo más próximos posibles a las cargas. Sus características generales son: a) Reducen pérdidas en la red, al reducir los flujos de energía por la misma; b) Su energía vertida no revierte flujos hacia la red de transporte. Los modos de generación de energía distribuida son:

- 1) Sistemas fotovoltaicos en los se emplea la energía solar a través de celdas fotovoltaicas, para después ser almacenada
- 2) Sistemas Eólicos. - La eólica suele ser complementaria a la solar; en los días cuando no hay sol suele hacer viento y viceversa. Algunos emplazamientos de

generación distribuida combinan energía eólica con energía solar, lo que se conoce como sistemas híbridos

- 3) Cogeneración. - Las fuentes de cogeneración distribuida usan micro-turbinas de gas natural como combustible o motores de explosión para activar los generadores. El calor generado es aprovechado para calentar aire o agua, o para activar un refrigerador por absorción para aire acondicionado.

La cogeneración es el procedimiento mediante el cual se obtiene simultáneamente energía eléctrica y energía térmica útil (vapor, agua caliente sanitaria); además, se puede producir frío (hielo, agua fría, aire frío, por ejemplo) se llama tri-generación. La micro-cogeneración es la utilización de la cogeneración por parte de los consumidores finales de la energía. Estos consumidores finales pueden ser los habitantes de viviendas uni o plurifamiliares, tanto en entornos aislados o dispersos, o cualquier implantación humana con ciertas necesidades energéticas.

La micro-generación ofrece diversas ventajas como el tamaño, el costo y la instalación y el mantenimiento, lo que facilita la operación de estos sistemas, debido a esto es interesante la exploración de sistemas que cumplan con estas características para así evaluar su implementación y posibles aplicaciones.

Por lo anterior, en este proyecto estudia la implementación de una turbina Tesla en un sistema de micro-generación, ya que esta máquina ofrece ventajas tales como la fácil operación e instalación, bajo costo de fabricación, bajo costo de mantenimiento, así como su capacidad de operar con diversos tipos de fluidos como: agua, aire y vapor.

Este proyecto se centra en obtener las características de operación necesarias para la implementación de una Turbina tesla, teniendo como límite el almacenamiento de la energía ya que el proceso de acondicionamiento es un proceso diferente que afecta directamente al dispositivo que la contiene, que en este caso es la batería.

1.2 Planteamiento del Problema

La electricidad es un servicio que tiene una gran influencia en el desarrollo de los países y sus diferentes regiones, ya que la falta de ella genera problemas en servicios y actividades como [5]:

- El suministro de agua potable
- La posibilidad de utilizar cualquier artefacto eléctrico en los hogares acarrea serios perjuicios a los usuarios.
- En materia económica, el impacto de los cortes de energía se materializa fundamentalmente en los sectores comercial e industrial, con pérdidas de producción, lucro cesante por no poder operar normalmente, pérdidas de productos por interrupción de la cadena de frío.
- En otros aspectos, también se ha observado que, durante apagones generalizados ocurren saqueos, robos y un aumento de otros hechos criminales.

Los procesos de generación de energía eléctrica más comunes son realizados mediante el uso de combustibles fósiles, debido a que son los que tienen mejores propiedades energéticas y que según un estudio realizado por la Agencia Internacional de Energía se estima que la generación de energía eléctrica por medio de combustibles fósiles representa más del 70%, esto según el estudio más reciente realizado en el año 2016, y de donde se tiene que el resto de fuentes de energía representan el otro 30% dividido entre energías renovable, hidráulica, nuclear y de carbón [6].

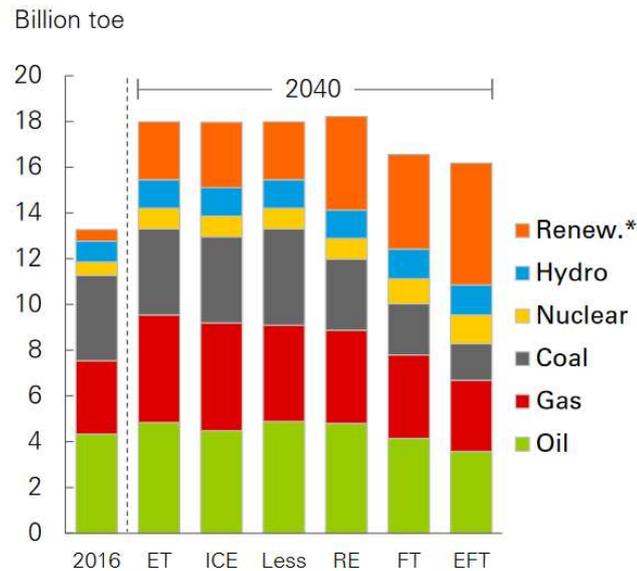


Figura 1. 1 Consumo de energía por combustible [6]

La ecología es un área que, al igual que los sectores social y económico, es afectada puesto que la producción de energía eléctrica es mayormente realizada mediante el uso de combustibles fósiles los cuales son los causantes de la producción de la mayor parte de la contaminación y que son parte de los recursos no renovables, sin embargo, su aplicación aún abarca más del 50% de los procesos de generación de energía.

La ubicación es también un factor importante en el proceso de selección del método de generación a instalar ya que como se menciona en la introducción la instalación de la red eléctrica principal requiere de un tendido de cable, y que, debido a las condiciones físicas de ciertas regiones resulta costoso e incluso complicado realizar este proceso de electrificación, este tipo de factores son limitantes para la distribución de energía eléctrica.

Derivado de lo mencionado anteriormente se genera la necesidad de desarrollar procesos de generación de energía alternos de tal manera que se empleen fuentes de energía o combustibles que sean renovables. Ya que éstas fuentes de energía pueden ser encontradas con mayor facilidad en el medio ambiente y que además tienen la posibilidad de seguir produciéndose ya sea de forma natural o mediante técnicas de producción artificial o controlada.

1.3 Justificación

La generación de la electricidad toma su importancia del hecho de ser uno de los servicios más influyentes en el desarrollo de las ciudades y las diferentes comunidades en los países, razón por la que se requiere desarrollar métodos complementarios de generación que permitan proporcionar este servicio.

Los elementos integrados en el sistema de generación de energía eléctrica deben ser [6]:

- La construcción. – Esta no debe exceder los costos de los métodos tradicionales,
- La accesibilidad a la fuente de energía. – La fuente de energía a transformar se deberá obtener del medio ambiente sin necesidad de procesos adicionales para su uso,
- la instalación. – Esta debe ser capaz de instalarse en diversos tipos de regiones

La generación distribuida a nivel micro puede ser una de las opciones que integren los elementos anteriormente mencionados, ya que por sus características como son que: su instalación se realiza en el lugar de consumo, utiliza fuentes de energía renovables, fácil operación y bajo requerimiento de mantenimiento la convierten en una alternativa de generación de energía eléctrica.

La implementación de sistemas de generación distribuida y micro-generación podrían ser la clave para la reducción de costos de producción en México, ya que en el reporte de la Reforma de Energética realizada en 2015, se estimó que las tarifas de la energía eléctrica son 25% más altas que en Estados Unidos de América, aún con el subsidio proporcionado por el gobierno, sin el cual este costo podría subir hasta el 73% [6].

La selección de un método de generación energía eléctrica a desarrollar debe considerar el aspecto ecológico. Razón por la que los métodos de generación más comunes son la energía eólica y la energía solar, ya que son las que se obtienen directamente del medio ambiente y no requieren de un acondicionamiento adicional

aparte del sistema para captación de energía, sin embargo, estas fuentes presentan algunas desventajas, ya que se requiere que el lugar de instalación cumpla con los requisitos necesarios para su operación, que dependen de las condiciones climáticas de la región donde se desean instalar o bien el área requerida para la instalación.

La utilización de la turbina Tesla es una de las posibles opciones para la generación de energía eléctrica ya que ofrece ventajas tales como que se puede instalar en cualquier región y que es de fácil operación, además de poder funcionar con diferentes tipos de fluido.

Éstas características la hacen una opción de generación que cumple con los requisitos de cuidado del medio ambiente, así como de no tener alguna de las limitantes que las dos más comunes poseen. Para ello se requiere de estudiar este dispositivo para así poder comprender mejor su funcionamiento y poder aprovechar las ventajas anteriormente planteadas.

El centro de investigaciones en materiales avanzados trabaja con una propuesta de eficiencia energética utilizando cogeneración con micro-turbinas, proyecto que fue realizado para una empresa en la que se propone reducir el consumo de energía del 20%, en este caso emplearon micro-turbinas de la marca Capstone de 200kW/h las cuales permiten el aprovechamiento de la energía térmica para la generación de energía eléctrica, de donde estiman un ahorro de 16 millones de pesos [7].

La gráfica de la figura 1.7 muestra los resultados del proyecto, en donde se puede ver que las micro-turbinas presentan una reducción de costos en energía en comparación con los de otros tipos de energías, tales como la solar o la eólica que son los tipos de energía más común pudiendo llegar a ser de hasta 3 veces menos [7].

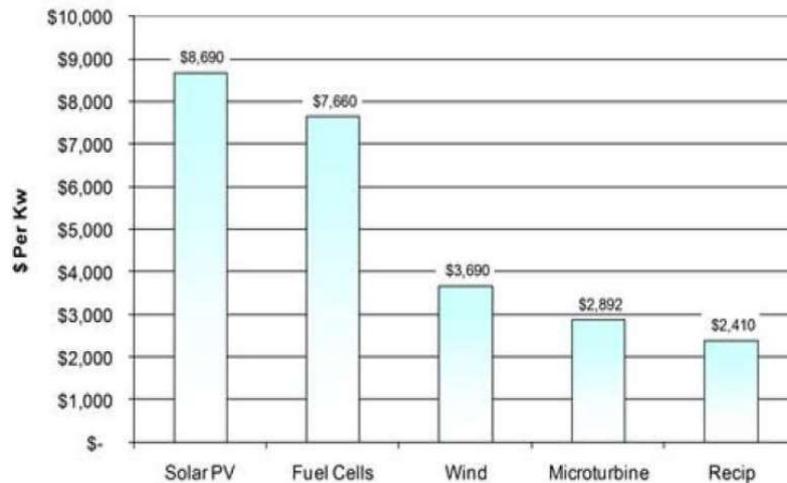


Figura 1. 2 Muestreo de Costos Instalados [7]

1.4 Objetivos

General

Establecer las características de operación de una Turbina Tesla de 1kW de potencia que será empleada en un sistema de generación distribuida a nivel de micro-generación mediante la implementación de un banco de pruebas para poder realizar las mediciones y así obtener las características de operación.

Específicos

- Cuantificar características de presión, volumen y flujo en rangos de operación de la Turbina
- Establecer requerimientos de cantidades de biomasa sólida de acuerdo a los rangos de producción del sistema.
- Determinar el comportamiento de la turbina con respecto a las características del vapor del sistema.
- Acoplar Turbina-Generador de vapor para el establecimiento del punto óptimo de operación.
- Implementar un generador eléctrico comercial.
- Realizar pruebas de generación de Energía.

1.5 Metodología

La primera etapa del proyecto consistió en la realización de fuentes información, esto con la finalidad de tener una referencia acerca de los avances relacionados con el área de desarrollo del proyecto. La revisión bibliográfica permite saber el estatus de los avances y de las áreas de mayor impacto.

La segunda etapa requiere de la realización de una serie de pruebas que permitan validar lo establecido en la teoría, esto permitirá saber la diferencia de un caso y de otro, ya que en la teoría el resultado obtenido es el ideal, algo que se espera del sistema. En la realidad este es expuesto a condiciones que pueden provocar variación en la respuesta, sin embargo, esta debe ser similar al resultado teórico ya que éste sirve de base para el desarrollo experimental.

El proceso de realización de pruebas consistió en:

- 1) Instalación de banco de pruebas para la evaluación de la turbina.

La instalación del banco de pruebas requiere de la selección de los instrumentos de medición adecuados, la instalación del generador de vapor, este generador de vapor tiene que ser dimensionado para saber su capacidad de trabajo.

- 2) Acoplamiento de generador eléctrico comercial

Se realizan pruebas para evaluar el mejor tipo de acoplamiento que permita la reducción de pérdidas de potencia entre estos dos dispositivos.

- 3) Análisis de los resultados obtenidos.

Los resultados obtenidos se comparan con los que fueron obtenidos teóricamente, de este modo se valida el funcionamiento del sistema y se determina si el resultado del proyecto es óptimo, o bien, los requerimientos necesarios para su correcto funcionamiento.

1.6 Estado del Arte

Los científicos han estudiado la electricidad durante siglos, tal es el caso de Benjamin Franklin quien en junio de 1752 hizo un experimento con un papalote en una noche de tormenta y descubrió que los relámpagos eran electricidad, sin embargo, no fue hasta finales del siglo XIX que la electricidad se empezó a usar de forma práctica y a estudiarse formalmente [8].

En 1820, Hans Christian Oersted descubrió que la corriente eléctrica crea un campo magnético. Con este descubrimiento los científicos pudieron relacionar el magnetismo a los fenómenos eléctricos. Más tarde en 1879, Thomas Edison inventó el foco eléctrico. Él perfeccionó un invento similar pero más antiguo utilizando electricidad de baja corriente, el vacío dentro de un globo y un filamento pequeño y carbonizado y produjo una fuente de energía duradera y confiable. En ese momento, la idea del relámpago eléctrico no era nueva, pero no existía nada que fuera lo suficientemente práctico para poderse utilizar domésticamente. Edison no sólo descubrió una luz eléctrica incandescente, sino un sistema de iluminación eléctrico que contenía todos los elementos para hacer que la luz incandescente fuera segura, económica y práctica. Antes de 1879, la electricidad por corriente directa (DC) solamente se utilizaba para iluminar áreas exteriores [9].

Lo que hoy conocemos como la industria eléctrica moderna comenzó en 1880. Esta industria surge a partir de la evolución de los sistemas de iluminación exteriores y de los sistemas eléctricos de gas y de carbón comerciales. El 4 de septiembre de 1882, Edison encendió el primer sistema de distribución de energía eléctrica en el mundo, este proporcionaba 110 voltios de corriente directa (DC) a cincuenta y nueve clientes, y así fue como la primera estación comercial de energía comenzó a funcionar. La estación se localizaba en la calle Pearl, en la parte baja de Manhattan. Esta proporcionaba luz y electricidad a una milla a la redonda [9].

Los avances tecnológicos han incrementado las necesidades en el consumo de energía de todas las personas alrededor del mundo, ya que su aplicación se encuentra

en el sector de comunicación, transporte y vivienda, y que por estas razones se ven directamente afectados sectores como el económico, el social.

La generación de electricidad, en la actualidad y como ya se había mencionado anteriormente, se lleva a cabo en centrales generadoras, las cuales son las responsables de la generación de la mayor parte de la energía consumida a nivel mundial, sin embargo, también son responsables de la generación de contaminación, razón por la que en la última década se ha buscado el desarrollo de formas alternativas de generación que no afecten al medio ambiente, o bien que permitan la reducción de las emisiones de contaminantes.

Las centrales generadoras con energías alterna son mayormente las que emplean fuentes solares y eólicas. Esta tendencia de energías limpias ha promovido el desarrollo de métodos alternos que sean más eficientes y de fácil acceso para los usuarios como lo indica el informe en [6].

La generación distribuida, según la investigación realizada por Carlos Bordons [1], surge como una alternativa de generación de energía ya que como se ha comentado anteriormente esta tiene la característica de instalarse cerca de los puntos de consumo, lo que la hace que el servicio sea de fácil acceso, puesto que permite que los usuarios generen su propia energía.

Los centros de investigación y desarrollo se encuentran investigando diversas alternativas, con el objetivo de mejorar dichos procesos, así como de descubrir sus posibles aplicaciones, como es el caso de la cogeneración, o la micro generación o la combinación de ambas, mediante este último se busca el aprovechar dos tipos de energía, por ejemplo, calorífica y mecánica.

Hay investigaciones realizadas por numerosos centros de investigación en los cuales se estudian los métodos de generación y formas de optimización como es el caso del Instituto Hindú de Tecnología Delhi, en su Centro para estudios de la energía, en donde se realiza un análisis del proceso de conversión de energía fotovoltaica el cual tiene por objetivo mejorar el diseño y el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos. La figura

1.2 muestra el comportamiento de una celda fotovoltaica con relación a la energía entregada y la energía recibida [10].

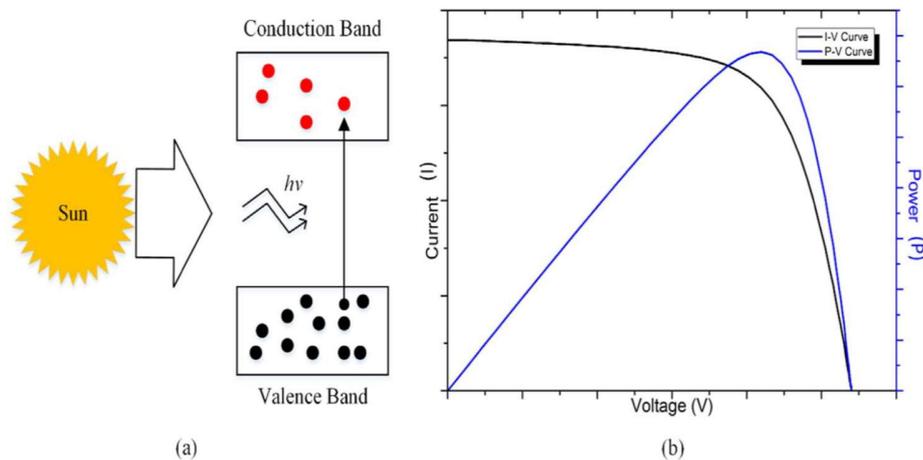


Figura 1. 3 Características de una celda fotovoltaica a) Absorción del fotón incidente de la radiación solar y la carga de excitación de la banda de valencia a la de conducción b) Corriente – Voltaje y potencia [10]

Las celdas fotovoltaicas funcionan bajo el concepto de la primera ley de la termodinámica, la cual establece que la radiación solar recibida sobre la superficie fotovoltaica es parcialmente reflejada y parcialmente absorbida por el módulo fotovoltaico y que la energía de la radiación solar absorbida es distribuida de la siguiente forma: pérdidas por radiación y convección al medio ambiente, la energía absorbida por el módulo fotovoltaico, y finalmente la energía que es convertida a electricidad [10].

El Departamento de Ingeniería Mecánica de Kazakhstan realizaron un estudio de la operación de un sistema de generación de energía en un clima frío, en donde el principal objetivo es expandir las aplicaciones de la generación de electricidad por medio de la energía solar, para ello se evaluará su implementación en casas ecológicas, viviendas y edificios, para lo que se deberá tener en cuenta los picos de calor, el almacenamiento de calor, los paneles fotovoltaicos, y el enfriamiento [11].

En función de [11] se determina las ventajas en el uso de la energía solar en regiones frías, sin embargo, la latitud y la orientación del sistema juega un papel importante, ya que la variación de estos parámetros genera variaciones significativas.

La Universidad Federal del Semi-Árido, Brazil, por su parte realizó un estudio del estado del arte de la energía fotovoltaica, el cual es un estudio de la revisión documental a través del cual analizaron las ventajas y desventajas, el mercado actual y los costos de la tecnología de acuerdo a las aproximaciones realizadas por las diversas investigaciones científicas. La figura 1.3 muestra el esquema general de funcionamiento de una celda fotovoltaica [12].

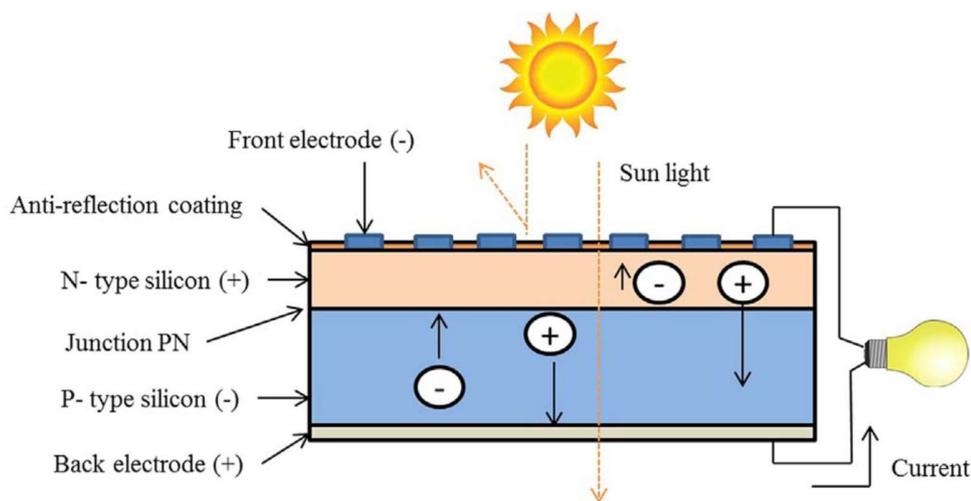


Figura 1. 4 Celda Fotovoltaica [12]

Los sistemas fotovoltaicos son sistemas confiables que ofrecen ventajas como: bajo costo de operación y mantenimiento, baja frecuencia de mantenimiento, son una fuente de energía libre y limpia, puede instalarse cerca del punto de consumo, no causa impacto ambiental, reducción potencial de la emisión de gases invernadero y sin generación de ruido. Sus principales desventajas son las limitaciones de disponibilidad en el mercado, un costo inicial alto, necesidad de un área de instalación considerablemente amplia, y las condiciones geográficas [12].

La gráfica de la figura 1.4 muestra que en un periodo del 2000 al 2015 se incrementó en 41% la instalación de sistemas fotovoltaicos. En China y Taiwán desde el año 2006 han incrementado la producción en la industria fotovoltaica, y que a finales del 2015 estos países son los responsables de comercializar alrededor del 71% de las ventas globales [12].

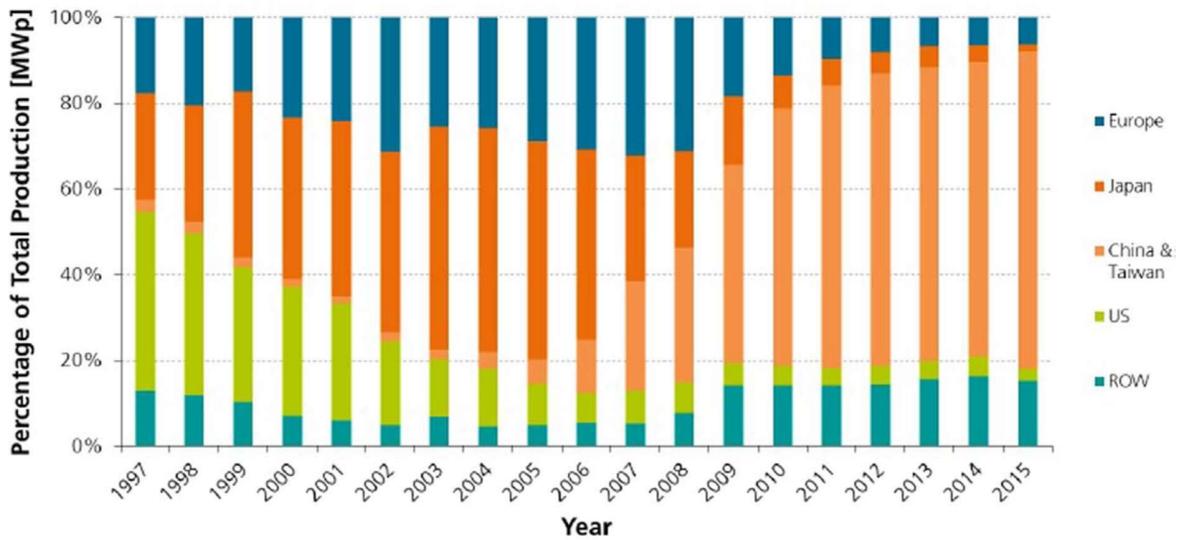


Figura 1. 5 Porcentaje de la producción total (MWp) a través de los años [12]

La energía eólica, por otro lado, es otra fuente de generación que ha sido ampliamente estudiada debido a que pertenece al grupo de energías renovables, motivo por el cual se ha buscado desarrollarla y ampliar su aplicación.

El Centro de Investigación Landcare realizó una investigación sobre la implementación de micro-turbinas eólicas en casas urbanas de Nueva Zelanda, en donde mediante la implementación de estos sistemas buscan la reducción de emisiones de carbono, así como la reducción de los costos causados por la generación y distribución [13].

La prueba fue realizada en un solo edificio, mediante una red de micro turbinas eólicas, de donde se pudo establecer que es factible el uso de estos sistemas de micro generación, sólo en algunas regiones de Nueva Zelanda, y que además solo son capaces de suministrar una pequeña parte de la energía consumida por el edificio [13].

La Escuela de Ingeniería e Información tecnológica, ubicada en Australia, también realiza una investigación sobre la implementación de sistemas de micro generación a partir de turbinas eólicas, en donde analizan el rendimiento y la seguridad de las turbinas instaladas en techos de edificios, para lo cual realizan un análisis de CFD para las condiciones del flujo interno. Para este análisis se tomaron en cuenta las condiciones ambientales, ya que estas juegan un papel muy importante en el

desempeño de las turbinas. Las figuras 1.5 a 1.6 muestran los resultados de simulación para las diferentes posiciones y ubicaciones de las microturbinas en el techo de los edificios [13].

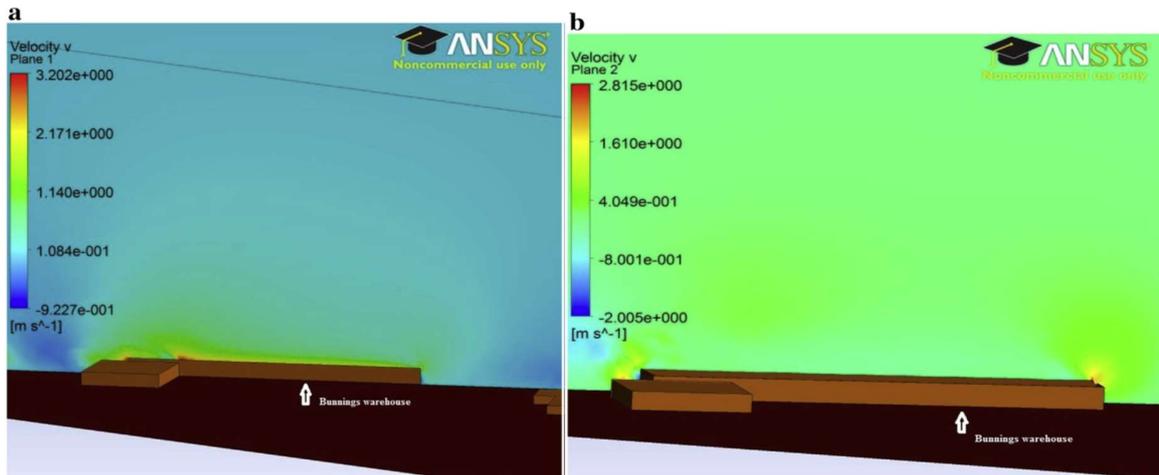


Figura 1. 6 A. Simulación de la componente vertical del viento en el borde del techo del edificio de Bunnings Warehouse para vientos del sector suroeste (Nota. La componente vertical está representada por v en CFX). B. Simulación del contorno de la componente vertical a la mitad de Bunnings Warehouse para vientos del sector suroeste (Nota. La componente vertical es representada por v en CFX) [13]

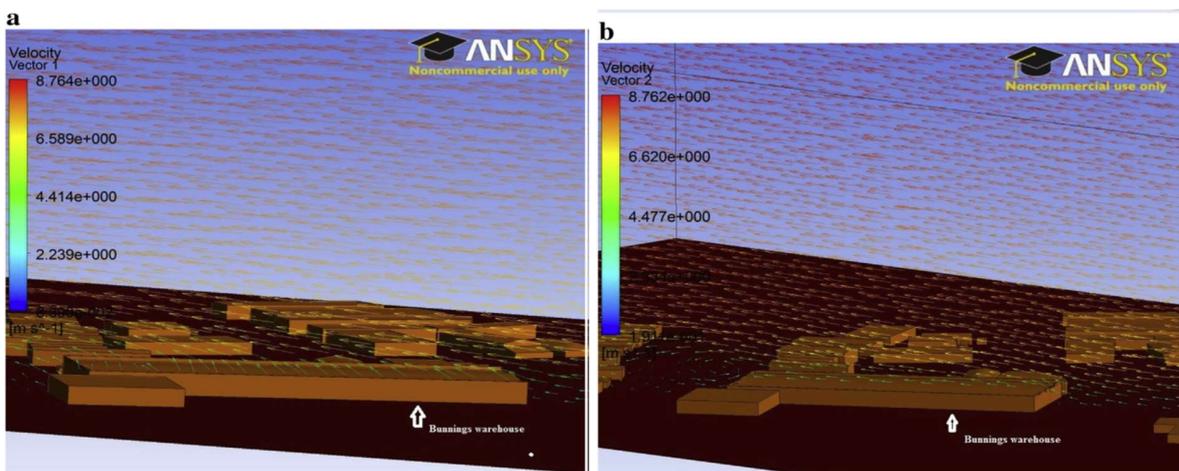


Figura 1. 7 A. Simulación de los vectores en el borde del techo de Bunnings Warehouse del sector suroeste. B. Simulación de los vectores de velocidad del viento del sector sureste del edificio de Bunnings (dirección del viento predominante) [13]

El Consejo Mundial de Energía Eólica (GWEC), por otro lado, reporta que para 2016 fueron instalados sistemas de generación para una capacidad de 54 GW, lo que involucra a más de 90 países de los cuales 9 tienen una capacidad instalada de más de 10,000 MW, otros 29 países han sobrepasado la marca de 1,000 MW, de lo que se estima que la capacidad acumulativa creció alrededor del 12.6%, llegando así a los 486.8 GW [14].

La gráfica de la figura 1.7 muestra los resultados de un estudio realizado por la GWEC en la que estimó que para 2017 se habrá instalado 60,000 MW eólicos y que para el 2021 la producción será de aproximadamente 75,000 MW anuales, por lo que se espera que para ese año se haya producido un total de 800,000 MW, lo cual representa doblar la potencia actual [14].

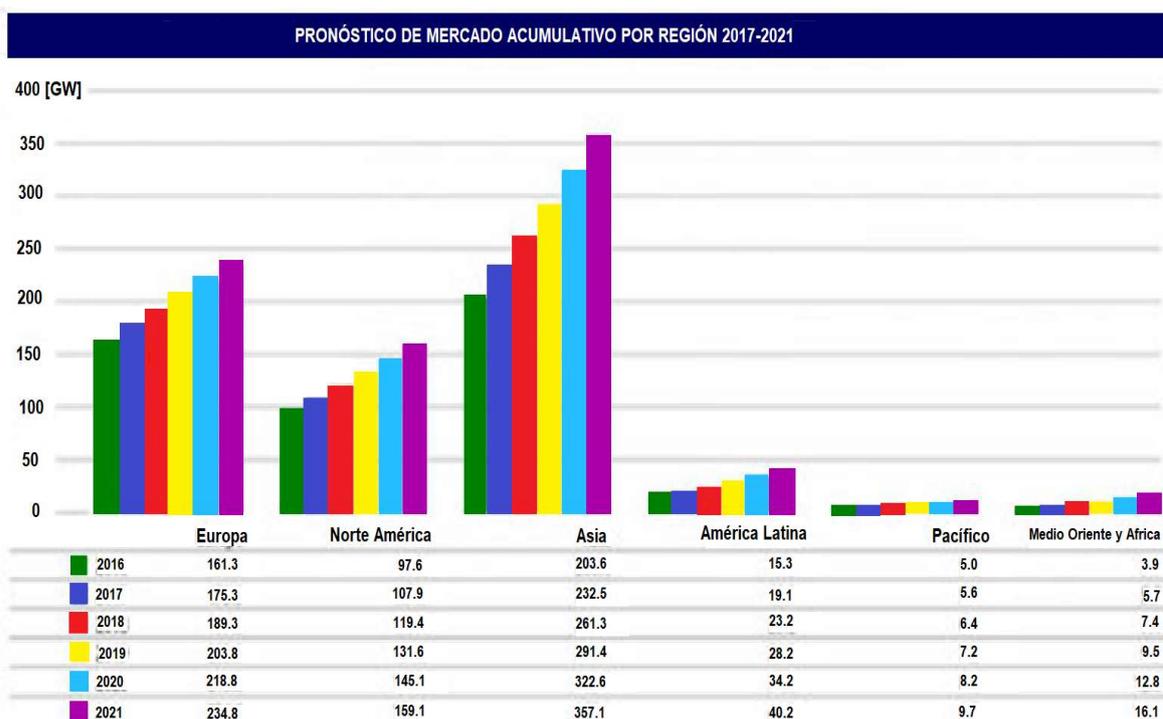


Figura 1. 8 Previsión de la potencia eólica acumulada por regiones en el mundo 2017-2021 [14].

La Universidad de Sevilla, por su parte, en su departamento de Ingeniería de Energía analiza la integración de una micro-turbina de aire húmedo y un Ciclo Orgánico de Rankine en un Ciclo Combinado para generación distribuida, en donde el objetivo es la maximizar la recuperación de calor en la salida de gases de la micro-turbina de gas combinando sus capacidades para temperatura media de recuperación de calor del Ciclo Orgánico Rankine y recuperación de calor a bajas temperaturas de la turbina de aire húmedo [15].

En México, por otro lado, según un informe realizado por la Comisión Reguladora de Energía, estima que la capacidad instalada para la generación de energía con sistemas de generación distribuida es de 32,915 kW, este último dato evaluado en el año 2016, sin embargo, esto representa aproximadamente el 1% [16].

La implementación de sistemas de micro-generación es el resultado del interés de diversos países por la optimización en el proceso de producción, distribución y reducción de costos, todo ello sin olvidar el impacto que estas tecnologías y procesos tienen en el medio ambiente.

La turbina tesla, o sin alabes, es una tecnología alternativa para la generación de energía eléctrica, sin embargo, es una tecnología que no se encuentra desarrollada ya que muchos de los esfuerzos se centran en el desarrollo de las tecnologías más comunes como la solar o la eólica, esto debido al conocimiento adquirido de estas.

La principal ventaja del uso de la turbina tesla es que debido a su principio de funcionamiento puede ser usada con diversos tipos de fluidos, lo que no limita su uso a una región, como es el caso de la energía solar o eólica, las cuales requieren de ciertas condiciones ambientales para su correcta operación. Entre los fluidos que pueden ser empleados en una turbina sin alabes se encuentran el aire y el vapor, de donde se puede tomar la opción del vapor ya que para su generación se puede realizar mediante el uso de sistemas de generación de vapor que usen combustibles como la biomasa, que además no son de complicada adquisición.

En la India en el Instituto de Tecnología de Kharagpur en su departamento de Ingeniería mecánica se realizó una investigación sobre el fluido dinámico en flujos rotantes de un nano-fluido a través de discos co-rotantes de una turbina Tesla, realizando un análisis con diferentes tamaños de partículas de nano-fluidos, tal como lo muestra la tabla 1.1.

Tabla 1. 1 Efecto de la variación de los parámetros de operación en el rendimiento de la turbina [17]

Fracción de Volumen \emptyset de las partículas	Densidad Efectiva $\rho_{eff}(kg/m^3)$ del Nano-fluido	Viscosidad Dinámica Efectiva $\mu_{eff}(Pa.s)$ del Nano-fluido	Viscosidad Cinética Efectiva $\nu_{eff}(m^2/s)$ del Nano-fluido	Potencia de Salida (W)		
				Simulación CFD a partir de dos fases	Simulación CFD a partir de una fase	Solución analítica
0	997	1.003×10^{-3}	1.006×10^{-6}	0.149	0.149	0.151
0.01	1067.33	1.029×10^{-3}	0.964×10^{-6}	0.159	0.159	0.161
0.02	1137.66	1.056×10^{-3}	0.928×10^{-6}	0.168	0.169	0.171
0.03	1207.99	1.084×10^{-3}	0.897×10^{-6}	0.177	0.179	0.181
0.04	1278.32	1.113×10^{-3}	0.871×10^{-6}	0.186	0.189	0.192
0.05	1348.65	1.144×10^{-3}	0.848×10^{-6}	0.195	0.199	0.202

La tabla 1.2 muestra la continuación de los resultados obtenidos por [17] para valores de la fracción de volumen de la partícula de 0 y 0.05 con variación de parámetros de operación de la turbina y el rango de operación. En la tabla 1.3 se dan los valores para los parámetros fijados en las pruebas.

Tabla 1. 2 Pruebas con variación en parámetros de operación

Cluster	Parámetros fijados	Variación de Parámetros de Operación	η (%) a $\phi = 0$	η (%) a $\phi = 0.05$	W (W) a $\phi = 0$	$\Delta W/W$ (%) as ϕ cambia de 0 a 0.05
1	$r_i, r_o, b, \overline{U_{r,i}}$ y $\overline{U_{\theta,i}}$	$\Omega=80\text{rad/s}$	45	46	0.099	33
		$\Omega=150\text{rad/s}$	56	56	0.149	31
		$\Omega=350\text{rad/s}$	19	16	0.100	8
2	$r_i, r_o, b, \text{ y } \Omega$	$\overline{U_{r,i}}=-0.25\text{m/s}$ $\overline{U_{r,i}}=2.5\text{m/s}$	33	34	0.020	28
		$\overline{U_{r,i}}=-0.5\text{m/s}$ $\overline{U_{r,i}}=.5\text{m/s}$	56	56	0.149	31
		$\overline{U_{r,i}}=-1\text{m/s}$ $\overline{U_{r,i}}=10\text{m/s}$	44	41	0.726	29
3	$r_i, r_o, \Omega, \overline{U_{r,i}}$ y $\overline{U_{\theta,i}}$	$b=0.065\text{mm}$	37	44	0.079	34
		$b=0.130\text{mm}$	56	56	0.149	31
		$b=0.260\text{mm}$	43	36	0.240	25

Tabla 1. 3 Parámetros Fijos de prueba [17]

Geometría		Condiciones límite	
Radio Interno (r_i)	25mm	Al interior	$\overline{U}_{r,i}=-0.5\text{m/s}$; $\overline{U}_\theta= 5\text{m/s}$; $\overline{U}_z=0\text{m/s}$
Radio Externo (r_o)	13.2mm	Al exterior	P=101325Pa
Espacio entre discos (b)	0.13mm	En la superficie del disco	$\Omega=150\text{rad/s}$

La Universidad de Caxias de Sul realizó un análisis de la influencia de la geometría de las toberas convergentes y divergentes en la eficiencia de la turbina Tesla, la importancia de esta investigación parte del efecto que producen las toberas al incrementar la energía cinética en diversas aplicaciones de los fluidos, demostrando que la variación de la geometría de la tobera cambia las condiciones de entrada del fluido ya que varía el número Mach tal como lo muestra la figura 1.8 [18].

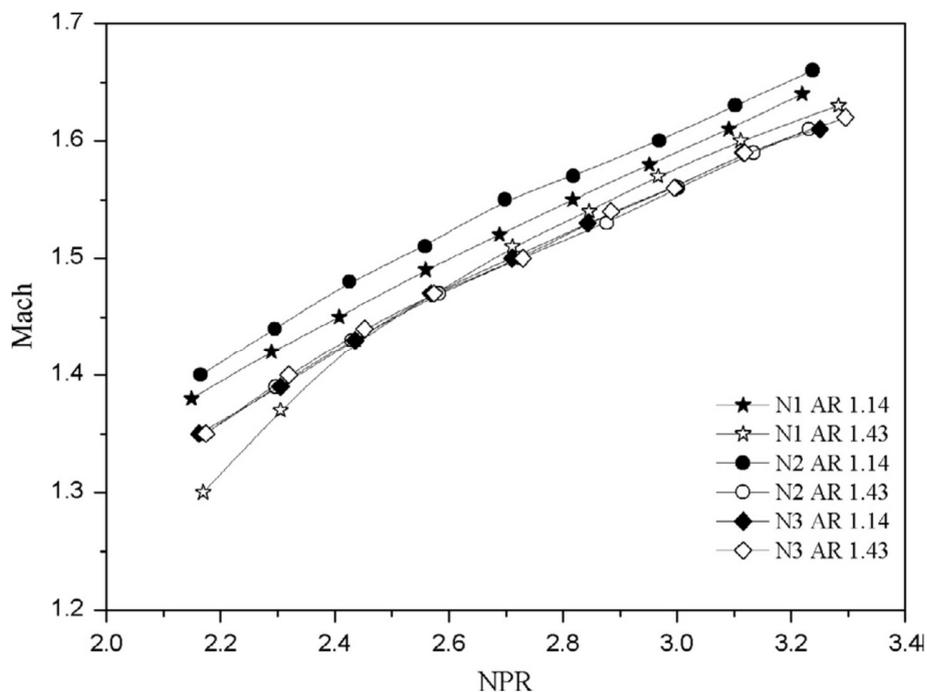


Figura 1. 9 Número Mach en relación al rango de aspecto [18]

La universidad de Tsinghua realizó una investigación enfocada en la estimación de la eficiencia de una turbina Tesla aplicada a un sistema de escala pequeña de Ciclo Rankine, en este proyecto se realizó una comparación entre los resultados obtenidos de la simulación y de las pruebas experimentales utilizando como fluido de trabajo agua caliente a un flujo másico de 0.5t/h y temperatura de 393°K [19].

Tabla 1. 4 Comparación de los reultados experimentales y de simulación de la turbina Tesla [19]

T_{in} (°K)	P_{in} (kPa)	n (rpm)	\dot{m} (kg/s)	X	η (exp)	η (in)	η (sim)	η (sim)
368	377	6300	0.00194	7.35	0.217	0.155	0.157	0.184
368	377	8500	0.00194	7.35	0.254	0.206	0.207	0.243
368	377	9200	0.00194	7.35	0.258	0.222	0.222	0.261

Donde

T_{in} : Temperatura Interna en °K

P_{in} : Presión Interna en kPa

n: Revoluciones por minuto (rpm)

\dot{m} : Flujo másico en kg/s

X: Parámetro a dimensional

η (exp): Eficiencia experimental

η (in): Eficiencia en el interior

η (sim): Eficiencia simulada

En México por otro lado, el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo realizó el proyecto de diseño de una turbina Tesla con enfoque a la optimización en donde se estudiaron los elementos que componen a la turbina como lo son la tobera, la geometría de los discos, de esta tesis se obtiene los valores del tamaño de los discos, estos para una turbina de 1kW de potencia [20].

Tabla 1. 5 Análisis de discos en turbina Tesla [20]

Diámetro (m)	Caso	Flujo másico (kg/min)	Vel. de Vapor v_e (m/s)	Velocidad angular (rpm)	No. discos	Potencia (W)	Eficiencia (%)
0.213	1	2.10	213.2	13000	19	1019.5	57.8
	2	1.85	219.9	14000	20	1001.2	62.5
	3	1.68	229.2	15000	21	1019.0	66.1
	4	1.50	237.9	16000	22	1011.8	69.4
	5	1.40	246.2	17000	24	1042.5	72.3
	6	1.30	245.8	18000	24	1030.0	79.0

Al realizar la revisión bibliográfica se puede ver que las micro-turbinas tienen una potencial aplicación en los procesos de generación de energía eléctrica, como lo muestra el estudio realizado en [7] donde se estima un costo de 2,892 pesos en costos de instalación con respecto al costo de instalación de sistemas solares el cual es de aproximadamente 8,690 pesos.

Esto se debe a la versatilidad de las micro-turbinas ya que se pueden adaptar y usar en diversas condiciones y fluidos siendo los más comunes aire y vapor. Los estudios realizados con mayor frecuencia son de análisis de diseño como lo muestran [17], [18], [19] y [20] en donde se realiza un análisis de la influencia de las variables en la turbina,

como son la velocidad del fluido, las condiciones del fluido y la geometría de la turbina como lo es, dimensiones y número de discos, forma y ángulo de la tobera.

Los estudios sobre esta turbina han establecido sus características de funcionamiento ideales, sin embargo, se requiere de un análisis práctico a nivel de aplicación para verificar y o validar el funcionamiento de la turbina.

Como complemento de los estudios previos en el presente proyectó se realizó un estudio práctico de la turbina en condiciones cercanas a las reales, de este modo se identifican las áreas de oportunidad y de mejora para la turbina, y así validar las condiciones en las que esta debe operar o bien saber los requisitos mínimos necesarios para ello. Las áreas de oportunidad consideradas son: el sistema que proporciona el fluido de trabajo, así como las características para ello, por otra parte, el elemento generador de electricidad para poder aprovechar de mejor la turbina.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

En este capítulo, se presenta la descripción de los elementos que componen el proyecto realizado, los cuales son el generador de vapor, la turbina Tesla y el generador eléctrico. Se proporcionan ecuaciones para obtener los datos de operación como lo son la potencia, el par y la eficiencia en cada uno de ellos. Esto permite evaluar los resultados obtenidos de manera experimental de una forma analítica.

2.1 Generador de Vapor

La generación del vapor se realiza mediante una caldera, la cual puede ser definida como un recipiente metálico cerrado destinado a la producción de vapor o bien calentar agua mediante la acción del calor a una temperatura superior a la ambiente y presión mayor que la atmosférica. La caldera funciona a partir de la transferencia de calor producida debido a la quema de un combustible, el cual entregará la energía al agua a través del contenedor en el que se encuentra el agua [21].

El modelo básico de una caldera consiste en una entrada para el agua, la salida de vapor, la chimenea, y el hogar. El esquema básico se muestra en la figura 2.1 donde se observa que el contenedor del líquido es a su vez el contenedor para el vapor y que se encuentra expuesto directamente a la flama y gases resultado de la combustión del combustible.

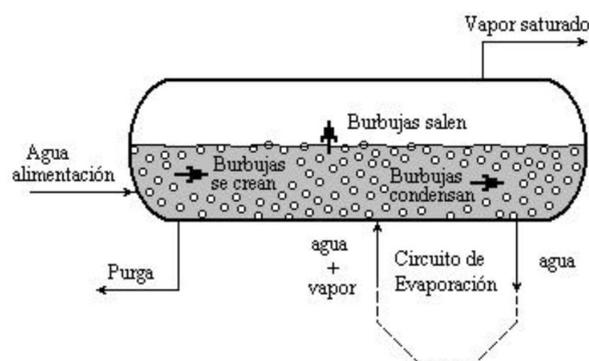


Figura 2. 1 Modelo Básico de Caldera [21]

Existen calderas que obtienen el calor necesario de otras fuentes de calor, tales como gases calientes de desperdicios de otras reacciones químicas, de la aplicación de la energía eléctrica o del empleo de la energía nuclear [22].

2.1.1 Rendimiento de Generador de Vapor

En un generador de vapor, la potencia calorífica útil \dot{Q}_u es la energía por unidad de tiempo empleada en transformar el agua líquida de alimentación en vapor. Se expresa como sigue [23]:

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_v(h_v - h_w) \quad (2.1)$$

Donde

\dot{m}_v = Caudal másico de vapor

h_v = Entalpía del vapor a la salida

h_w = Entalpía del agua líquida de alimentación.

En general, el caudal de vapor, o vapor producido, no es constante, ya que depende de las necesidades de la planta o central de vapor, aunque no es probable que esté sometido a fluctuaciones notables. La mayoría de los generadores de vapor tienen un punto de funcionamiento óptimo en el cual el rendimiento es máximo. La potencia calorífica útil, referida a estas condiciones óptimas de funcionamiento, es la potencia nominal \dot{Q}_n [24].

La *potencia aportada* por el combustible \dot{Q}_c , es:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c PCI \quad (2.2)$$

Donde

\dot{m}_c = caudal másico de combustible

PCI = Poder calorífico inferior del combustible

El rendimiento instantáneo η_i establece la relación entre la potencia calorífica útil instantánea y la potencia calorífica aportada por el combustible. Así pues:

$$\eta_i = \left(\frac{\dot{Q}_u}{\dot{Q}_c} \right)_i \quad (2.3)$$

Donde

Subíndice i = Valores instantáneos.

El rendimiento nominal tiene una definición análoga, pero utilizando la potencia calorífica nominal de la caldera:

$$\eta_n = \left(\frac{\dot{Q}_n}{\dot{Q}_c} \right) \quad (2.4)$$

Aplicando las definiciones de la potencia útil y de la potencia aportada, el rendimiento de la caldera puede expresarse:

$$\eta_n = \left(\frac{\dot{m}_v(h_v - h_w)}{\dot{m}_c * PCI} \right) \quad (2.5)$$

2.1.2 Rendimiento estacional

Cuando se desea determinar el consumo de combustible durante un período de tiempo determinado no puede utilizarse el rendimiento instantáneo ni el nominal, porque ninguno de los dos expresa el rendimiento medio de la caldera durante un período de tiempo. Por ello, se define el rendimiento estacional como η_e [25]:

$$\eta_e = \left(\frac{\dot{Q}_u}{\dot{Q}_c n_a} \right) \quad (2.6)$$

Donde

\dot{Q}_u = Energía útil de la caldera, generalmente en kWh

n_a = Número de horas de funcionamiento de la caldera durante el mismo período de tiempo.

2.1.3 Balance de Materia y Energía

La figura 3 representa un esquema de un generador de vapor con indicación de las entradas y salidas de materia y energía. El balance de masas es [26]:

$$\text{Para los gases } \dot{m}_a + \dot{m}_c = \dot{m}_g \quad (2.7)$$

$$\text{Para el agua } \dot{m}_w = \dot{m}_v \quad (2.8)$$

Donde

\dot{m}_a = Flujo másico del aire de la combustión

\dot{m}_c = Flujo másico del combustible

\dot{m}_g = Flujo másico de los gases de combustión

\dot{m}_w = Flujo másico del agua líquida de alimentación

\dot{m}_v = Flujo másico del vapor.

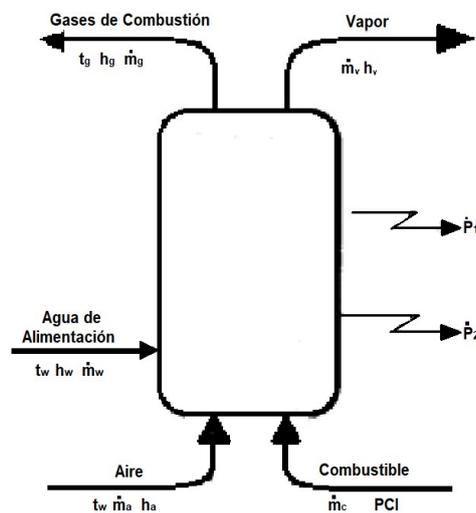


Figura 2. 2 Proceso de Generación de Vapor [26]

Por su parte, el balance energético es [26]:

$$\dot{m}_c PCI + \dot{m}_a h_a + \dot{m}_w h_w = \dot{m}_g h_g + \dot{m}_v h_v + \dot{P}_2 + \dot{P}_3 \quad (2.9)$$

Donde

h_a = Entalpía del aire a la entrada

h_w = Entalpía del agua de alimentación a la entrada

h_g = Entalpía de los gases de combustión a la salida

h_v = Entalpía del vapor a la salida

\dot{P}_2 = Pérdida de potencia calorífica por convección y radiación a través de las paredes

\dot{P}_3 = Pérdida de potencia calorífica que tiene en cuenta combustiones incompletas y la producción de cenizas resultante de la combustión de líquidos y sólidos.

La suma de $\dot{P}_2 + \dot{P}_3$, recibe el nombre de pérdidas fijas y se representa por \dot{P}_f

Ordenando términos y dividiendo por $\dot{m}_c PCI$ se obtiene:

$$1 - \frac{\dot{m}_g h_g - \dot{m}_a h_a}{\dot{m}_c PCI} - \frac{\dot{P}_2}{\dot{m}_c PCI} - \frac{\dot{P}_3}{\dot{m}_c PCI} = \frac{\dot{m}_v h_v - \dot{m}_w h_w}{\dot{m}_c PCI} \quad (2.10)$$

Cada uno de los sustraendos del primer miembro, es una pérdida unitaria de potencia por unidad de potencia aportada por el combustible que se puede representar como sigue:

$$p_1 = \frac{\dot{m}_g h_g - \dot{m}_a h_a}{\dot{m}_c PCI} \quad (2.11)$$

$$p_2 = \frac{\dot{P}_2}{\dot{m}_c PCI} \quad (2.12)$$

$$p_3 = \frac{\dot{P}_3}{\dot{m}_c PCI} \quad (2.13)$$

Donde

p_1 = Pérdida unitaria debida a los gases de la combustión, que en ocasiones se denomina pérdida por chimenea.

p_2 y p_3 se encuentran relacionadas directamente con \dot{P}_2 y \dot{P}_3 respectivamente.

El segundo miembro de la ecuación 2.10 es el rendimiento instantáneo. Así pues:

$$\eta_i = 1 - p_1 - p_2 - p_3 = 1 - p_1 - p_f \quad (2.14)$$

Las pérdidas fijas son valores generalmente comprendidos entre 2,5 y 7,5 %. Las pérdidas debidas a los gases de la combustión admiten una cierta simplificación si se acepta que:

$$\dot{m}_g \cong \dot{m}_a \quad (2.15)$$

Por lo que:

$$p_1 \cong \frac{\dot{m}_v(h_v - h_w)}{\dot{m}_c PCI} = \frac{\dot{m}_g C_{p,g}(t_g - t_a)}{\dot{m}_c PCI} = \frac{r_g C_{p,g}(t_g - t_a)}{PCI} \quad (2.16)$$

donde

r_g = Relación gases-combustible

$C_{p,g}$ = Calor específico medio de los gases de combustión entre t_g y t_a .

t_g = Temperatura de los gases

t_a = Temperatura del aire

2.2 Turbina Tesla

La Turbina Tesla es una turbo-máquina sin álabes y que consiste en una serie de discos con una tobera a través de la cual entra el fluido hasta la superficie de los discos. El momento de transferencia entre los discos y el fluido es producido por las

propiedades del fluido las cuales son la viscosidad y la adhesión. Los discos y espaciadores usados para dar la separación entre cada uno de los discos están colocados sobre un eje. Este eje tiene un orificio que se ajusta en el rotor. En diversos diseños se propone la construcción o formación de orificios alrededor del centro de los discos los cuales sirven para comunicar los puertos de salida formados en la superficie de la carcasa [21].

La turbina Tesla fue patentada en 1903 por Nikola Tesla. La turbina desarrollada por Tesla usó discos de 22.5cm y el espesor del rotor fue de 5cm y que la turbina era capaz de producir 110 Hp en la que usó como fluido de trabajo vapor. La figura 2.3 muestra el esquema de una turbina Tesla [27].

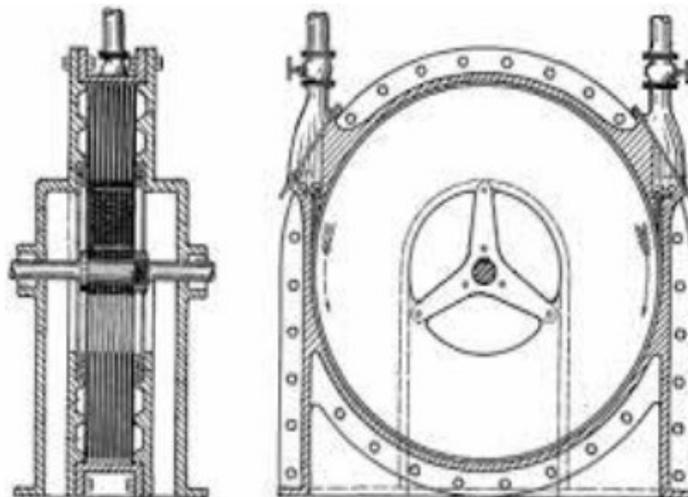


Figura 2. 3 Esquema de Turbina Diseñada por Tesla [29]

La Turbina Tesla tiene ventajas, como ya se ha mencionado de producción, versatilidad en cuanto el fluido a utilizar y su bajo mantenimiento. Los fluidos que pueden ser usados son agua, vapor de agua y aire. Esta turbina a diferencia de las convencionales no sufre afectaciones por erosión de sedimentos durante la ausencia de flujo. Una problemática para la turbina Tesla es la baja eficiencia. La turbina Tesla requiere del diseño óptimo del rotor para obtener una alta eficiencia, pero han sido encontradas diversas dificultades el poder lograr altas eficiencias en toberas y rotores.

El modelo de Rice parte de un análisis a partir del análisis del flujo en tuberías con coeficientes de expansión por fricción que proporciona información cualitativa a través de gráficas, figuras 3.2 y 3.3. Con estas gráficas es posible obtener los valores aproximados de eficiencias para diferentes rangos, pero para una geometría específica de [28]:

$$\frac{r_o}{b} = 50 \quad (2.17)$$

Donde

r_o = Radio exterior del disco

b = Espacio entre dos discos

La figura 3.3 muestra que las altas eficiencias son obtenidas solo con flujos muy bajos los cuales están dados por la relación establecida por el flujo.

$$\frac{Q}{\Omega r_o^3} = 0.0001 \quad (2.18)$$

Donde

Q = Flujo volumétrico para el espaciado de un solo disco

Ω = Velocidad angular del fluido

En las pruebas realizadas por Rice se obtuvo un valor de 0.1256, por lo que la eficiencia que se esperaba era menor al 40%, tal como se muestra en la figura 2.4.

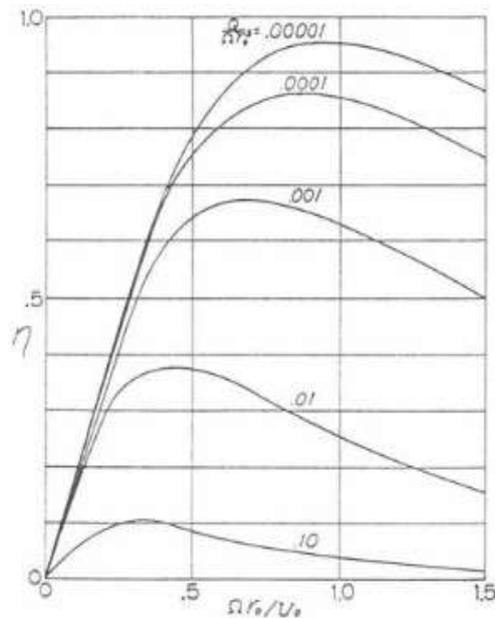


Figura 2. 4 Resultados Típicos para una máxima eficiencia como una función del rango de flujo [28]

La figura 2.5 muestra que la presión para velocidades tangenciales altas, la presión también deberá ser alta, y que para flujos altos la presión debe ser baja, esto es porque el cambio de presión ocurre solo en la capa límite para los efectos de viscosidad y con el incremento del flujo la velocidad incrementa y el espesor de la capa límite disminuye.

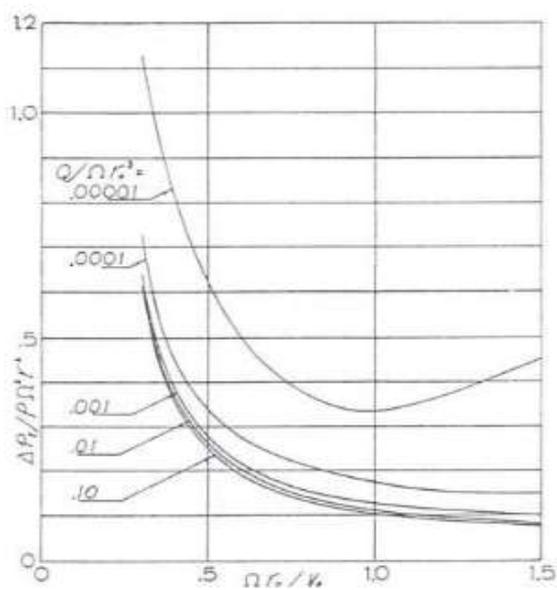


Figura 2. 5 Cambio típico para el cambio de presión en función del flujo y la velocidad [28]

Allen por otra parte, realizó un modelo analítico para el fluido entre discos paralelos co-rotantes a partir de los principios de conservación de la masa y de momento. Al asumir como una forma cerrada de solución que el flujo en la capa límite se encuentra completamente desarrollado, se determinan las componentes de velocidad y presión. El modelo puede ser usado para analizar el fluido del sistema de discos en cada configuración de la turbina [28].

Conservación de la masa

$$\dot{\rho} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2.19)$$

Conservación del momento:

$$\dot{\vec{u}} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} = \frac{-1}{\rho} \vec{\nabla} P + \vec{g} + \nu \nabla^2 \vec{u} = 0 \quad (2.20)$$

2.2.1 Parámetros de Diseño

Se puede calcular el rango de flujo total a partir de iteraciones utilizadas en la ecuación 2.18, de tal modo que ésta sea igual a 0.0001 para obtener la potencia máxima de la turbina. El fluido golpea casi tangencialmente a los discos a un ángulo en la periferia del rotor. Esto es usado para encontrar la velocidad absoluta y radial. El torque y la potencia se calculan, del mismo modo para la eficiencia [28].

$$\text{Velocidad absoluta: } V = \sqrt{2gH} \quad (2.21)$$

$$\text{Velocidad radial: } U = \frac{\pi DN}{60} \quad (2.22)$$

$$\text{Torque: } T = (u_o v_o - u_i v_i) Q' \rho \quad (2.23)$$

$$\text{Eficiencia: } \eta = \frac{T\omega}{QgH} \quad (2.24)$$

2.2.2 Modelo Analítico

El modelo del fluido descrito por Allen usa la forma diferencial solo de los principios de la conservación de la masa y la conservación del momento.

$$R = \frac{\lambda_3 v}{2\lambda_1 \delta^2 r U} \quad (2.25)$$

Donde

v = Viscosidad cinemática

r = Radio del disco

R^* es un sistema constante adimensional el cual es el rango de configuración del rotor para el balance entre la viscosidad y el momento de fuerza. Como ya se mencionó una R^* de orden 1 o superior indica que los efectos viscosos son importantes y que el modelo es el adecuado.

$$R^* = Rr^2 \quad (2.26)$$

Para determinar el tipo de flujo que se utiliza se requiere saber el número de Reynolds.

Número de Reynolds en función del espacio entre discos

$$Re_\delta = \frac{Ur}{v} \quad (2.27)$$

El número de Reynolds radial

$$Re_r = \frac{U\delta}{v} \quad (2.28)$$

a es una constante radial que depende de las condiciones límite

$$U = \frac{a}{r} \quad (2.29)$$

En una turbina la configuración del flujo es radial en el interior, la velocidad radial es negativa, por lo tanto, la constante a es negativa.

2.3 Generadores Eléctricos

Los principios fundamentales sobre los cuales se basa la operación de los motores y generadores eléctricos de Corriente Alterna C.A y Corriente Directa C.D son los de a Fuerza Electromotriz FEM generada por la rotación de una espira (bobina) dentro de un campo magnético y el Torque magnético producido por los campos magnéticos. Los generadores eléctricos son un tipo de máquina eléctrica destinada a transformar la energía mecánica en energía eléctrica que operan con el principio de la Fuerza Electromotriz Inducida, mientras que los motores eléctricos trabajan en forma inversa, es decir, transforma la energía eléctrica en energía mecánica, estos operan con el principio de Torque magnético [29].

La figura 2.6 (a) representa una espira que gira en sentido contrario al de las agujas del reloj y a una velocidad constante, dentro de un campo magnético. Según la posición de la espiral, la Fuerza Electromotriz o FEM inducida en ella cambia de valor. Cuando está en la posición 1, no se genera F.E.M., porque ningún conductor activo corta líneas magnéticas, ya que se mueven paralelamente a él. En esta posición también es nula la variación de flujo que abraza la espira. Cuando la espira alcanza la posición 2, los conductores activos de la bobina cortan oblicuamente las líneas, y la FEM tiene el valor indicado en la figura 2.6 (b). Al llegar a la posición 3, los conductores cortan perpendicularmente las líneas, y por consiguiente el máximo número posible de ellas. Por lo tanto, la FEM es máxima cuando la espira está en esta posición. En la posición 4, la FEM disminuye porque el número de líneas cortadas se va reduciendo. En la posición 5 ya no corta ninguna línea y, como en la posición 1, la FEM es nula. En la posición 6, la dirección de la FEM, en los conductores se invertirá, puesto que se encuentran ahora frente al polo de signo contrario al que corresponden las posiciones 1 a 5. La FEM crece hasta un máximo negativo, que alcanza en la posición 7, y luego decrece hasta que la espira ocupa de nuevo la posición 1. Después se repite el mismo ciclo por cada vuelta que da la espira. Las regiones correspondientes a las posiciones 1 y 5, en las cuales el plano de la espira es normal a la dirección del campo del inductor

y no induce FEM en las bobinas giratorias, se llama zona neutral. La FEM inducida es alterna y sigue la forma de una función sinusoidal [29].

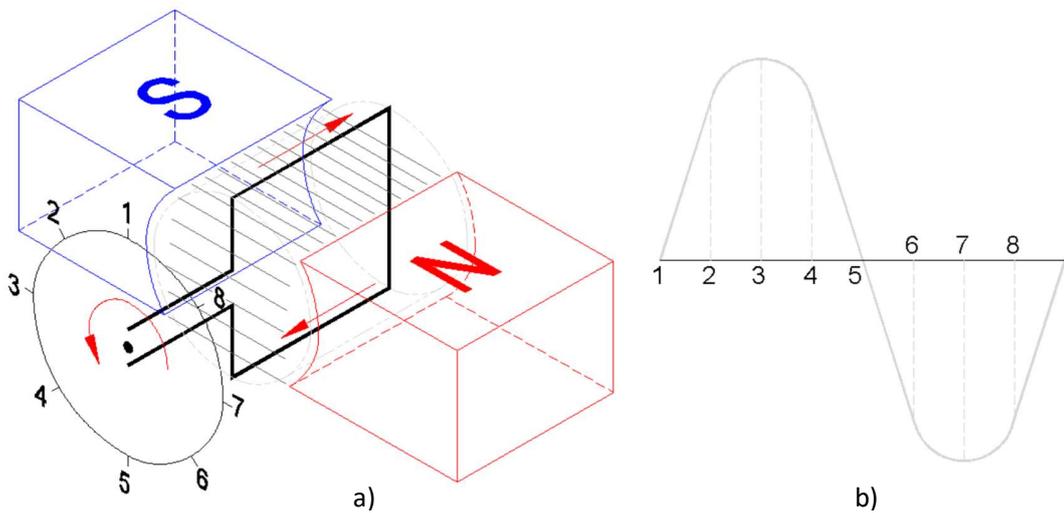


Figura 2. 6 Fuerza electromotriz inducida en una espira que gira a una velocidad constante en un campo magnético uniforme [29]

De la Figura 2.6, podemos deducir que el campo de una FMM crea un flujo rotativo que induce un voltaje de corriente alterna C.A. en la armadura de la bobina. En este generador de dos polos, la rotación de la bobina de la armadura en 360 grados geométricos (1 revolución) siempre generará una señal de voltaje periódica en un ciclo de 360°. La forma de onda del voltaje (Figura 2.6 (b)) se llama onda sinusoidal. El valor instantáneo del voltaje en cualquier punto de la onda sinusoidal se expresa por la ecuación [29]:

$$V = V_{Max} \times \sin \alpha \quad (2.30)$$

Donde:

V = Valor instantáneo del voltaje en V

V_{Max} = Valor máximo del voltaje en V

α = ángulo de rotación en grados o radianes

2.3.1 Partes de un Generador Eléctrico

La figura 4.16 se muestra las partes principales que constituyen un generador eléctrico síncrono que puede ser acoplado a una turbina de gas o vapor, la siguiente descripción está basada en un mínimo número de partes que hacen funcionar a este tipo de máquina eléctrica [30].

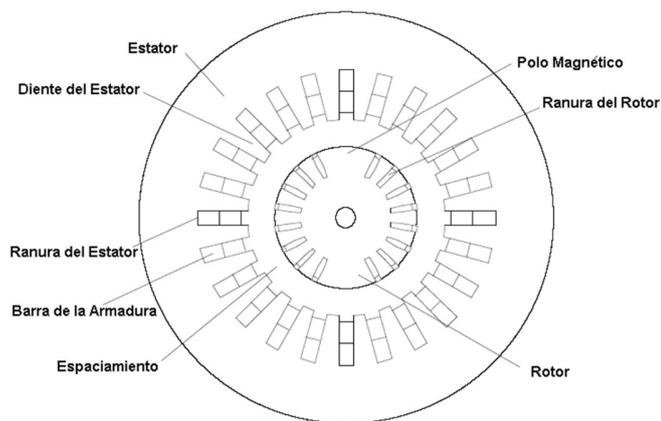


Figura 2. 7 Generador eléctrico Síncrono [30]

Por lo general las máquinas eléctricas rotativas están compuestas de las siguientes partes [30]:

a) Circuito magnético

- Estator. Parte fija
- Rotor. Parte móvil que gira dentro del estator
- Entrehierro o Espaciamento. Espacio de aire que separa el estator del rotor y que permite que pueda existir movimiento, este espacio debe ser lo más reducido posible.

b) Dos circuitos eléctricos, uno en el rotor y otro en el estator. Los esquemas se muestran en la figura 2.8.

- Arrollamiento o devanado de excitación o inductor (Bobina). Uno de los devanados, al ser recorrido por una corriente eléctrica produce una fuerza magnetomotriz que crea un flujo magnético.

- Inducido. Es el otro devanado, en el que se induce una Fuerza Electromotriz FEM que da lugar a un torque mecánico (si se trata de un motor) o en el que se induce una fuerza magnetomotriz FMM que da lugar a una corriente eléctrica (si se trata de un generador).

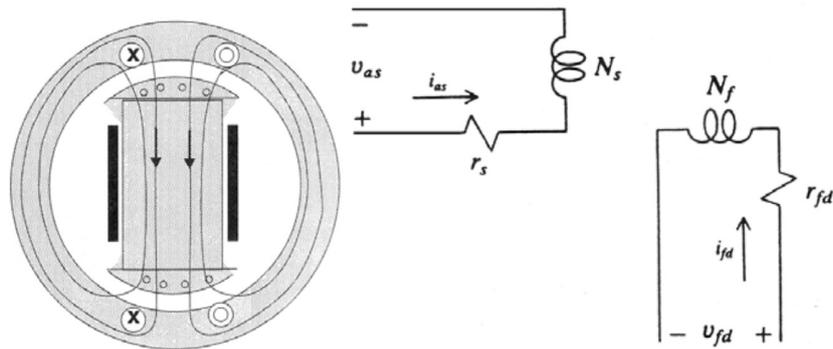


Figura 2. 8 Esquema magnético y Eléctrico del generador [30]

2.3.2 Potencia y Energía de Un Generador

La energía eléctrica W_e que suministra un generador al circuito eléctrico depende de la cantidad de carga que lo atraviese. Dado que la fuerza electromotriz FEM de un generador representa la energía que suministra al circuito por cada unidad de carga que lo atraviesa, se podrá escribir [30]:

$$\text{Energía total suministrada} = \text{Energía} \times \text{carga} / \text{carga} \quad W_e = q * e \quad (2.31)$$

Pero de acuerdo con la definición de intensidad eléctrica, la carga eléctrica q se puede escribir como el producto de la intensidad por el tiempo; luego la energía eléctrica suministrada por el generador al circuito en un tiempo t vendrá dada por la expresión:

$$W_e = e i t \quad (2.32)$$

La potencia P de un generador representa la energía eléctrica que cede al circuito por unidad de tiempo:

$$P = \frac{W_e}{t} \quad (2.33)$$

Combinando las ecuaciones 2.32 y 2.33, se obtiene la siguiente expresión:

$$P = ei = VI = \frac{1}{2}V_m I_m \cos \theta \quad (2.34)$$

Donde:

P = Potencia activa o instantánea en Watt (W)

V = Tensión en Volt (V) o

I = Corriente eléctrica en Amper (A) o intensidad eléctrica i

La potencia eléctrica puede tomar valores positivos y negativos, según el instante o el intervalo de tiempo que se considere para medirla. Existen diferentes expresiones para estas variaciones de potencia (Potencia Activa $P = VI \cos \theta$, Potencia Aparente o compleja $S = VI$ y Potencia Reactiva $Q = VI \sin \theta$), se utiliza una representación geométrica conocida como triangulo de potencias para un fácil entendimiento (ver figura 2.9). Para una salida fija de potencia real, una máquina con un factor de potencia de 0.80 se clasifica 12.5 % más alta que una máquina con 0.90, se tiene un 12.5% más en la corriente de la armadura y un 27% más de pérdidas en el cobre de la armadura [30].

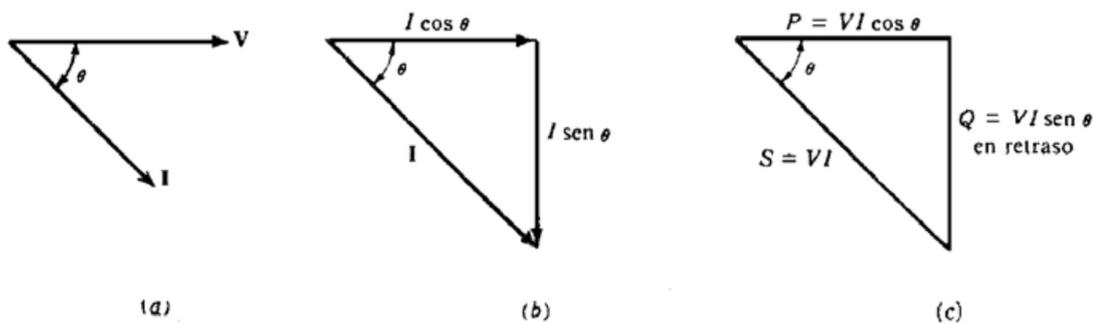


Figura 2. 9 Potencias del Generador eléctrico [30]

CAPÍTULO III DESARROLLO

El presente capítulo presenta el desarrollo de las experimental para la caracterización del conjunto del sistema de micro-generación, en donde se realizaron pruebas de generación vapor, la operación de la turbina y la generación de energía eléctrica, así como su almacenamiento.

Para la realización de las pruebas es necesario primero establecer el proceso de realización y medición, esto con el objetivo de obtener las características de operación del sistema de micro-generación. La figura 3.1 muestra el esquema de medición que se desarrolló en las pruebas.

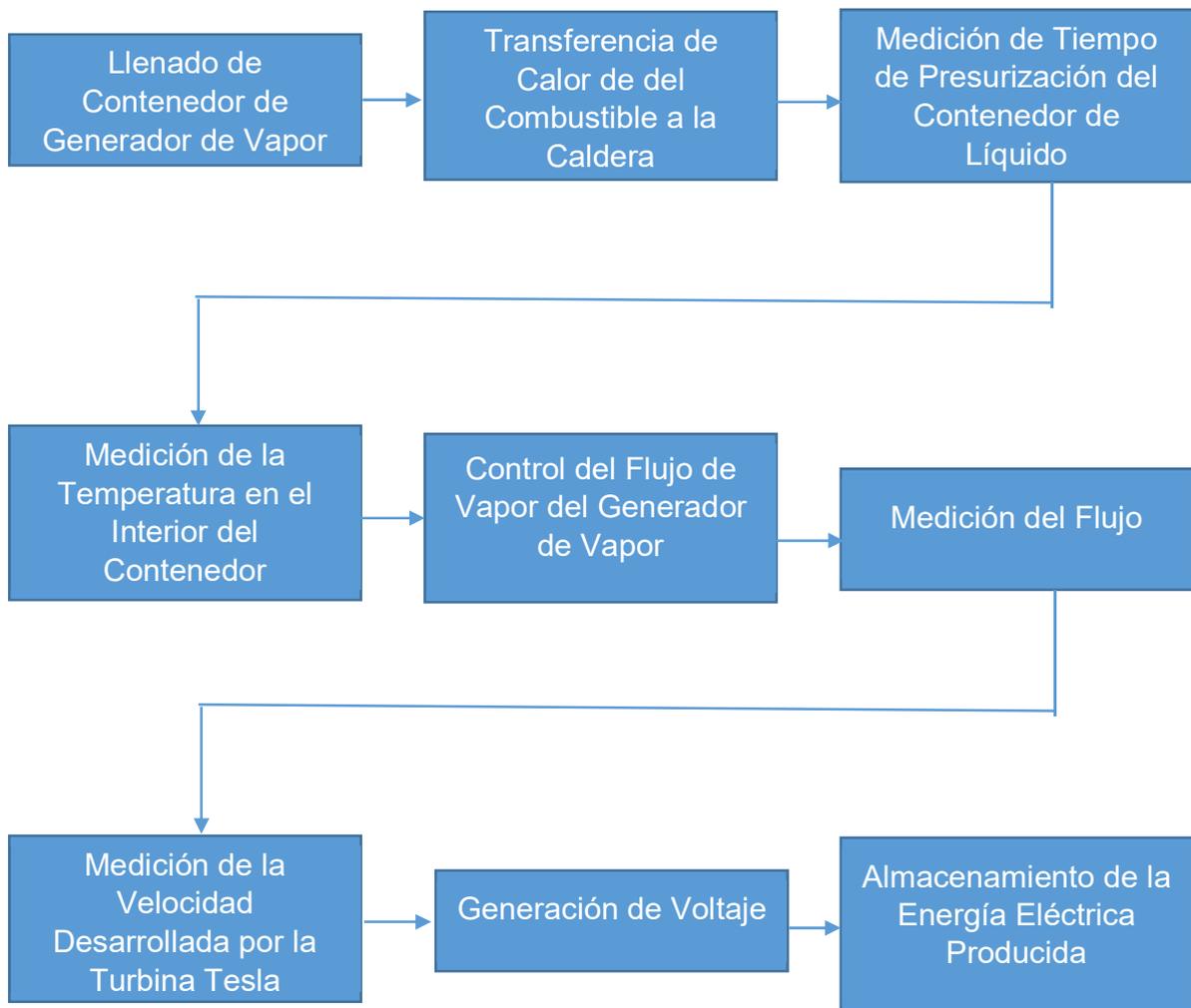


Figura 3. 1 Esquema de Medición

3.1 Elementos de Medición

La cuantificación de las diferentes variables del sistema de micro-generación es importante, ya que son estos datos los que proporcionan la información acerca de su funcionamiento. Para poder monitorearlos se emplean diferentes instrumentos de medición de acuerdo a la magnitud que se desea medir, que en este caso son magnitudes de presión, temperatura, flujo, velocidad angular, tiempo y voltaje.

Los elementos de monitoreo empleados son:

1. Manómetro.

Se emplea un manómetro analógico de la marca Dewit modelo 11, este manómetro utiliza un tubo de bourdon para su funcionamiento, se utiliza para el monitoreo de la presión en el interior de la caldera, es importante monitorear este parámetro para no sobrepasar la presión admitida por el contenedor y del mismo modo saber que se ha alcanzado la presión de trabajo, la figura 3.2 muestra el manómetro utilizado. La hoja de características se encuentra en el anexo 1.

Tabla 3. 1 Especificaciones de Manómetro Dewit [Ver Anexo 1]

Clase de exactitud	+/- 2% de la escala total
Mecanismo	Tubo de bourdon de bronce
Conexión	Bronce, rosca de ¼ N.P.T
Unidades	kg/cm ² psi
Rango	0 a 21 kg/cm ² 0 a 300 psi



Figura 3. 2 Manómetro Dewitt

2. Cronómetro

En la realización de pruebas es necesario medir tanto la duración de la operación, como el tiempo que se tarda en alcanzar la presión de trabajo, requerido para saber y calcular la potencia y la eficiencia de trabajo. Este cronómetro cuenta con una resolución de 0.01 segundos. La clase de exactitud para este equipo de medición es de +/- 1% de la lectura registrada en el dispositivo [31].



Figura 3. 3 Cronómetro

En éstas pruebas se evalúa la repetitividad en las pruebas, esto para verificar que los datos son correctos y que si existe variación que sea mínima, de éste modo se podrá afirmar que la información presentada es correcta.

3. Termómetro

El termómetro es empleado para monitorear la temperatura que alcanza el líquido dentro del contenedor del generador de vapor. El termómetro es de tipo bimetálico con un rango de medición de 0 a 200°C, con una clase de exactitud del 1% del rango total del manómetro, por lo que en este caso es de $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Las especificaciones completas se encuentran en el anexo 2.



Figura 3. 4 Termómetro Bimetálico

4. Medidor de flujo

Se emplea un medidor de flujo de la marca Khrono modelo OPTISWIRL 407, el cual es del tipo vortex, este medidor de flujo tiene la capacidad de medir fluidos tanto líquidos, en la siguiente tabla se presentan las características de operación del medidor de flujo, demostrando que es óptimo para la aplicación que se le da en el proceso de realización de las pruebas La tabla 2.4 muestra las características del medidor de flujo según la hoja de datos proporcionada por el fabricante, la figura 3.5 muestra el medidor de flujo utilizado [32].

Tabla 3. 2 Especificaciones de Medidor de Flujo OPTISWIRL 407 [32]

Condiciones de referencia	Agua a 20°C
	Aire a 20°C a 1013 bar abs
Líquidos	0.75% del valor medido
Gases y Vapores	1% del valor medido
Repetitividad	0.1% del valor medido



Figura 3. 5 Medidor de Flujo OPTISWIRL 407 [28]

La medición de flujo es importante para saber las condiciones de trabajo de la caldera, así como poder visualizar el flujo que se suministra a la turbina durante su funcionamiento.

5. Tacómetro

El dispositivo de medición empleado es un Tacómetro DT-6236B, el cual se empleó para medir las revoluciones de la turbina Tesla al hacer circular el fluido. Este dispositivo cuenta con dos modos de medición, uno que es por contacto directo y otro por sensor óptico. En el primer caso el tacómetro debe hacer contacto directo con la máquina giratoria, en el caso del sensor óptico no se requiere del contacto directo, ya que la medición la realiza mediante la detección de una marca en el eje del que se quiere obtener la velocidad. Las especificaciones técnicas se muestran en la tabla 3.3, La figura 3.11 muestra el tacómetro utilizado. Las especificaciones completas se encuentran en el anexo 21

Tabla 3. 3 Especificaciones Técnicas de Tacómetro (Ver anexo 21)

Rango	2.5 a 99999 rpm (Sensor Óptico)
	0.5 to 19,999 rpm (Contacto)
Resolución	0.1 hasta 999.9 rpm, 1 rpm para rpm superiores
Exactitud	$\pm 0.05\%$, ± 1 rpm



Figura 3. 6 Tacómetro Digital (Ver anexo 21)

6. Multímetro Digital

Se empleó un multímetro digital de la marca fluke modelo 177 el cual es utilizado para medir el voltaje generado y que se suministra al dispositivo acumulador, la exactitud de este dispositivo de medición para la medición en voltaje de corriente directa es de +/- 0.9% de la lectura mostrada. Las especificaciones técnicas se muestran en la tabla 3.4 (Ver anexo 22). La figura 3.7 muestra el multímetro utilizado.

Tabla 3. 4 Especificaciones de Multímetro FLUKE 170 (Ver anexo 22)

DC voltage	600.0 mV, 6.000 V, 60.00 V, 600.0 V, 1000 V	± 0.09% (Models 177 and 179) ± 0.15% (Model 175)
AC voltage ¹	600.0 mV, 6.000 V, 60.00 V, 600.0 V, 1000 V	± 1.0% of reading
DC current	60.00 mA, 400.0 mA, 6.000 A, 10.00 A ²	± 1.0% of reading
AC current ²	60.00 mA, 400.0 mA, 6.000 A, 10.00 A ²	± 1.5% of reading
Resistance	600.0 Ω, 6.000 kΩ, 60.00 kΩ, 600.0 kΩ, 6.000 MΩ, 50.00 MΩ	± 0.9% of reading
Capacitance	1000 nF, 10.00 μF, 100.0 μF, 9999 μF	± 1.2% of reading
Frequency ³	99.99 Hz, 999.9 Hz, 9.999 Hz, 99.99 kHz	± 0.1% of reading
Temperature (179 only)	-40 °C to +400 °C (-40 °F to +752 °F)	1.0% of reading
Battery life	200 hours typical for alkaline	
Dimensions (HxWxL)	4.3 cm x 9.0 cm x 18.5 cm (1.7 in x 3.5 in x 7.3 in)	

¹All ac voltage and ac current ranges are specified from 5% of range to 100% of range.

²10 A continuous, 20 A for up to 30 seconds.

³Voltage frequency is specified from 2 Hz to 100 kHz. Current frequency is specified from 2 Hz to 30 kHz.



Figura 3. 7 Multímetro FLUKE 177 (Ver anexo 22)

3.2 Generación de Vapor

Las mediciones en el generador de vapor realizadas incluyeron el dimensionamiento de la caldera ya que se requiere de esta información para poder conocer su capacidad de almacenamiento, los datos obtenidos de las mediciones se emplearon en el cálculo de la potencia proporcionada por el generador de vapor. La figura 3.8 muestra el sistema de generación de vapor utilizado.



Figura 3. 8 Caldera Usada

El proceso de obtención de la potencia y funcionamiento de la caldera se realiza con forme se muestra en los siguientes pasos.

1. Dimensionamiento de la caldera
2. Medición de tiempos de presurización
3. Medición de flujo de trabajo

3.2.1 Dimensionamiento de la Caldera

El proceso de dimensionamiento de la caldera se llevó a cabo mediante el uso de un recipiente de 3 litros el cual fue sometido a un proceso de validación de las medidas graduadas en el recipiente, esto permitió saber si el recipiente tiene la capacidad que indica, ya que de no ser así se requiere conocer la cantidad de líquido real contenido al momento de realizar la prueba. Tener una diferencia en la cantidad de líquido real con respecto a la indicada en el recipiente puede dar como resultado tener una cantidad de líquido equivocado en el contenedor del generador de vapor.

La validación se realiza mediante la comparación de las mediciones los dos instrumentos, una proveniente del recipiente que se evalúa, y otro proveniente del equipo de referencia. El recipiente utilizado como referencia fue una probeta de 500 ml de clase A el cual tiene una clase de exactitud de ± 0.25 ml y una resolución de 5 ml. La medición realizada con la probeta se muestra en la figura 3.9.



Figura 3. 9 Medición en instrumento de referencia

El proceso de validación que se realizó consistió en llevar a cabo dos ciclos de mediciones, durante cada ciclo se debió realizar lecturas de forma ascendente y descendente, resultado de este proceso se pudo observar que el recipiente en realidad tiene una capacidad menor que la indicada en las marcas del recipiente.

El llenado se realizó en intervalos de 250 ml ya que ésta es la indicación mínima en el recipiente, se realiza de esta manera ya que en el procedimiento de validación se requiere verificar si existe repetitividad en las lecturas obtenidas. Se tiene una lectura que coincide con el instrumento de referencia hasta la cantidad de 1000ml, tal como se muestra en la figura 3.10.



Figura 3. 10 Lecturas realizadas en recipiente de prueba

La diferencia se detecta cuando se llena el recipiente hasta los 1250 ml donde se observa que surge la diferencia de 125 ml teniendo así que cuando el recipiente indica 1250 ml en realidad contiene 1125 ml. La demostración de la variación del valor contenido con respecto al proporcionado por el de referencia se observa en la figura 3.11. Cabe mencionar que la diferencia no cambia durante el proceso de llenado, manteniendo constante la diferencia de 125 ml hasta el final de la prueba. Las lecturas de comparación realizadas se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3. 5 Toma de Lecturas de Recipiente para pruebas

Ciclo 1				Ciclo 2			
Ascendente		Descendente		Ascendente		Descendente	
Recipiente (ml)	Probeta (ml)						
250	250	250	250	250	250	250	250
500	500	500	500	500	500	500	500
750	750	750	750	750	750	750	750
1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
1250	1125	1250	1125	1250	1125	1250	1125
1500	1375	1500	1375	1500	1375	1500	1375
1750	1625	1750	1625	1750	1625	1750	1625
2000	1875	2000	1875	2000	1875	2000	1875
2250	2125	2250	2125	2250	2125	2250	2125
2500	2375	2500	2375	2500	2375	2500	2375
2750	2625	2750	2625	2750	2625	2750	2625
3000	2875	3000	2875	3000	2875	3000	2875



Figura 3. 11 Variación de la cantidad de líquido

La medición del recipiente se realiza llenando el contenedor del generador de vapor hasta su capacidad máxima para así saber la cantidad de líquido que soporta, durante el proceso se gradúa el indicador de nivel que se encuentra instalado, mostrado en la figura 3.12, esto es realizado utilizando como referencia el recipiente de la figura 3.11.



Figura 3. 12 Indicador de Nivel Instalado

Una vez que se tiene el indicador de nivel graduado se realiza el proceso de validación anteriormente mencionado, de este modo se verifica que las mediciones son correctas, para la calibración del contenedor se llena hasta su máxima capacidad y verificando que las marcas anteriormente medidas coincidan con la cantidad de líquido inyectado, el proceso correcto requiere que por cada lectura que se haga se purgue el contenedor y así repetir el proceso.

Las características del generador de vapor se muestran en la tabla 3.6 donde al llenar completamente el tanque se tiene una capacidad de 20 litros máximo, por diseño del fabricante se sabe la presión de trabajo, así como la presión a la que se encuentra configurado el dispositivo de seguridad.

Tabla 3. 6 Características del Generador de Vapor

No.	Característica	
1	Capacidad de Tanque	20 Litros
2	Presión de Trabajo Recomendada	100 psi
3	Apertura de Válvula de Seguridad	110 psi
4	Tipo de Combustible	Gas LP / Biomasa

3.2.2 Desarrollo de Pruebas

El proceso de pruebas requería contar con un ambiente controlado de tal modo que las condiciones ambientales no sean un factor que afecte la efectividad de las pruebas, sin embargo, no se dispone de un área acondicionada con las características que permitan el uso del equipo requerido para las pruebas que se desarrollaron, razón por la que las pruebas fueron desarrolladas en instantes del día en el que se tuvieran las condiciones ambientales similares este en un rango de los 19 °C hasta los 23 °C, de este modo se pudo evitar agregar mayor variabilidad proveniente del medio ambiente. Por otra parte, para evitar asegurar que las pruebas se realizan de una sola manera se establece el procedimiento llevado a cabo durante cada prueba.

1. Medición del líquido inicial.
2. Medición del líquido final
3. Temperatura alcanzada a la presión deseada.
4. Al término de cada prueba se midió el líquido restante

5. Antes de iniciar la siguiente prueba se vaciaba el contenedor del generador de vapor, para que la temperatura inicial del agua sea similar en cada prueba

Las pruebas para evaluar la presurización a diferentes niveles de líquido, dan como resultado diferencia en el tiempo de presurización, lo que en términos de combustible implica un mayor consumo de este, así mismo las condiciones del fluido cambian con la cantidad de líquido contenido en el recipiente. La tabla 3.7 muestra los valores preliminares de pruebas realizadas a diferentes niveles de líquido, con el fin de poder seleccionar el nivel de trabajo para las pruebas.

Tabla 3. 7 Presurización a diferentes niveles de líquido

No.	Nivel	Tiempo	Presión
	Litros	min	psi
1	15	39.17	45
2	10	17.4	45
3	5.8	12.83	45

A partir de los resultados de las pruebas realizadas anteriormente se decide trabajar con el nivel de 10 litros, debido a que este se encuentra marcado en el indicador de nivel, se realizan cuatro pruebas en las que se observa el proceso de presurización. Ésta serie de pruebas fue realizada utilizando como combustible Gas LP ya que es comercial y de fácil manejo al momento de realizar la actividad.

Se realizaron diversas pruebas para verificar el comportamiento en el proceso de presurización y así poder estimar tanto el tiempo promedio como la variación promedio de presurización teniendo como constantes el nivel de líquido, la presión alcanzada, esto con el objetivo de reducir la variabilidad en las pruebas.

3.3 Operación de la Turbina

La turbina usada, por diseño se estima que tiene las siguientes características:

Tabla 3. 8 Especificaciones de Turbina

Parámetro	Valor
Ángulo de la tobera α	30°
Radio externo r_o	106.5 mm
Radio Interno r_i	13 mm
Número de discos n	24
Revoluciones	18000 rpm
Espacio entre discos	0.33 mm
Longitud total	187.21 mm
Torque T	0.562 Nm
Potencia P	1030 W
Eficiencia η	79 %

De acuerdo a estas características la turbina debe ser capaz de asimilar 58825.3026 kJ/h de los 77401.3556kJ/h. Esto de manera ideal, sin embargo, ésta turbina requiere un flujo másico de 1.3 kg/min

3.3.1 Realización de Pruebas

El acoplamiento de la turbina y el generador de vapor es un factor muy importante, ya que, al ser un sistema de baja potencia se debió considerar que existen pérdidas durante el transporte del vapor hasta la turbina, durante este proceso se pudo observar que los cambios drásticos en la dirección del fluido alteraban significativamente a la velocidad de flujo con lo que se afecta el funcionamiento de la turbina. La figura 3.13 muestra la turbina utilizada en las pruebas.



Figura 3. 13 Turbina Utilizada

El acoplamiento se realiza mediante un acoplamiento flexible, el cual servirá para evitar los cambios drásticos del flujo, evitando así una reducción en la velocidad de flujo, y dado que la velocidad de la turbina está directamente ligada a la velocidad del flujo se estaría evitando este problema.



Figura 3. 14 Acoplamiento Caldera - Turbina

El siguiente paso en el proceso de operación de la turbina fue la realización la toma de lecturas tanto de la velocidad a la que operaba la turbina, así como del flujo que circulaba a través de ella. Las pruebas realizadas consistieron en probar con diferentes condiciones del fluido lo que permitió seleccionar el que mejores resultados proporcionó al funcionamiento de la turbina. Una vez seleccionado el tipo de fluido de trabajo, se realizaron las pruebas de operación correspondientes antes del acoplamiento con el generador de voltaje.

Al igual que con el generador de vapor se realizaron pruebas preliminares para verificar la operación de la turbina Tesla, las pruebas se realizaron con diferentes fluidos se obtuvo que la velocidad de la turbina varía con éste, teniendo como condición la misma presión de operación para cada uno de los casos. La tabla 3.9 muestra el resultado de las pruebas preliminares realizadas con fluidos diferentes.

Tabla 3. 9 Velocidad Máxima alcanzada con diferentes fluidos

Fluido	Velocidad Máxima (rpm)
Aire	2000
Vapor Sobre saturado	440
Vapor Saturado	4000
Vapor Seco	500

La variación obtenida en cada uno de los casos se debe al cambio de propiedades que los fluidos tienen, a pesar de que la presión sea la misma la adhesión producida en las paredes de la turbina es más baja con fluidos de menor densidad, razón por la que la velocidad de la turbina cambia.

3.4 Generación de electricidad

El proceso previo a la realización de las pruebas es el montaje o acoplamiento de la turbina al generador eléctrico (alternador) debido a que si se encuentran desalineados se agrega un esfuerzo adicional causando que la potencia transferida por la turbina no sea suficiente para operar el sistema.

Las opciones de montaje consideradas fueron por banda y acoplamiento directo, donde la alineación de los dos elementos es crucial para su operación. La primera opción de acoplamiento fue por banda en donde debido a la rigidez y distancia se tuvieron complicaciones de operación ya que la turbina no tenía el par necesario para operar en conjunto con el alternador.

El siguiente método de acoplamiento fue el directo, sin embargo, para este caso se seleccionó un acoplamiento directo flexible, el cual tiene la característica de absorber parte de las vibraciones causadas tanto por la operación del conjunto turbina – alternador, así como una posible desalineación. Para este caso se seleccionaron los acoplamientos de la marca Rotex, modelo GS Mangones light (Ver anexo15).

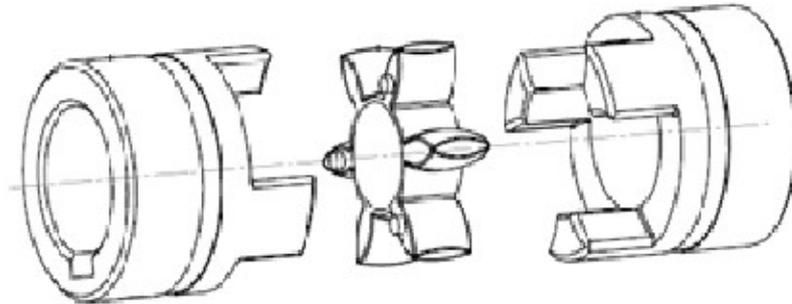


Figura 3. 15 Acoplamiento Rotex (Anexo 15)

El alternador empleado para la generación de electricidad es el modelo F40 de la marca Fractal, el cual es empleado en generadores eólicos de bajas velocidades, según su hoja de características (ver anexo 16) es un alternador de tipo trifásico, de imanes permanentes, con un imán de Neodimio N42, con una capacidad de generación continua de 650W y voltajes de operación de 12 / 24 volts. La figura 3.16 muestra las curvas características del generador de voltaje en donde se puede ver el valor voltaje con la cantidad de revoluciones necesarias para alcanzarlo, así como la corriente máxima que soporta a ese voltaje.

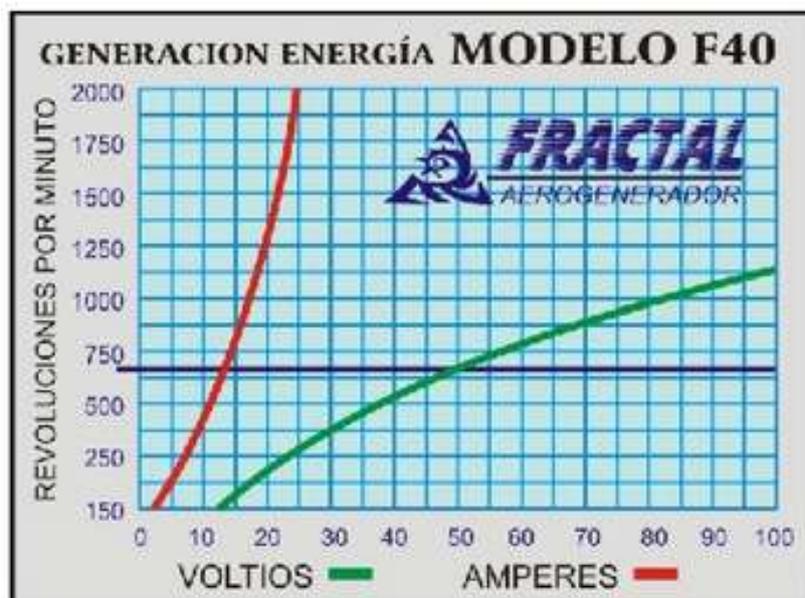


Figura 3. 16 Curva de Potencia de Alternador (Anexo 15)

Bajo condiciones ideales de operación del alternador se observa que requiere una velocidad de 150 rpm como mínimo para generar un voltaje de 12 volts y que a esa velocidad es capaz de generarlos para una corriente de carga de aproximadamente 2.5 hasta 3.5 amperes. Se seleccionó este alternador debido a su capacidad de cargar bancos de baterías de 12 y 24 volts, así como de la potencia de operación.

La batería empleada es una batería de tipo ciclo profundo de 12 volts a 35 Ah lo que significa que esta batería es capaz de proporcionar 12 volts constantes con una corriente de 35 amperes, para su proceso de carga se requiere que esta sea de 1/10 de la corriente que es capaz de proporcionar, lo que significa que requiere de una corriente de carga de 3.5 amperes con un voltaje de 14.4 a 14.7 volts constantes durante un periodo de tiempo de 10 horas para alcanzar su carga máxima, la figura 3.17 muestra la batería utilizada. Su hoja de características se muestra en el anexo 17.



Figura 3. 17 Batería 12V 35Ah [Anexo 17]

En las pruebas de carga de la batería se emplea un control de carga de la marca Fractal modelo AU220, mostrado en la figura 3.18, el cual puede ser utilizado para carga de bancos de baterías de 12 volts con una corriente máxima de hasta 80 amperes. Este dispositivo es empleado para regular el proceso de carga de la batería, ya que tiene la función de limitar o cortar la corriente proveniente del dispositivo de carga, que en este caso es el alternador, para evitar daños a la batería por un exceso de corriente de alimentación. Se debe aclarar que la conexión entre estos dispositivos y el alternador se hace de manera directa debido a que este último cuenta con el rectificador necesario por lo que no se requiere de un arreglo electrónico adicional [Anexo 18].



Figura 3. 18 Control de Carga [Anexo 18]

Las pruebas de generación de electricidad se realizaron de dos maneras, una solo teniendo el conjunto Turbina – Alternador, esto para verificar que la turbina tiene la capacidad para hacer funcionar al alternador. La siguiente ya incluyó la conexión de la batería la cual representa una carga eléctrica para el alternador.

Las pruebas de funcionamiento sin batería muestran que la turbina es capaz de operar el alternador sin llegar hasta su máxima capacidad de operación, el voltaje máximo alcanzado fue de 29 volts, una vez que se observó la capacidad de operación de la turbina con el alternador se realiza la conexión de la batería, en esta prueba se observa que hay un incremento en el par del eje del alternador evitando así alcanzar la energía generada previamente, en este caso fue de 9 volts.

CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo presenta los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a los elementos que componen el sistema de micro-generación, de estos resultados se observa la variabilidad que hay en el sistema.

La variabilidad se obtuvo por medio de la desviación estándar la cual es interpretada como la variación promedio de una muestra de un grupo de datos, los cuales para este caso habrán sido obtenidos de las pruebas realizadas.

Los resultados son presentados en secciones como lo son de la generación de vapor, en la que se muestra el proceso de generación de vapor, ya que las pruebas fueron descritas en el capítulo anterior; la operación de la turbina, en esta sección se muestran las características de operación de la turbina a partir de las pruebas realizadas; y la generación de electricidad, en esta sección se muestran los resultados de la capacidad de generación de energía del sistema de micro-generación.

4.1 Resultados Obtenidos de Generador de Vapor

La gráfica de la figura 4.1 muestra los resultados obtenidos de las pruebas realizadas, en las que se observa que el tiempo máximo requerido para alcanzar la presión de trabajo es de 17.6 minutos y que el tiempo mínimo es de 13.7 minutos con un promedio en el proceso de 15.7 minutos. La variación promedio obtenida del proceso de presurización es de +/- 1.16 minutos a partir del promedio de tiempo. De esta gráfica también se puede observar que el tiempo mínimo para alcanzar la presión de trabajo es de 13.7 minutos, y el tiempo máximo fue de 17.6 minutos.

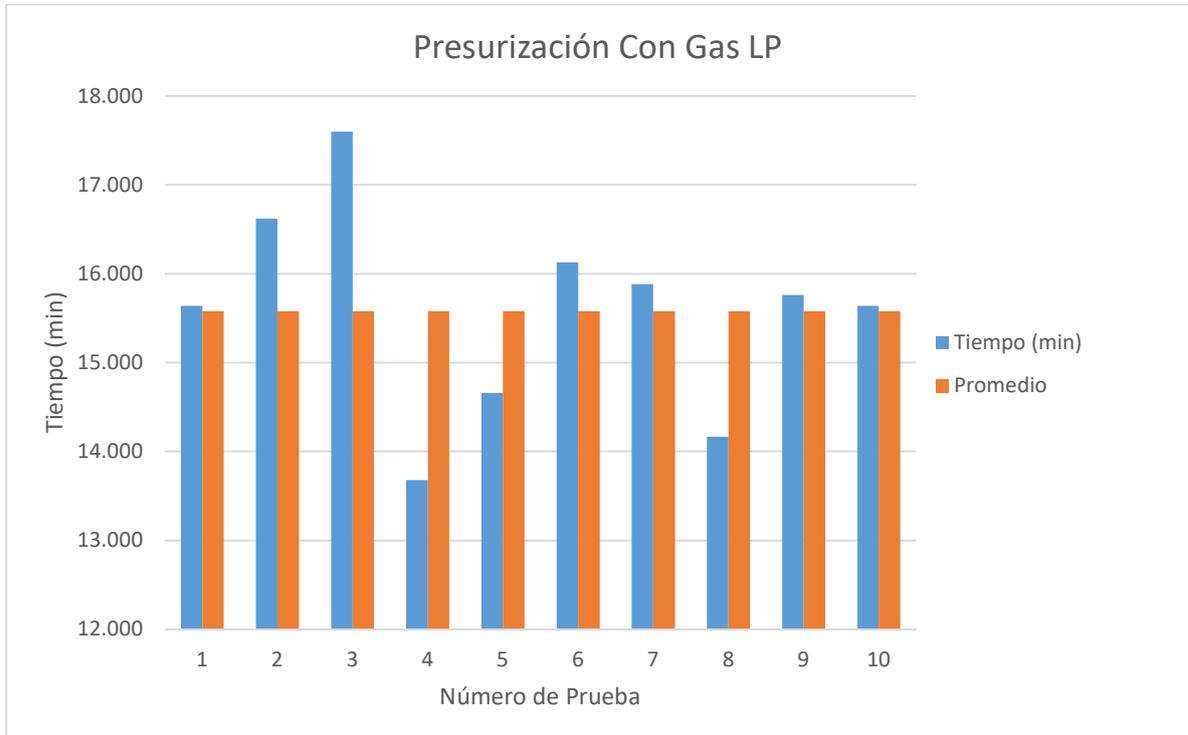


Figura 4. 1 Pruebas de Presurización Con Gas LP

Los resultados de las pruebas se muestran en los del Anexos 3 y 4, en ellas se muestran los resultados completos de cada prueba y la gráfica del promedio general del proceso.

Una vez obtenida la variación de se procede a realizar la comprobación mediante el uso de biomasa como combustible ya que es parte del proyecto el uso de biomasa como combustible principal, para mantener la condición de prueba y poder comparar efectivamente los resultados con los obtenidos en el proceso realizado con gas LP se busca llegar a la misma presión, y seleccionando la condición ambiental de la temperatura en el rango de las temperaturas presentes en las pruebas anteriores.

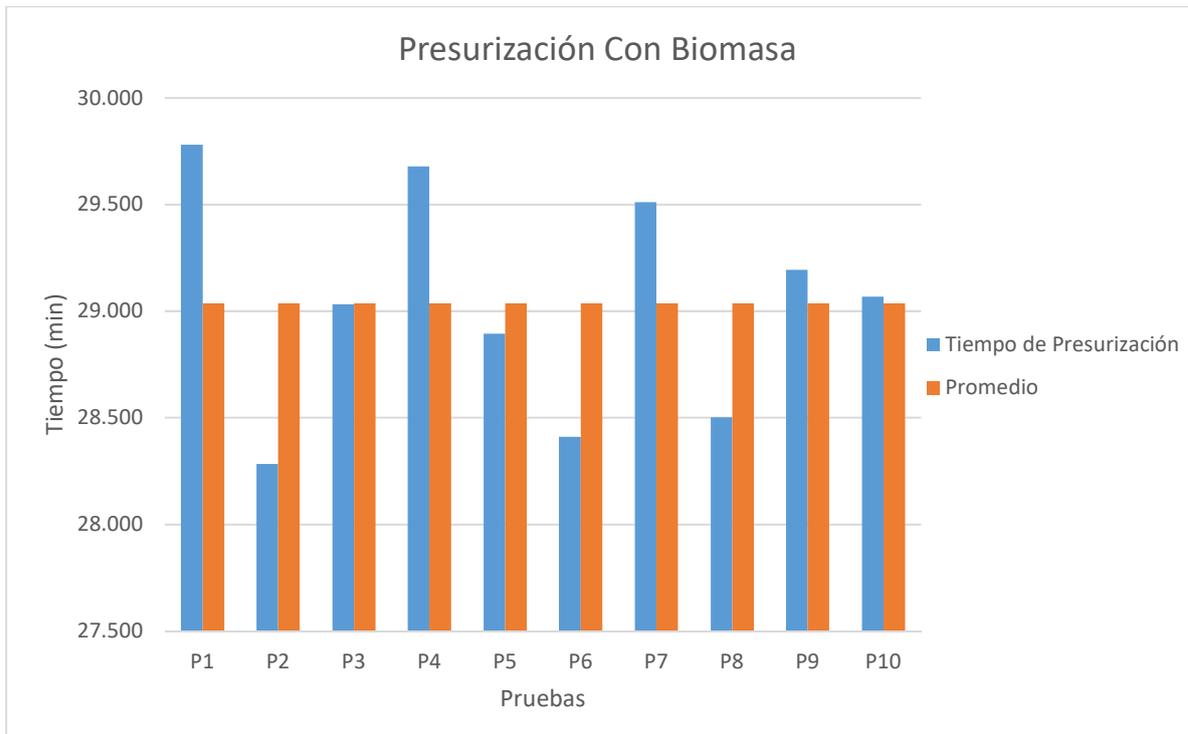


Figura 4. 2 Presurización Biomasa

La figura 4.2 muestra el tiempo de presurización requerido mediante el uso de biomasa como combustible, en este caso se observa un incremento en el tiempo de presurización ya que como se puede observar se tiene un tiempo máximo de 29.8 minutos y siendo el menor tiempo registrado de 28.3 minutos con un promedio de 29 minutos, la cual es mayor que el tiempo utilizado con gas LP.

La variación en el tiempo de presurización se debe a las propiedades de la biomasa ya que el poder calorífico que posee ésta, es menor a la que posee el gas LP ya que este último posee un poder calorífico de 46012.93 kJ/kg contra el que posee la leña que es de 15909.84 kJ/kg según se puede ver en la tabla del anexo 10, por esta razón al utilizar biomasa se requiere un mayor tiempo para alcanzar la presión trabajo. Se realiza comparación de los valores promedio obtenidos de las pruebas realizadas para ambos casos de combustible, la comparación es mostrada en la gráfica de la figura 4.3, se muestra el comportamiento del proceso de presurización utilizando biomasa como combustible. Los resultados de cada prueba se encuentran en los Anexos 5 y 6.

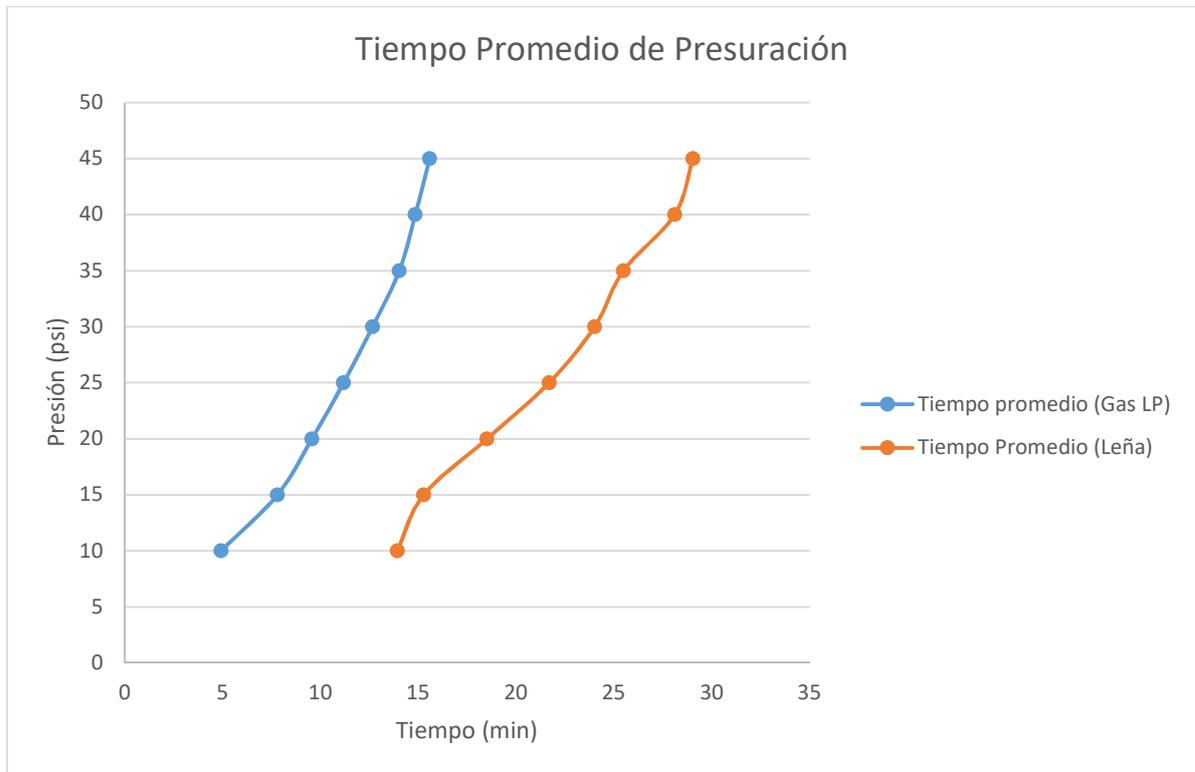


Figura 4. 3 Promedio de Presurización

El seguimiento del cálculo de la potencia de la caldera requiere de la medición del flujo que es capaz de proporcionar el generador de vapor, sin embargo, en esta etapa la prueba es realizada con un flujo que permite la operación de la turbina, los resultados de su funcionamiento se presentan en el capítulo III.

El flujo medido al cual la turbina puede operar es de 26.2 kg/h, esta medición fue realizada con la turbina sin carga, esto con el objetivo de verificar la capacidad del generador de vapor de accionar la turbina. Para este caso es necesario medir el tiempo de operación de la caldera, ya que se requiere que la turbina Tesla se mantenga operando un tiempo constante para cargar una batería de 12 volts.

El procedimiento para la realización de las pruebas requiere de mantener condiciones similares a las realizadas en la etapa previa, al igual que en las pruebas anteriores, la prueba se realiza con el nivel de líquido en el tanque de 10 litros, temperatura ambiente de 21°C y temperatura inicial del agua de 20°C.

La figura 4.4 muestra el comportamiento del flujo máximo proporcionado por la caldera, obteniendo el flujo máximo promedio, y la variación promedio de este. Los anexos 7 y 8 muestran los resultados de cada prueba y el promedio general de flujo respecto al tiempo.

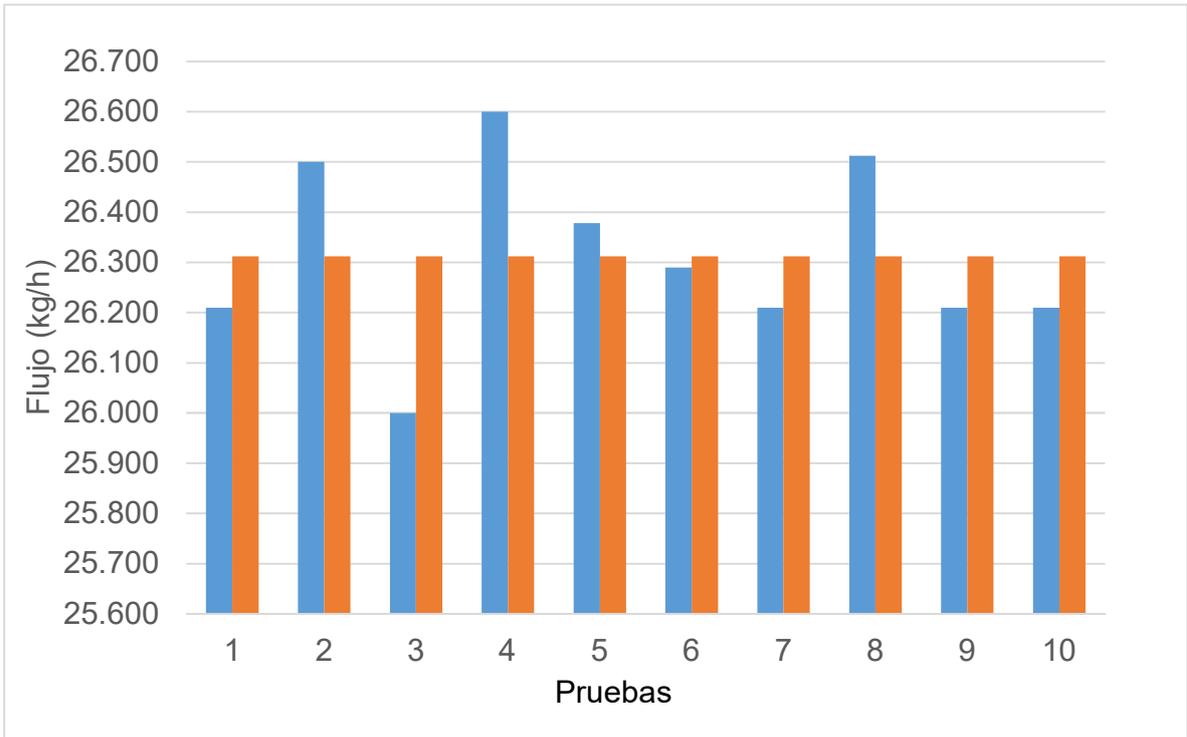


Figura 4. 4 Flujo Máximo

El flujo que la caldera puede generar cambia en función de la carga que tenga instalada ya que el requerimiento de energía cambia ya sea por una mayor demanda o menor demanda, teniendo como límite el rango de operación propio de la caldera. La presión a la que se realiza la prueba es de 80 psi ya que es la presión a la que la turbina puede operar, ya que como se menciona, los requerimientos de energía cambian con la carga instalada, no se sobrepasa esa presión por seguridad, ya que es dispositivo de seguridad se encuentra ajustado para abrir a los 100 psi.

4.1.1 Obtención de la Potencia de la Caldera

Se procede a realizar el cálculo de la potencia útil calorífica, para ello se emplea la ecuación 2.1 A partir de la tabla de vapor de agua saturada se obtiene que:

Presión= 80 psi

$$\dot{m}_v = 26 \text{ kg/h}$$

$$h_v = 2752.878029 \text{ kJ/kg (ver anexo 9)}$$

$$h_w = 83.86576678 \text{ kJ/kg (ver anexo 9)}$$

$$\dot{Q}_u = 26 \frac{\text{kg}}{\text{h}} (2752.878029 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 83.86576678 \text{ kJ/kg})$$

$$\dot{Q}_u = 26 \frac{\text{kg}}{\text{h}} (2752.878029 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 83.86576678 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}})$$

Por lo tanto, la potencia de la caldera es para vapor saturado es:

$$\dot{Q}_u = 77401.3556 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

El cálculo de la energía proporcionada por la leña es la siguiente:

$$\text{PCI} = 15909.84 \text{ kJ/kg (ver anexo 10)}$$

$$\dot{m}_v = 3.488372093 \text{ kg/h}$$

$$\dot{Q}_c = \left(15909.84 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \left(5 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)$$

$$\dot{Q}_c = 79549.2 \frac{kJ}{h}$$

La energía proporcionada para el caso de gas LP es:

$$PCI = 46012.93 \text{ kJ/kg (ver anexo 10)}$$

$$\dot{m}_v = 3.488372093 \text{ kg/h}$$

$$\dot{Q}_c = \left(46012.93 \frac{kJ}{kg} \right) \left(1.75 \frac{kg}{h} \right)$$

$$\dot{Q}_c = 80522.6275 \frac{kJ}{h}$$

Como se puede ver después de calcular la potencia de la caldera utilizando leña como combustible se observa que esta es menor que la obtenida utilizando gas LP como combustible y eso se ve reflejado en el tiempo requerido para poder llegar a la presión de trabajo, sin embargo, la operación una vez que se alcanza la presión es similar.

4.2 Resultados de Turbina Tesla

A partir de estos resultados se seleccionó como fluido de trabajo el vapor saturado ya que fue con el que mayor velocidad se logró alcanzar, la velocidad alcanzada fue por un instante de tiempo corto debido a que no se mantenía constante la presión.

La siguiente fase en esta etapa de pruebas es repetir la prueba con el vapor saturado como fluido de trabajo y registrar el flujo que circula a través de la turbina. Con estos resultados se puede calcular la potencia que estaría entregando la turbina esto aún sin conectar el generador eléctrico. Los resultados se dividen en dos tablas para poder observar tanto el flujo promedio que circula a través de la turbina como la velocidad desarrollada por esta misma.

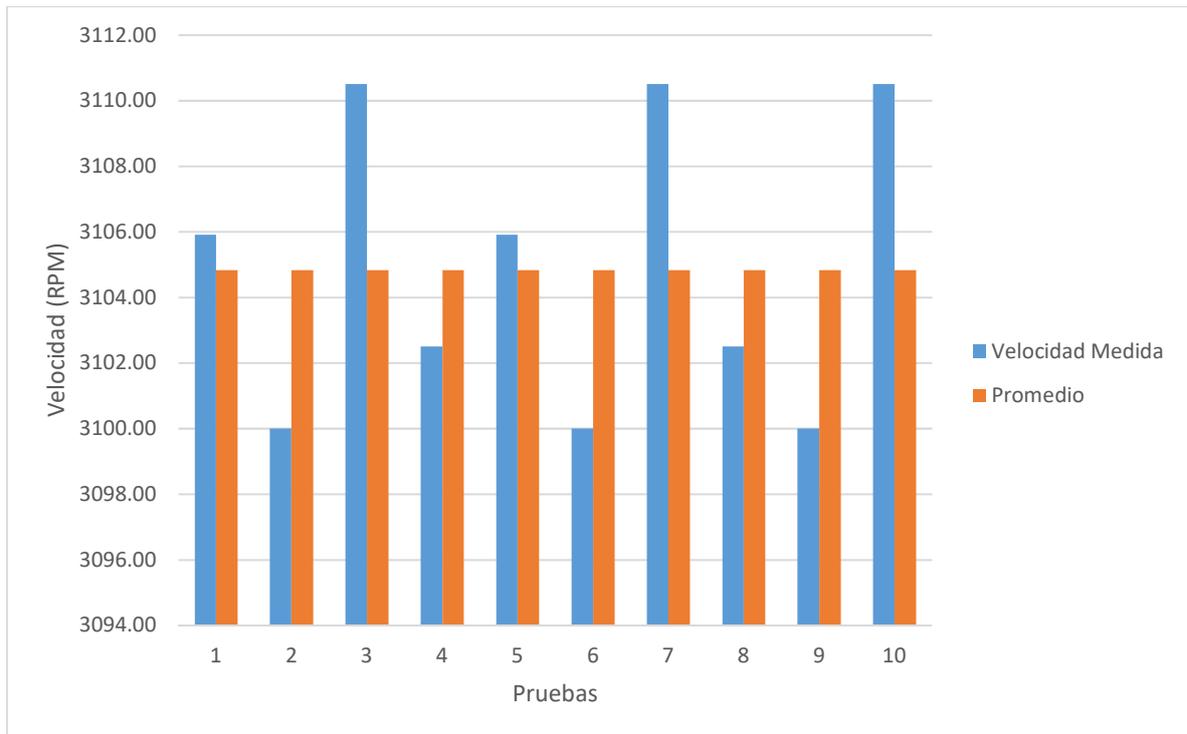


Figura 4. 5 Velocidad Máxima de la Turbina

La figura 4.5 muestra la velocidad máxima alcanzada por la turbina Tesla al ser conectada al generador de vapor, por otra parte, la figura 4.6 muestra el flujo obtenido durante las pruebas, de este modo se puede ver la relación que existe entre el flujo de vapor que circula a través de la turbina y la velocidad que puede desarrollar.

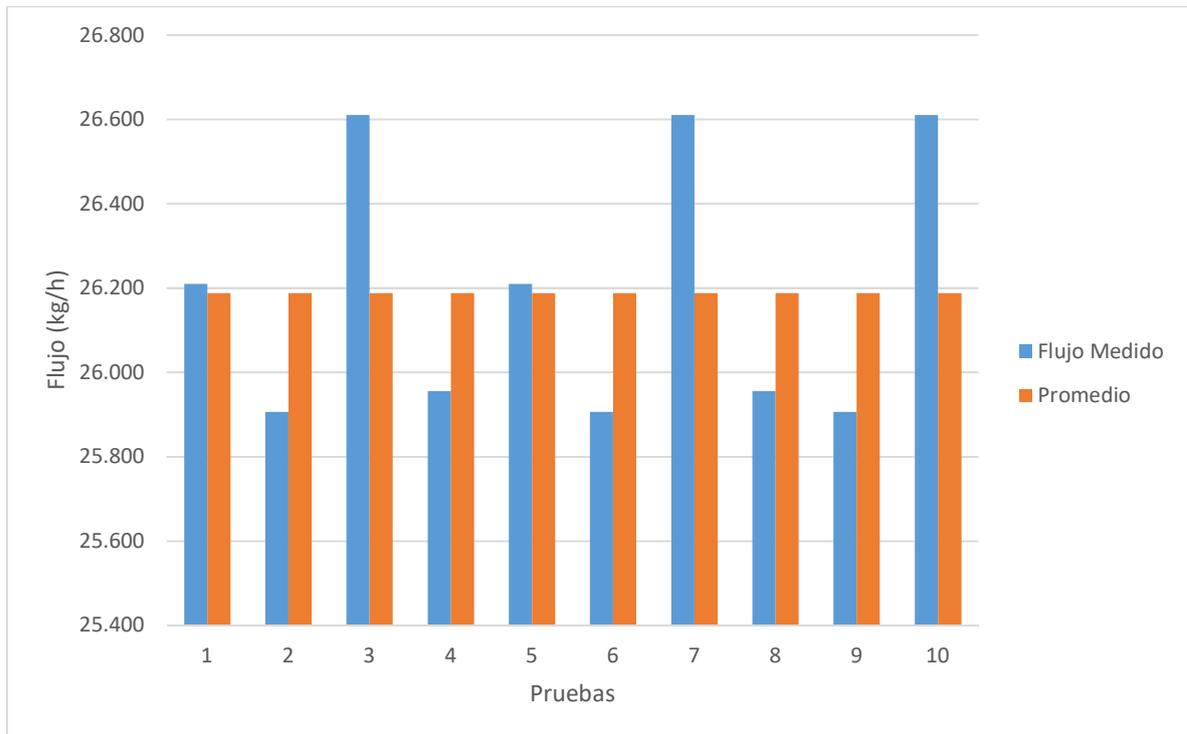


Figura 4. 6 Flujo que circula a través de la turbina

Los resultados de las pruebas se muestran en los anexos 9, 10 y 11 en ellos se pueden observar las tablas de datos obtenidos de las pruebas realizadas. A partir de los datos obtenidos de las pruebas se puede obtener la potencia obtenida de la turbina, lo que permite saber cuánta potencia se obtiene en realidad con respecto a la potencia para la que fue diseñada.

Datos de operación:

Flujo másico: 29 kg/h

Presión de apertura: 80 psi

Temperatura de apertura: 155.4°C

Revoluciones en vacío: 4000rpm

Revoluciones con carga: 610 rpm max

4.2.1 Cálculo de la potencia

La potencia puede ser obtenida de la multiplicación del torque y la velocidad de la turbina en rad/s. Antes de calcular la potencia se debe calcular el torque de la turbina para ello se requieren los siguientes datos:

Viscosidad dinámica (μ) = 1.47711×10^{-5} kg/ms

Velocidad Tangencial (V_{θ})

Radio Externo (r_o) = 0.1065m

Separación entre discos (b) = 0.00033 m

El valor de la viscosidad dinámica es obtenido de tablas del anexo 14.

Para la obtención de la Velocidad tangencial se multiplica directamente la velocidad angular y el radio externo de los discos.

Al convertir rpm en radianes $\omega=418.879$ rad/s

$$V_{\theta} = (418\text{rad/s})(0.1065\text{m})$$

$$V_{\theta} = 44.611\text{m/s}$$

$$\tau = \frac{3(1.47711 \times 10^{-5})(44.611)(0.1065)}{0.00033}$$

$$\tau = \frac{3(1.47711 \times 10^{-5})(44.611)(0.1065)}{0.00033}$$

$$\tau = 637.987 \times 10^{-3} \text{Nm}$$

$$P = (637.987 \times 10^{-3})(418.879)$$

$$P = 267.239 \text{ W}$$

Tabla 4. 1 Comparación Diseño - Real

	Diseño	Pruebas
	78kg/h	29kg/h
Velocidad	18000rpm	4000rpm
Torque	0.562Nm	0.638Nm
Potencia	1030W	267.239W

Como se puede ver solo se alcanza a utilizar el 25.95% de la capacidad total de la potencia de la turbina, esta prueba fue realizada con la turbina sin carga, ya que el comportamiento de esta cuando tiene la carga instalada cambia requiriendo un flujo mayor que el que presenta para la condición de vacío.

4.3 Generación De Energía Eléctrica

Para entender cómo se genera la energía eléctrica es necesario conocer el funcionamiento del dispositivo generador de energía electricidad, el cual, para este caso es un proceso de transformación de energía mecánica a energía eléctrica.

Las pruebas realizadas son para verificar la operación de la turbina en conjunto con el alternador y así poder observar el cambio en la operación de la turbina, lo que permitirá tener una referencia más clara para los requerimientos óptimos del sistema.

Se realiza pruebas para medir las revoluciones necesarias para generar el voltaje en el alternador, esta prueba será realizada con el alternador sin batería conectada y con la batería conectada. El cálculo del par necesario para que el alternador opere a un voltaje de 12 volts a su máxima capacidad de generación:

Potencia: 42W

$$\tau_{Alternador} = \frac{42W}{15.708 \text{ rad/s}}$$

$$\tau_{Alternador} = 2.674 \text{ Nm}$$

El par anterior es para las velocidades y condiciones de diseño, sin embargo, este puede ser diferente en la realidad, así como el hecho de que depende de la carga instalada en el alternador, pero proporciona una referencia de los parámetros necesarios para su correcta operación. Comparando el torque de la turbina con el necesario para operar el alternador.

$$\tau_{Alternador} > \tau_{Turbina}$$

$$2.674 \text{ Nm} > 0.638 \text{ Nm}$$

Lo primero es conocer la velocidad real a la que el alternador genera el voltaje, ésta relación nos ayudará a saber el torque real que se requiere en la operación real del alternador.

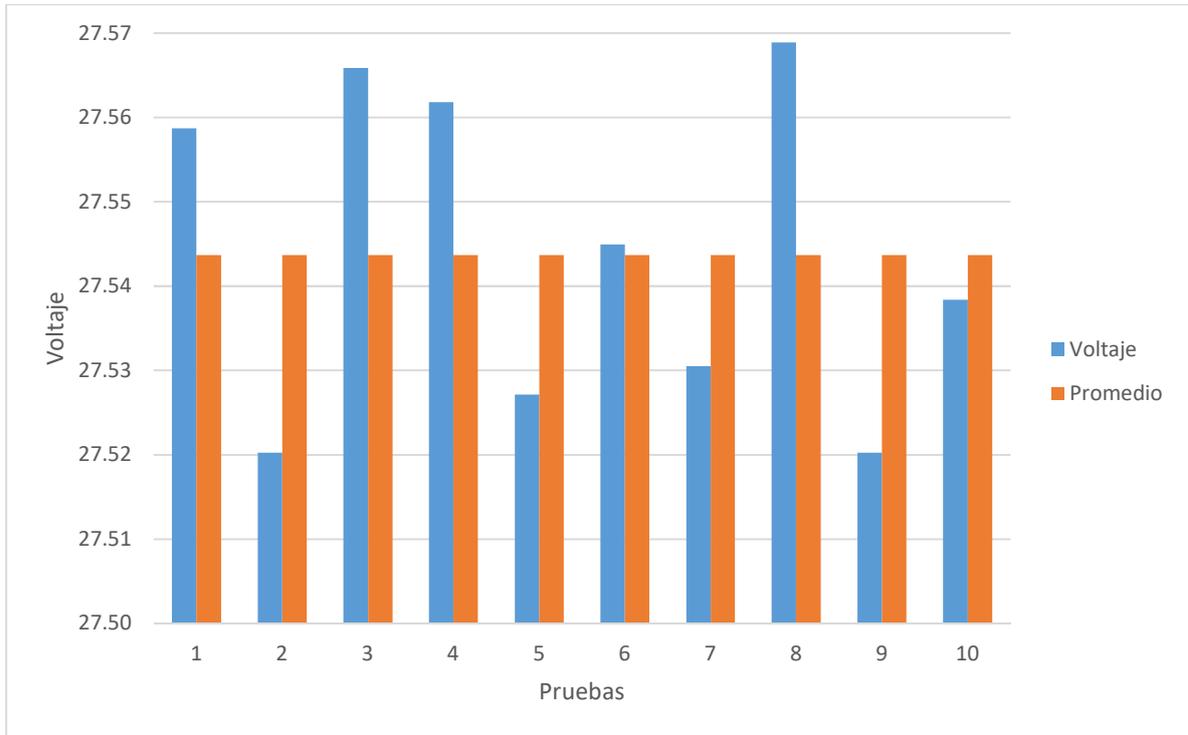


Figura 4. 7 Voltaje Máximo Alcanzado Sin Carga

En las figuras 4.11 y 4.12 se puede observar el voltaje máximo generado, así como la velocidad requerida en cada prueba realizada en la conexión Turbina Tesla – Alternador, en ellas también se puede observar la variabilidad que tiene el sistema durante su operación donde la variación obtenida es de 0.019 para el voltaje

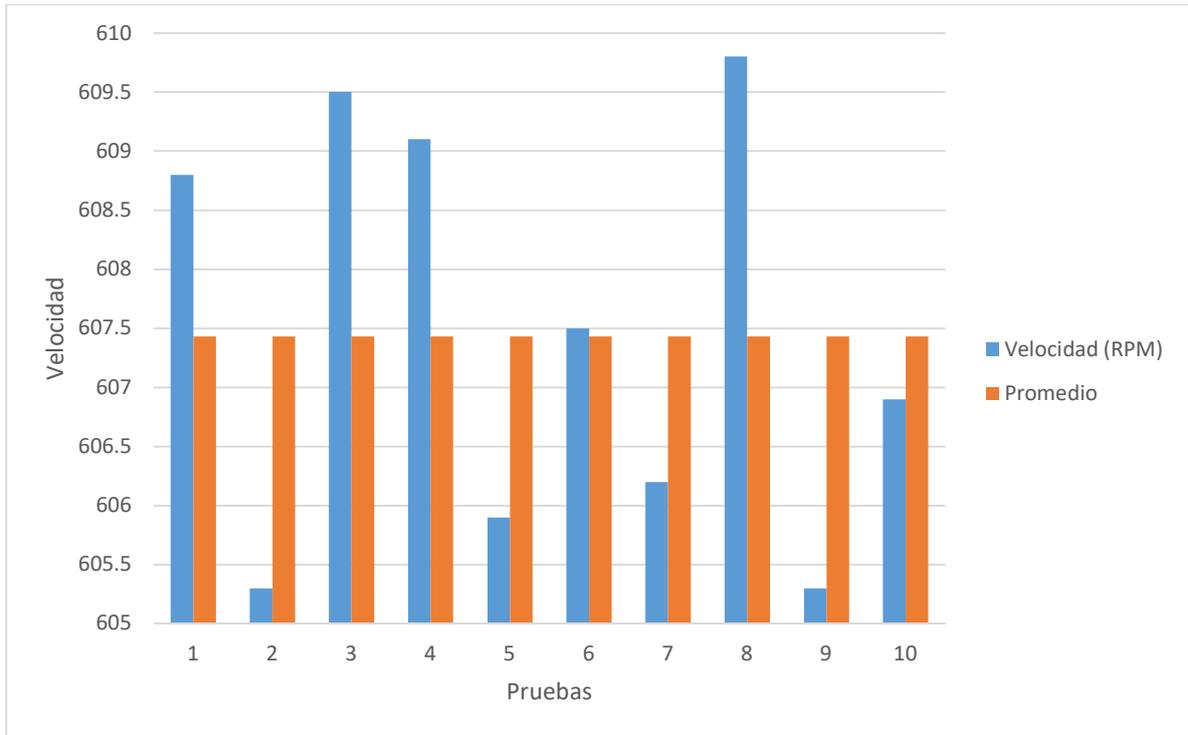


Figura 4. 8 Velocidad Para Voltaje Máximo del Alternador

La velocidad necesaria para generar 14.7 volts es de 338.9 rpm, voltaje necesario para cargar de manera óptima la batería seleccionada, esto significa que el par requerido para una carga de 3.5 Amperes es:

Potencia = 51.45 W;

Velocidad = 35.49 rad/s

$$\tau_{Alternador} = \frac{51.45W}{35.49 \text{ rad/s}}$$

$$\tau_{Alternador} = 1.45Nm$$

La relación de voltaje – velocidad establecida anteriormente se puede observar en los Anexos 16 y 17.

Esto muestra que el torque del alternador sigue siendo mayor, en las pruebas de almacenamiento se puede observar claramente la limitante del torque en el proceso de generación ya que no se alcanza a generar el voltaje necesario para cargar la batería de 12 Volts a 35Ah. La figura 4.13 muestra el voltaje máximo promedio que el alternador puede proporcionar. Se puede observar que este voltaje es menor que el obtenido anteriormente, esto se debe a que el par del alternador se incrementa conforme se incrementa el valor de la carga, debido a esto solo se alcanza un voltaje máximo de 9.9 Volts.

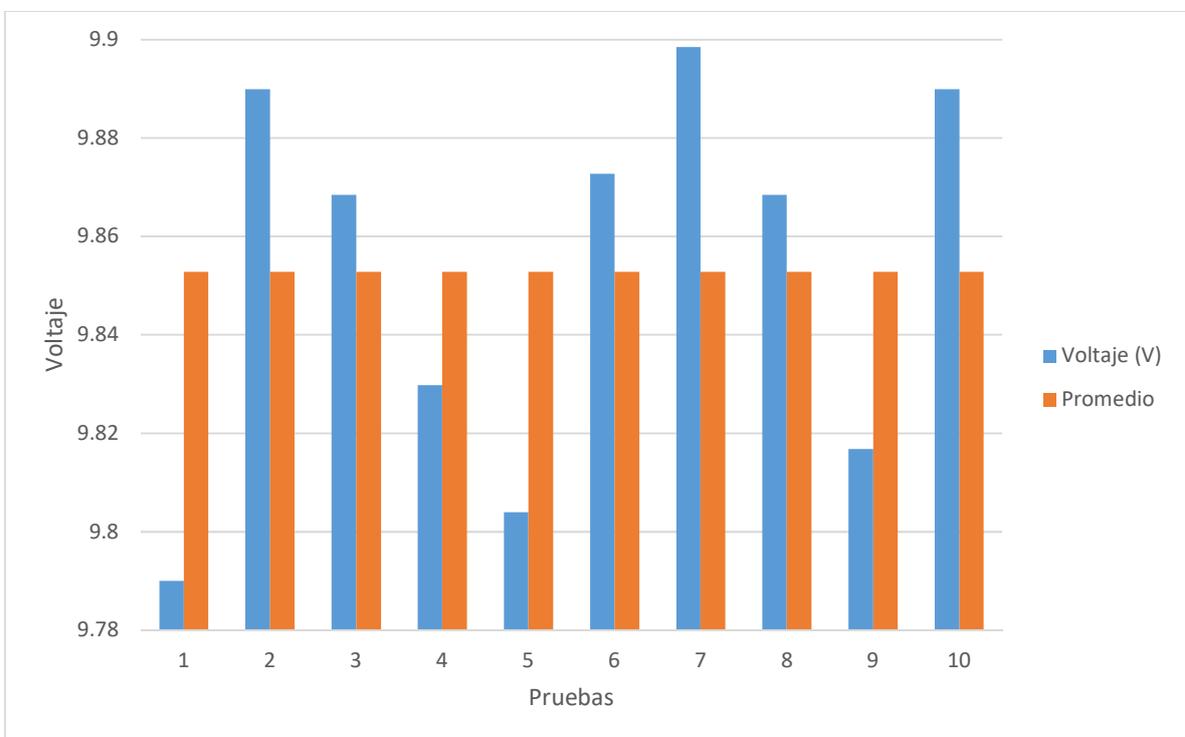


Figura 4. 9 Voltaje Generado Con Batería de 12V a 35Ah

Los resultados obtenidos en la prueba de generación con la batería conectada muestran el cambio del torque y el flujo en la turbina debido al incremento de la carga producido por la batería. Los resultados de estas pruebas se encuentran en los anexos 18 y 19.

El torque máximo producido por la turbina con esa carga es menor, por lo que no es suficiente para alcanzar la velocidad necesaria para generar el voltaje requerido para la carga de la batería.

Este efecto es producido debido a que el alternador es de bajas revoluciones, por lo que requiere un mayor torque, y que si bien es cierto que es aplicado en aerogeneradores de bajas velocidades de viento en ese caso se tiene la propiedad de contar con aspas instaladas en el rotor, lo que permite incrementar el brazo de palanca y así proveer el torque requerido por el generador.

CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones del proyecto realizado, así como las sugerencias de mejoras que se pueden incluir en trabajos posteriores para su mejora y lograr una implementación óptima de éste.

5.1 Conclusiones

El proceso de realización del proyecto permitió conocer las condiciones de operación para una turbina Tesla, así como las limitaciones que esta tiene para su implementación, lo que da como resultado el poder identificar las posibles áreas de mejora para el dispositivo y el sistema.

De acuerdo a las pruebas realizadas se pudo cumplir con el objetivo de cuantificar las características de operación de la turbina, en donde se pudo establecer que se requiere:

Tabla 5. 1 Características de operación requeridas por la turbina

Presión mínima	80psi
Volumen	50% de la capacidad total del contenedor del generador de vapor
Flujo	26 kg/h con un vapor saturado ya que es el que mejores resultados mostró

Las pruebas para la generación del vapor se realizaron con dos tipos diferentes de combustible, esto para poder observar el comportamiento en este proceso, y establecer las diferencias de consumo entre los dos tipos de combustible, los combustibles empleados fueron Gas LP y Biomasa Sólida, en donde los consumos fueron de 1.25 kg y 2.5 kg respectivamente, estos valores corresponden a lo requerido para alcanzar las condiciones de operación de la turbina.

El voltaje generado está directamente relacionado con la velocidad que hay en el rotor del generador eléctrico, pero está se ve afectada dependiendo de la carga eléctrica que este tenga instalada, ya que con una mayor carga se incrementa la resistencia por lo que se va limitando proporcionalmente.

El voltaje máximo alcanzado con la carga instalada fue de 9.9 Volts con un consumo eléctrico de 3.5 amperes, a partir de estos valores se puede obtener la potencia total obtenida a la salida del sistema la cual es de 34.65 watts, cabe mencionar que la potencia total de entrada 22.01 kW. La razón de la baja potencia se debe a que la turbina tesla alcanza su máxima potencia y eficiencia hasta alcanzar su velocidad máxima ya que es a la que alcanza a su vez la potencia máxima.

5.2 Recomendaciones

La realización del proyecto permitió expandir los conocimientos que ya se tenían acerca de una turbina tesla, así como su funcionamiento de forma experimental, lo cual proporciona una visión más amplia sobre las necesidades de diseño.

Con las pruebas realizadas también se pudo observar los efectos de diferentes tipos de fluido en la operación de la turbina, dando como resultado la selección de un vapor saturado, en donde se mostró un mejor funcionamiento de la turbina. Por otra parte, también se demostró que la correcta selección de los dispositivos que integran al sistema es muy importante, ya que se requiere que ambos tengan la capacidad de operar de forma óptima.

La potencial aplicación de la turbina Tesla en un sistema de micro-generación es elevada, ya que es un dispositivo que ofrece las ventajas ya mencionadas anteriormente, esto permite que su uso no se limite y pueda ser empleada en hogares o instalaciones de emergencia.

Para lograr que la turbina proporcione todos estos beneficios se requiere que, tanto la instalación de vapor como la de los componentes de generación y almacenamiento sean los adecuados para dicha aplicación.

En el caso del generador de vapor se requiere que este sea capaz de proporcionar un flujo constante por un periodo de tiempo prolongado, el cual sea el necesario para cargar el dispositivo de almacenamiento, esto permitirá obtener un mejor rendimiento de la turbina en términos de operación.

La selección del dispositivo de almacenamiento es importante, ya que este es el que contendrá la energía generada por el alternador para posteriormente ser acondicionada para una aplicación determinada, sin embargo, esta debe ser seleccionada en función de la capacidad de generación de corriente del alternador.

La selección del alternador es un elemento que al igual que el generador de vapor es importante ya que de igual manera este puede afectar al rendimiento del sistema en general, ya que como se vio de este depende el poder alcanzar la potencia máxima para la que la turbina fue diseñada.

El generador de vapor ya se mencionó como un elemento importante en el proceso de operación de la turbina, razón por la que es necesario tomar en cuenta al momento de diseñar la turbina el flujo de trabajo, o bien si se dispone de un generador capaz de proporcionar el flujo requerido en el diseño.

El rediseño de la turbina debe ser enfocado, en este caso a la aplicación del flujo de vapor actual, esto permitirá llegar a la potencia máxima de la turbina, y así seleccionar de mejor manera los elementos que conformen el sistema de micro-generación. A su vez esto también permitirá realizar el diseño en función de las necesidades de energía, estableciendo como parámetros de diseño la potencia de trabajo del sistema en conjunto.

Bibliografía

- [1] C. G.-T. F. y. V. L. Bordons, «Gestión Óptima de la Energía en Microrredes con Generación Renovable,» *Revista Iberoamericana de Automática E Informática Industrial*, vol. 12, nº 2, pp. 117-132, 2015.
- [2] R. Pichs Madrugada, «Tendencias Energéticas Mundiales: Implicaciones Sociales y Ambientales,» Cubasolar.cu, Cuba, 2008.
- [3] Secretaría de Energía, «Estrategía Nacional de Energía,» Secretaría De Energía, México, 2014.
- [4] C. F. D. E. (CFE), «Listado de Centrales Generadoras,» CFE, México, 2016.
- [5] Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, Guía Básica para la Generación Distribuida, Madrid: Gráficas Elisa S.A, 2007.
- [6] Gobierno de La República, «Reforma Energética,» Secretaría Nacional De Energía, México, 2015.
- [7] A. Morales, Propuesta de Eficiencia Energética Utilizando Cogeneración con Microturbinas, Monterrey: Cimav, 2015.
- [8] G. Pino, «La electricidad y su evolución,» Bolivia, 2015.
- [9] C. V. José Carlos, «Electricidad Para Viviendas,» ICB editores, España, 2017.
- [10] R. L. S. K. Rahul Rawat*, «Thermodynamic study of solar photovoltaic energy conversion: An overview,» *Science Direct*, vol. 71, pp. 630 - 638, 2017.
- [11] M. Mussard, «Solar energy under cold climatic conditions: A review,» *Science Direct*, vol. 74, pp. 733-745, 2017.
- [12] M. O. A. G. Priscila Gonçalves Vasconcelos Sampaio, «Photovoltaic solar energy: Conceptual framework,» *Science Direct*, vol. 74, pp. 590 - 601, 2017.
- [13] N. Mithraratne, «Roof-top wind turbines for microgeneration in urban houses in New Zealand,» *Science Direct*, vol. 41, pp. 1013-1018, 2009.
- [14] Global Wind Energy Council, «Global Wind Report: Annual Market Update,» Global Wind Energy Council, Delhi, 2017.

- [15] R. Chacartegui, «A Humid Air Turbine–Organic Rankine Cycle combined cycle for distributed microgeneration,» *Elsevier*, vol. 104, pp. 115-126, 2015.
- [16] M. Madrigal, «Potenciando la Generación Distribuida en México: Nuevos Instrumentos de Regulación,» Comisión Reguladora de Energía, México, 2017.
- [17] S. Sengupta, «Flow of a nanofluid in the microspacing within co-rotating discs de una turbina Tesla,» *Applied Mathematical Modelling*, n° 40, pp. 485-499, 2015.
- [18] M. G. A.L. Neckel, «Influence of geometry on the efficiency of convergent–divergent nozzles applied to Tesla Turbines,» *Experimental Thermal and Fluid Science*, n° 62, pp. 131 - 140, 2015.
- [19] J. Song, «Performance estimation of Tesla turbine applied in small scale Organic Rankine Cycle (ORC) system,» *Applied Thermal Engineering*, n° 110, pp. 318 - 326, 2017.
- [20] J. G. M. Larios, Diseño de Una Turbina Sin Álabes Con Enfoque de Optimización, Cuernavaca, Morelos, México: Cenidet, 2012.
- [21] P. A. Bahamondes, Descripción de Calderas y Generadores de Vapor, Chile: ACHS.
- [22] J. M. A. L. A. Molina, Calderas de Vapor en la Industria, Bilbao: Cadem-Eve, 1996.
- [23] Armstrong International, «Principios Básicos del Vapor,» de *Fundamentos del vapor*, 2006.
- [24] Y. S. Cengel, Mecánica de Fluidos Fundamentos y Aplicaciones, Distrito Federal, México: McGraw-Hill Interamericana, 2006.
- [25] F. M. White, Fluid Mechanics Fifth Edition, Rhode Island: McGraw-Hill.
- [26] Y. A. ÇENGEL, Transferencia De Calor Y Masa, México: McGraw-Hill Interamericana, 2007.
- [27] M. Podergajs, «The Tesla Turbine,» *Universidad de Ljubjana*, pp. 123 - 135, 1993.
- [28] A. J. A. B. A. S. B. B. Rakesh Jose, «An Experimental Study on the Various Parameters of Tesla Turbine Using CFD,» *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, vol. 3, n° 3, pp. 241 - 244, 2016.
- [29] A. E. Fitzgerald, Electric Machinery, Nueva York: Mc Graw Hill, 2003.

- [30] I. M. Villegaz, Diseño y Análisis Para un Generador Eléctrico de Alta Velocidad Acoplado a una Microturbina, De México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2013.
- [31] Steren, «Steren México,» Steren, 30 01 2015. [En línea]. Available: <https://www.steren.com.mx/cronometro-deportivo-resistente-al-agua.html>. [Último acceso: 14 09 2016].
- [32] Krohne, OPTISWIRL 4070, Alemania: Krohne, 2005.

Anexos

Anexo 1

Elemento: Bourdon de bronce
 Conexión: Bronce
 Caja: Lámina de acero esmaltado negro

Manómetros Usos Generales



Modelos 11 y 15



✓ CARACTERÍSTICAS GENERALES

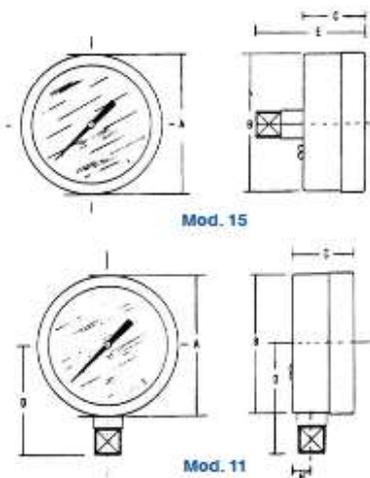
Exactitud:	+/- 2% del total de la escala
Elemento:	Tubo bourdon de bronce
Conexión:	Bronce 1/4" N.P.T. inferior o posterior al centro
Mecanismo:	Bronce
Caja:	Lámina de acero esmaltado negro
Bisel:	A presión de lámina de acero esmaltado negro
Ventana:	Acrílico
Carátula:	Aluminio fondo blanco, números negros
Aguja:	Aluminio esmaltado negro
Tamaños:	ø 51 mm (2") ø 63 mm (2 1/2")
Rangos:	Doble escala, kg/cm² + psi max. 280 kg/cm²

🔍 COMO ORDENAR

	Cantidad	Modelo	Tamaño (mm)	Rango	Conexión
Ejem.	50 pzas.	11	63	14 kg/cm²	inf. 1/4" N.P.T.

🔍 APLICACIONES

Manómetro diseñado para usos generales para indicar la presión de fluidos no corrosivos al bronce, como aire, agua, aceite, etc., en aplicaciones como bombas, calderas, compresores, entre otras.



RANGOS ESTÁNDAR

PRESIÓN

kgf/cm²	Psi
0 - 1	0 - 15
0 - 2	0 - 30
0 - 4	0 - 60
0 - 7	0 - 200
0 - 11	0 - 100
0 - 14	0 - 180
0 - 21	0 - 300
0 - 28	0 - 400
0 - 42	0 - 600
0 - 70	0 - 1000
0 - 105	0 - 1500
0 - 210	0 - 3000
0 - 280	0 - 4000

VACÍO

Cm Hg	puig Hg
-76 + 0	-30 + 0

Dimensiones en mm.

Tamaño nominal	A	B	C	D	E	H
ø 51 mm (2")	52	51	28	45	46	9
ø 63 mm (2 1/2")	68	67	28	54	48	10

Anexo 2

DE WIT

Termómetros Bimetálicos

Termómetro

El termómetro bimetalico DE-WIT tiene un sellado hermético en el bisel a la caja, el sellado hermético ofrece protección del medio ambiente y el polvo, eliminando los problemas creados por la entrada de humedad a la caja, sin eliminar la posibilidad de reparación (cambio de carátula o de cristal) ya que el bisel es del tipo cierre de bayoneta, ajuste externo de cero en la parte posterior de la caja, la hélice bimetalica está recubierta de silicón para minimizar la oscilación de la aguja y mejorar la transmisión de la temperatura en la mayoría de los proceso industriales, la longitud estándar del vástago es de 2 ½" hasta 24" y el diámetro de ¼" con carátula de 3" y de 5".



Rangos Disponibles

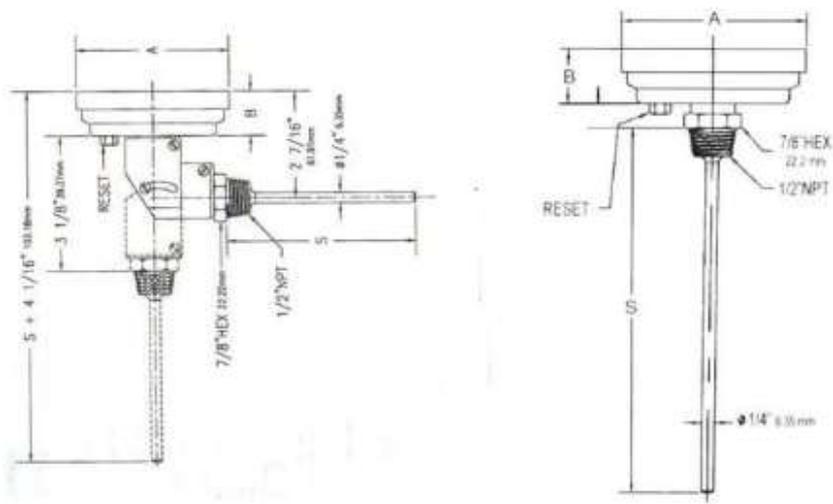
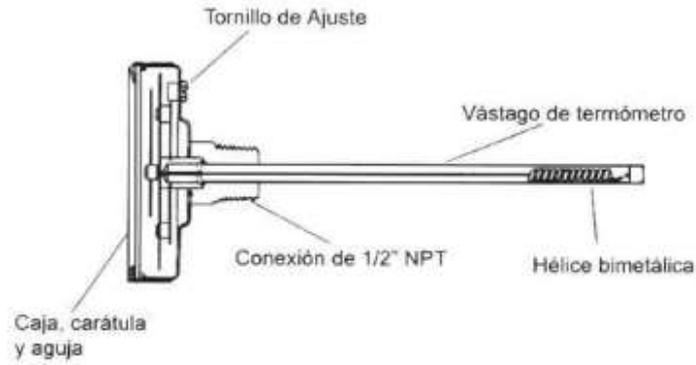
0 - 50 C°
0 - 150 C°
0 - 200 C°
0 - 300 C°
50 - 400 C°
100 - 500 C°

Longitud del Vástago

2 1/2" (63.5 mm)
4" (101.6 mm)
6" (152.4 mm)
9" (228.6 mm)
12" (304.8 mm)
15" (381.0 mm)
18" (457.2 mm)
24" (609.6 mm)

CARACTERÍSTICAS GENERALES

Caja y Bisel:	Acero Inoxidable 304 Sellado Hermético
Vástago y Conexión:	Acero Inoxidable 304 totalmente soldado, tamaño de la conexión 1/2" NPT macho.
Carátula:	Aluminio blanco, números negros en escala doble F° y C°
Aguja:	Aluminio negro estándar.
Exactitud:	1% del Total del rango (ASME B40.3 grado A)
Ajuste:	Externo de acero en la parte posterior de la caja
Ventana:	Vidrio estandar para servicio pesado (opcional cristal inastillable).
Escala:	Doble F° y C°



Termómetro

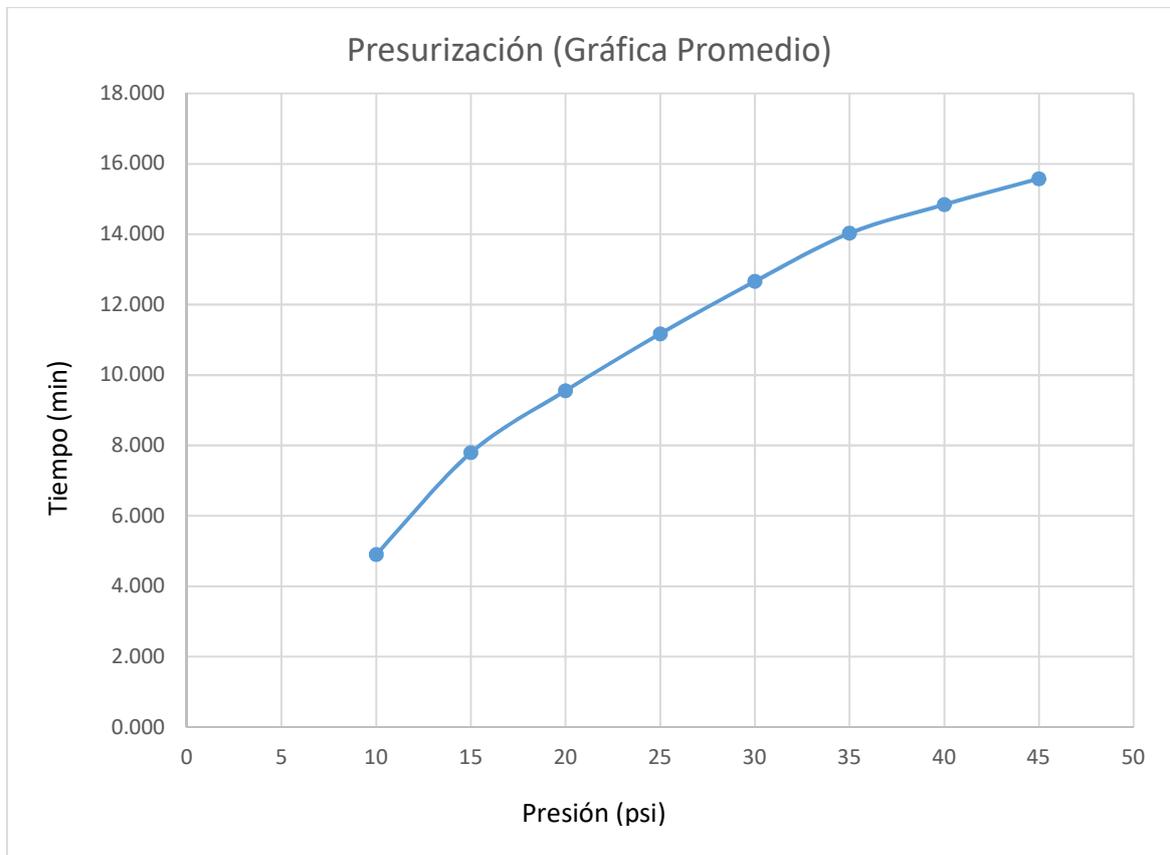
Mod.	Tamaño de Carátula	A	B	S(Longitud del Vástago)
BMP	3"(76.2 mm)	82.55 mm	16 mm	especificar
BMP	5"(127 mm)	133.35 mm	18 mm	especificar
BMTA	5"(127 mm)	133.35 mm	18 mm	especificar

Cómo pedir los Termómetros					
Mod.	Posterior	Inferior	Todo Ángulo	Tamaño de Carátula	Largo de Vástago
BM	P	I	TA	3" o 5"	2 1/2" a 24"

Anexo 3

Nivel 10 Litros											
Presión (psi)	10	15	20	25	30	35	40	45	T. Amb. (°C)	T. Inicial de Agua (°C)	% H.R
Prueba 1 (min)	4.917	7.833	9.600	11.217	12.717	14.067	14.900	15.638	21.9	18.8	75
Prueba 2 (min)	5.084	8.433	10.259	11.909	13.634	14.742	15.867	16.619	23.1	20.1	70
Prueba 3 (min)	5.250	9.033	10.917	12.600	14.550	15.417	16.833	17.600	20.7	19.9	65
Prueba 4 (min)	4.584	6.633	8.283	9.834	10.884	12.717	12.967	13.676	22.8	22	80
Prueba 5 (min)	4.751	7.233	8.942	10.526	11.801	13.392	13.934	14.657	19.5	20.02	70
Prueba 6 (min)	5.000	8.133	9.929	11.563	13.175	14.405	15.383	16.129	21.3	19.5	75
Prueba 7 (min)	4.959	7.983	9.765	11.390	12.946	14.236	15.142	15.883	20.6	19.55	66
Prueba 8 (min)	4.667	6.933	8.612	10.180	11.342	13.055	13.450	14.167	20.1	20.61	77
Prueba 9 (min)	4.938	7.908	9.682	11.303	12.832	14.151	15.021	15.761	22.7	20	78
Prueba 10 (min)	4.917	7.833	9.600	11.217	12.717	14.067	14.900	15.638	21.2	19.9	81
Promedio	4.907	7.796	9.559	11.174	12.660	14.025	14.840	15.577	21.39	20.038	73.7

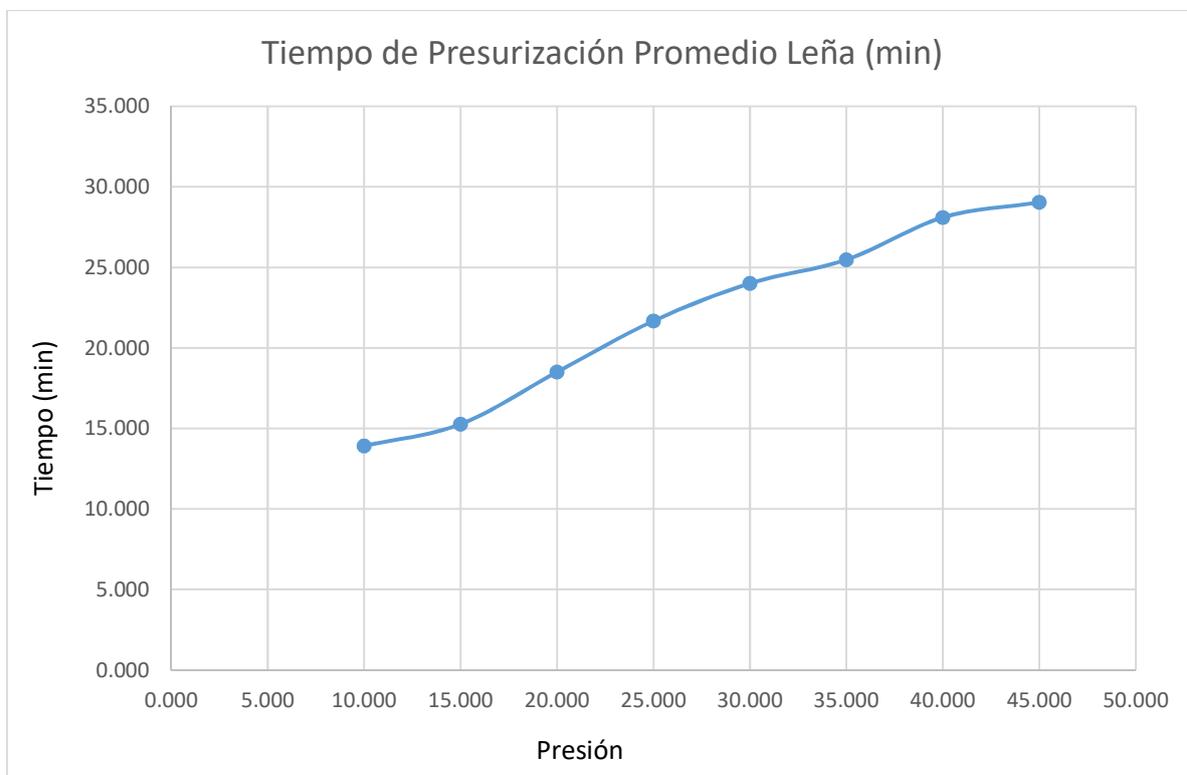
Anexo 4



Anexo 5

Combustible: Leña											
Nivel 10 Litros											
Tiempo											
Presión	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	Promedio
10.000	14.411	13.717	14.064	14.791	14.001	13.715	13.089	13.516	14.246	13.617	13.917
15.000	15.018	15.367	15.193	16.003	15.218	15.360	15.009	15.006	15.395	15.137	15.271
20.000	18.601	18.517	18.559	19.513	18.601	18.758	18.525	17.065	18.798	18.129	18.507
25.000	22.054	21.333	21.694	22.005	21.414	21.300	22.008	21.479	21.771	21.753	21.681
30.000	24.213	23.550	23.882	24.716	24.316	23.450	24.091	23.786	24.090	23.989	24.008
35.000	25.912	24.883	25.398	25.789	25.801	25.556	25.814	24.785	25.495	25.365	25.480
40.000	28.615	27.517	28.066	28.632	27.631	27.698	28.715	27.713	28.208	28.212	28.101
45.000	29.781	28.283	29.032	29.680	28.895	28.412	29.512	28.502	29.194	29.069	29.036
T. Amb.	20.50	21.00	20.89	21.60	19.86	22.40	21.74	20.96	21.12	21.27	21.13
T. Inicial de Agua	19.50	20.12	19.81	21.63	20.19	18.97	20.23	19.84	20.14	20.04	20.05
% H.R	66	75	74	69	80	85	74	76	82	77	75

Anexo 6



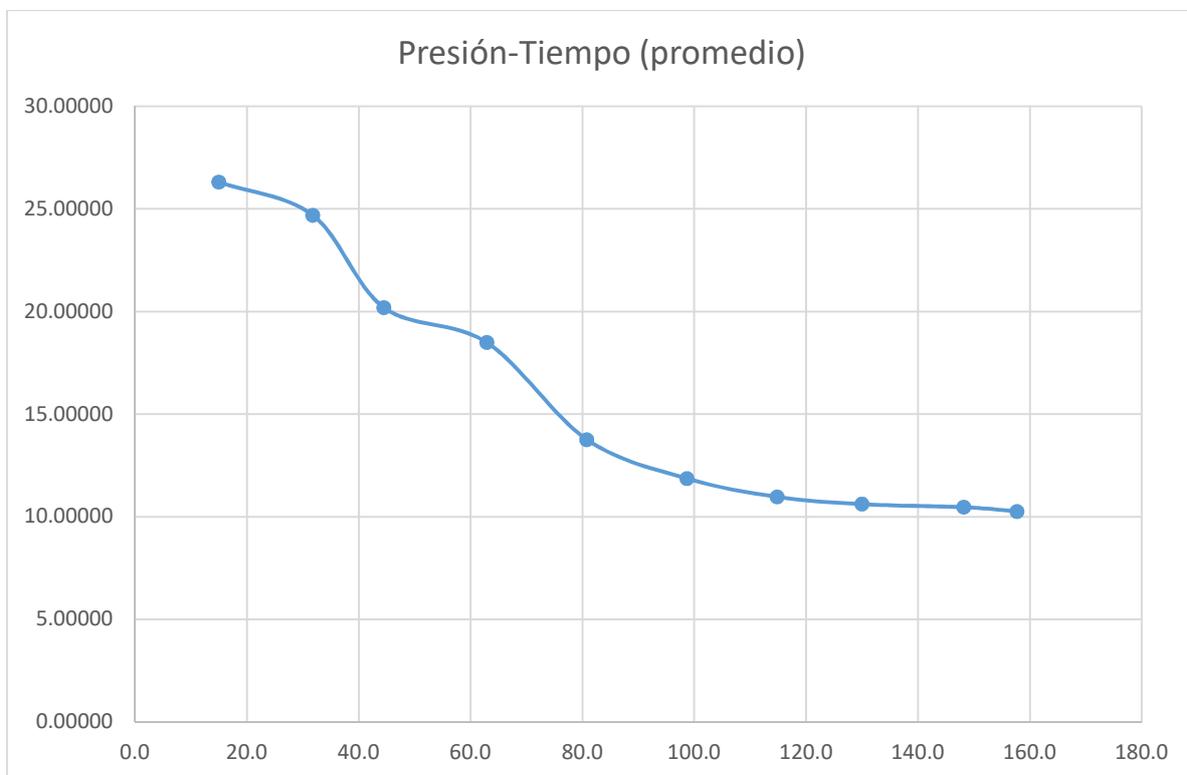
Anexo 7

Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Prueba 4	
Flujo	Tiempo	Flujo	Tiempo	Flujo	Tiempo	Flujo	Tiempo
kg/h	s	kg/h	s	kg/h	s	kg/h	s
26.210	14	26.500	16	26.000	15	26.600	13
24.584	31	24.874	33	24.374	32	24.974	30
20.093	44	20.383	46	19.883	45	20.483	43
18.386	62	18.676	64	18.176	63	18.776	61
13.656	80	13.946	82	13.446	81	14.046	79
11.761	98	12.051	100	11.551	99	12.151	97
10.867	114	11.157	116	10.657	115	11.257	113
10.674	129	10.964	131	10.464	130	11.064	128
10.227	147	10.517	149	10.017	148	10.617	146
10.130	157	10.421	159	9.920	158	10.520	156
T. Amb	21.9	T. Amb	23.1	T. Amb	20.7	T. Amb	22.8
T. Agua	18.8	T. Agua	20.1	T. Agua	19.9	T. Agua	22
% H.R.	75	% H.R.	70	% H.R.	65	% H.R.	80

Prueba 5		Prueba 6		Prueba 7		Prueba 8	
Flujo	Tiempo	Flujo	Tiempo	Flujo	Tiempo	Flujo	Tiempo
kg/h	s	kg/h	s	kg/h	s	kg/h	s
26.379	18	26.290	15	26.210	14	26.512	16
24.753	35	24.664	32	24.584	31	24.887	32
20.262	48	20.173	45	20.093	44	20.396	42
18.555	66	18.466	63	18.386	62	18.688	64
13.825	84	13.736	81	13.656	80	13.959	82
11.930	102	11.841	99	11.761	98	12.064	96
11.036	118	10.947	115	10.867	114	11.169	115
10.843	133	10.754	130	10.130	129	10.976	131
10.395	151	10.307	148	10.674	147	10.529	152
10.299	161	10.210	158	10.227	157	10.433	159
T. Amb	19.5	T. Amb	21.3	T. Amb	20.6	T. Amb	20.1
T. Agua	20.02	T. Agua	19.5	T. Agua	19.55	T. Agua	20.61
% H.R.	70	% H.R.	75	% H.R.	66	% H.R.	77

Prueba 9		Prueba 10		Promedio	
Flujo	Tiempo	Flujo	Tiempo	Flujo	Tiempo
kg/h	s	kg/h	s	kg/h	s
26.210	14	26.210	15	26.312	15
24.584	31	24.584	31	24.686	31.8
20.093	44	20.093	44	20.195	44.5
18.386	62	18.386	62	18.488	62.9
13.656	80	13.656	79	13.758	80.8
11.761	98	11.761	100	11.863	98.7
10.867	114	10.867	114	10.969	114.8
10.130	129	10.130	130	10.613	130
10.674	147	10.674	147	10.463	148.2
10.227	157	10.227	155	10.261	157.7
T. Amb	22.7	T. Amb	21.2	T. Amb	21.39
T. Agua	20	T. Agua	19.9	T. Agua	20.038
% H.R.	78	% H.R.	81	% H.R.	73.7

Anexo 8



Anexo 9

Propiedades del agua saturada (líquido-vapor): Tabla de presiones

Presión bar	Temp. °C	Volumen específico m ³ /kg		Energía interna kJ/kg		Entalpía kJ/kg			Entropía kJ/kg K	
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor vaporiz.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor sat.
		$v_f \times 10^3$	v_g	u_f	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_g
0,04	28,96	1,0040	34,800	121,45	2415,2	121,46	2432,9	2554,4	0,4226	8,4746
0,06	36,16	1,0064	23,739	151,53	2425,0	151,53	2415,9	2567,4	0,5210	8,3304
0,08	41,51	1,0084	18,103	173,87	2432,2	173,88	2403,1	2577,0	0,5926	8,2287
0,10	45,81	1,0102	14,674	191,82	2437,9	191,83	2392,8	2584,7	0,6493	8,1502
0,20	60,06	1,0172	7,649	251,38	2456,7	251,40	2358,3	2609,7	0,8320	7,9085
0,30	69,10	1,0223	5,229	289,20	2468,4	289,23	2336,1	2625,3	0,9439	7,7686
0,40	75,87	1,0265	3,993	317,53	2477,0	317,58	2319,2	2636,8	1,0259	7,6700
0,50	81,33	1,0300	3,240	340,44	2483,9	340,49	2305,4	2645,9	1,0910	7,5939
0,60	85,94	1,0331	2,732	359,79	2489,6	359,86	2293,6	2653,5	1,1453	7,5320
0,70	89,95	1,0360	2,365	376,63	2494,5	376,70	2283,3	2660,0	1,1919	7,4797
0,80	93,50	1,0380	2,087	391,58	2498,8	391,66	2274,1	2665,8	1,2329	7,4346
0,90	96,71	1,0410	1,869	405,06	2502,6	405,15	2265,7	2670,9	1,2695	7,3949
1,00	99,63	1,0432	1,694	417,36	2506,1	417,46	2258,0	2675,5	1,3026	7,3594
1,50	111,4	1,0528	1,159	466,94	2519,7	467,11	2226,5	2693,6	1,4336	7,2233
2,00	120,2	1,0605	0,8857	504,49	2529,5	504,70	2201,9	2706,7	1,5301	7,1271
2,50	127,4	1,0672	0,7187	535,10	2537,2	535,37	2181,5	2716,9	1,6072	7,0527
3,00	133,6	1,0732	0,6058	561,15	2543,6	561,47	2163,8	2725,3	1,6718	6,9919
3,50	138,9	1,0786	0,5243	583,95	2546,9	584,33	2148,1	2732,4	1,7275	6,9405
4,00	143,6	1,0836	0,4625	604,31	2553,6	604,74	2133,8	2738,6	1,7766	6,8959
4,50	147,9	1,0882	0,4140	622,25	2557,6	623,25	2120,7	2743,9	1,8207	6,8565
5,00	151,9	1,0926	0,3749	639,68	2561,2	640,23	2108,5	2748,7	1,8607	6,8212
6,00	158,9	1,1006	0,3157	669,90	2567,4	670,56	2086,3	2756,8	1,9312	6,7600
7,00	165,0	1,1080	0,2729	696,44	2572,5	697,22	2066,3	2763,5	1,9922	6,7080
8,00	170,4	1,1148	0,2404	720,22	2576,8	721,11	2048,0	2769,1	2,0462	6,6628
9,00	175,4	1,1212	0,2150	741,83	2580,5	742,83	2031,1	2773,9	2,0946	6,6226
10,0	179,9	1,1273	0,1944	761,68	2583,6	762,81	2015,3	2778,1	2,1387	6,5863
15,0	198,3	1,1539	0,1318	843,16	2594,5	844,84	1947,3	2792,2	2,3150	6,4448
20,0	212,4	1,1767	0,09963	906,44	2600,3	908,79	1890,7	2799,5	2,4474	6,3409
25,0	224,0	1,1973	0,07998	959,11	2603,1	962,11	1841,0	2803,1	2,5547	6,2575
30,0	233,9	1,2165	0,06668	1004,8	2604,1	1008,4	1795,7	2804,2	2,6457	6,1869
35,0	242,6	1,2347	0,05707	1045,4	2603,7	1049,8	1753,7	2803,4	2,7253	6,1253
40,0	250,4	1,2522	0,04978	1082,3	2602,3	1087,3	1714,1	2801,4	2,7964	6,0701
45,0	257,5	1,2692	0,04406	1116,2	2600,1	1121,9	1676,4	2798,3	2,8610	6,0199
50,0	264,0	1,2859	0,03944	1147,8	2597,1	1154,2	1640,1	2794,3	2,9202	5,9734
60,0	275,6	1,3187	0,03244	1205,4	2589,7	1213,4	1571,0	2784,3	3,0267	5,8892
70,0	285,9	1,3513	0,02737	1257,6	2580,5	1267,0	1505,1	2772,1	3,1211	5,8133
80,0	295,1	1,3842	0,02352	1305,6	2569,8	1316,6	1441,3	2758,0	3,2068	5,7432
90,0	303,4	1,4178	0,02048	1350,5	2557,8	1363,3	1378,9	2742,1	3,2858	5,6772
100	311,1	1,4524	0,01803	1393,0	2544,4	1407,6	1317,1	2724,7	3,3596	5,6141
110	318,2	1,4886	0,01599	1433,7	2529,8	1450,1	1255,5	2705,6	3,4295	5,5527
120	324,8	1,5267	0,01426	1473,0	2513,7	1491,3	1193,6	2684,9	3,4962	5,4924
130	330,9	1,5671	0,01278	1511,1	2496,1	1531,5	1130,7	2662,2	3,5606	5,4323
140	336,8	1,6107	0,01149	1548,6	2476,8	1571,1	1066,5	2637,6	3,6232	5,3717
150	342,2	1,6581	0,01034	1585,6	2455,5	1610,5	1000,0	2610,5	3,6848	5,3098
160	347,4	1,7107	0,009306	1622,7	2431,7	1650,1	930,6	2580,6	3,7461	5,2455
170	352,4	1,7702	0,008364	1660,2	2405,0	1690,3	856,9	2547,2	3,8079	5,1777
180	357,1	1,8397	0,007489	1698,9	2374,3	1732,0	777,1	2509,1	3,8715	5,1044
190	361,5	1,9243	0,006657	1739,9	2338,1	1776,5	688,0	2464,5	3,9368	5,0228
200	365,8	2,036	0,005834	1785,6	2293,0	1826,3	583,4	2409,7	4,0139	4,9269
220,9	374,1	3,155	0,003155	2029,6	2029,6	2099,3	0	2099,3	4,4298	4,4298

Propiedades del agua saturada (líquido-vapor): Tabla de temperaturas

Temp. °C	Presión bar	Volumen específico m ³ /kg		Energía interna kJ/kg		Entalpía kJ/kg			Entropía kJ/kg K	
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor vaporiz.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor sat.
		$v_f \times 10^3$	v_g	u_f	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_g
.01	0,00611	1,0002	206,136	0,00	2375,3	0,01	2501,3	2501,4	0,0000	9,1562
4	0,00813	1,0001	157,232	16,77	2380,9	16,78	2491,9	2508,7	0,0610	9,0514
5	0,00872	1,0001	147,120	20,97	2382,3	20,98	2489,6	2510,6	0,0761	9,0257
8	0,00935	1,0001	137,734	25,19	2383,6	25,20	2487,2	2512,4	0,0912	9,0003
8	0,01072	1,0002	120,917	33,59	2386,4	33,60	2482,5	2516,1	0,1212	8,9501
10	0,01228	1,0004	106,379	42,00	2389,2	42,01	2477,7	2519,8	0,1510	8,9008
11	0,01312	1,0004	99,857	46,20	2390,6	46,20	2475,4	2521,6	0,1658	8,8765
12	0,01402	1,0005	93,784	50,41	2391,9	50,41	2473,0	2523,4	0,1806	8,8524
13	0,01497	1,0007	88,124	54,60	2393,3	54,60	2470,7	2525,3	0,1953	8,8285
14	0,01596	1,0008	82,848	58,79	2394,7	58,80	2468,3	2527,1	0,2099	8,8048
15	0,01705	1,0009	77,926	62,99	2396,1	62,99	2466,9	2528,9	0,2245	8,7814
16	0,01818	1,0011	73,333	67,18	2397,4	67,19	2466,6	2530,8	0,2390	8,7582
17	0,01938	1,0012	69,044	71,38	2398,8	71,38	2461,2	2532,6	0,2535	8,7351
18	0,02064	1,0014	65,038	75,57	2400,2	75,58	2458,8	2534,4	0,2679	8,7123
19	0,02198	1,0016	61,293	79,76	2401,6	79,77	2456,5	2536,2	0,2823	8,6897
20	0,02339	1,0018	57,791	83,95	2402,9	83,96	2454,1	2538,1	0,2966	8,6672
21	0,02487	1,0020	54,514	88,14	2404,3	88,14	2451,8	2539,9	0,3109	8,6450
22	0,02645	1,0022	51,447	92,32	2405,7	92,33	2449,4	2541,7	0,3251	8,6229
23	0,02810	1,0024	48,574	96,51	2407,0	96,52	2447,0	2543,5	0,3393	8,6011
24	0,02985	1,0027	45,883	100,70	2408,4	100,70	2444,7	2545,4	0,3534	8,5794
25	0,03169	1,0029	43,360	104,88	2409,8	104,89	2442,3	2547,2	0,3674	8,5580
26	0,03363	1,0032	40,994	109,06	2411,1	109,07	2439,9	2549,0	0,3814	8,5367
27	0,03567	1,0035	38,774	113,25	2412,5	113,25	2437,6	2550,8	0,3954	8,5156
28	0,03782	1,0037	36,690	117,42	2413,9	117,43	2435,2	2552,6	0,4093	8,4946
29	0,04008	1,0040	34,733	121,60	2415,2	121,61	2432,8	2554,5	0,4231	8,4739
30	0,04246	1,0043	32,894	125,78	2416,6	125,79	2430,5	2556,3	0,4369	8,4533
31	0,04496	1,0046	31,165	129,96	2418,0	129,97	2428,1	2558,1	0,4507	8,4329
32	0,04759	1,0050	29,540	134,14	2419,3	134,15	2425,7	2559,9	0,4644	8,4127
33	0,05034	1,0053	28,011	138,32	2420,7	138,33	2423,4	2561,7	0,4781	8,3927
34	0,05324	1,0056	26,571	142,50	2422,0	142,50	2421,0	2563,5	0,4917	8,3728
35	0,05628	1,0060	25,216	146,67	2423,4	146,68	2418,6	2565,3	0,5053	8,3531
36	0,05947	1,0063	23,940	150,85	2424,7	150,86	2416,2	2567,1	0,5188	8,3336
38	0,06632	1,0071	21,602	159,20	2427,4	159,21	2411,5	2570,7	0,5458	8,2950
40	0,07384	1,0078	19,523	167,56	2430,1	167,57	2406,7	2574,3	0,5725	8,2570
45	0,09593	1,0099	15,258	188,44	2438,6	188,45	2394,8	2583,2	0,6387	8,1648
50	0,1235	1,0121	12,032	209,32	2443,5	209,33	2382,7	2592,1	0,7038	8,0783
55	0,1576	1,0146	9,568	230,21	2450,1	230,23	2370,7	2600,9	0,7679	7,9913
60	0,1994	1,0172	7,671	251,11	2458,6	251,13	2358,6	2609,6	0,8312	7,9096
65	0,2503	1,0199	6,197	272,02	2463,1	272,06	2346,2	2618,3	0,8935	7,8310
70	0,3119	1,0228	5,042	292,95	2469,6	292,98	2333,8	2626,8	0,9549	7,7553
75	0,3858	1,0259	4,131	313,90	2475,9	313,93	2321,4	2635,3	1,0155	7,6824
80	0,4739	1,0291	3,407	334,86	2482,2	334,91	2308,8	2643,7	1,0753	7,6122
85	0,5783	1,0325	2,828	355,84	2488,4	355,90	2296,0	2651,9	1,1343	7,5445
90	0,7014	1,0360	2,361	376,85	2494,5	376,92	2283,2	2660,1	1,1925	7,4791
95	0,8455	1,0397	1,982	397,88	2500,6	397,96	2270,2	2668,1	1,2500	7,4159
100	1,014	1,0435	1,673	418,94	2506,5	419,04	2257,0	2676,1	1,3069	7,3549
110	1,433	1,0516	1,210	461,14	2518,1	461,30	2230,2	2691,5	1,4185	7,2387
120	1,985	1,0603	0,8919	503,50	2529,3	503,71	2202,6	2706,3	1,5276	7,1296
130	2,701	1,0697	0,6685	546,02	2539,9	546,31	2174,2	2720,5	1,6344	7,0269
140	3,613	1,0797	0,5089	588,74	2550,0	589,13	2144,7	2733,9	1,7391	6,9299
150	4,758	1,0905	0,3928	631,88	2559,5	632,20	2114,3	2746,5	1,8418	6,8379
160	6,178	1,1020	0,3071	674,86	2568,4	675,55	2082,6	2758,1	1,9427	6,7502
170	7,917	1,1143	0,2428	718,33	2576,6	719,21	2049,6	2768,7	2,0419	6,6663
180	10,02	1,1274	0,1941	762,09	2583,7	763,22	2015,0	2778,2	2,1396	6,5857
190	12,54	1,1414	0,1565	806,19	2590,0	807,62	1978,8	2786,4	2,2359	6,5079
200	15,54	1,1565	0,1274	850,65	2595,3	852,45	1940,7	2793,2	2,3309	6,4323
210	19,06	1,1726	0,1044	895,53	2599,5	897,76	1900,7	2798,5	2,4248	6,3585
220	23,18	1,1900	0,08619	940,87	2602,4	943,62	1858,5	2802,1	2,5178	6,2861
230	27,95	1,2088	0,07158	986,74	2603,9	990,12	1813,8	2804,0	2,6099	6,2146
240	33,44	1,2291	0,05976	1033,2	2604,0	1037,3	1766,5	2803,8	2,7015	6,1437
250	39,73	1,2512	0,05013	1080,4	2602,4	1085,4	1716,2	2801,5	2,7927	6,0730
260	46,88	1,2755	0,04221	1128,4	2599,0	1134,4	1662,5	2796,6	2,8838	6,0019
270	54,99	1,3023	0,03564	1177,4	2593,7	1184,5	1605,2	2789,7	2,9751	5,9301
280	64,12	1,3321	0,03017	1227,5	2586,1	1236,0	1543,6	2779,6	3,0668	5,8571
290	74,36	1,3656	0,02557	1278,9	2576,0	1289,1	1477,1	2766,2	3,1594	5,7821
300	85,81	1,4036	0,02167	1332,0	2563,0	1344,0	1404,9	2749,0	3,2534	5,7045
320	112,7	1,4988	0,01549	1444,8	2525,5	1461,5	1238,6	2700,1	3,4480	5,5362
340	145,9	1,6379	0,01080	1570,3	2464,6	1594,2	1027,9	2622,0	3,6594	5,3357

Anexo 10

Poderes caloríficos de las principales fuentes energéticas

Tipo de combustible		PCI (G.J/t)	PCI (kWh/Kg)	PCI (kcal/Kg)	PCI (tep/t)	PCI (tep/miles de litros)	PCS (MJ/Nm ³)	PCS (kcal/Nm ³)	
Petróleo y productos petrolíferos	Petróleo Bruto	42,55	11,82	10,190	1,0190				
	Materias primas de refinería	39,88	11,08	9,550	0,9550				
	GLP	45,89	12,75	10,990	1,0990				
	Propano	46,20	12,83	11,063	1,1063		91,27	21,800	
	Butano	44,78	12,44	10,723	1,0723		118,49	28,300	
	Queroseno	42,89	11,91	10,270	1,0270	0,8244			
	Gasolina	43,89	12,19	10,510	1,0510	0,7752			
	Gasolina aviación	43,89	12,19	10,510	1,0510				
	Gasóleo automoción	42,47	11,80	10,170	1,0170	0,8467			
	Otros gasóleos	42,47	11,80	10,170	1,0170	0,8467			
	Fuelóleo	39,88	11,08	9,550	0,9550				
	Alquitrán	39,88	11,08	9,550	0,9550				
	Nafta	43,89	12,19	10,510	1,0510				
	Lubricantes	39,88	11,08	9,550	0,9550				
	Coque de petróleo	31,90	8,86	7,640	0,7640				
	GNL	45,10	12,53	10,800	1,0800				
	Gases	Gas natural						40,474	9,867
Metano		50,00	13,89	11,973	1,1973				
Etano		47,51	13,20	11,350	1,1350				
Gas de refinería		49,36	13,71	11,820	1,1820				
Gas de coquería							19,01	4,540	
Gas de alto horno							2,89	690	
Biogases en general							21,77	5,200	
Biogás pobre							15,51	3,705	
Biogás de vertedero							20	4,775	
Biogás de depuradora							26	6,327	
Carbones	Antracita eléctrica	19,23	5,34	4,594	0,4594				
	Antracita industrial	24,40	6,78	5,829	0,5829				
	Antracita otros sectores de consumo final	26,10	7,25	6,235	0,6235				
	Hulla eléctrica	22,60	6,28	5,399	0,5399				
	Hulla coquizable	29,55	8,21	7,059	0,7059				
	Hulla altos hornos	26,20	7,28	6,259	0,6259				
	Hulla industrial	24,10	6,69	5,757	0,5757				
	Hulla otros sectores de consumo final	26,86	7,46	6,417	0,6417				
	Carbón subbituminoso	13,37	3,71	3,194	0,3194				
	Lignito	13,34	3,71	3,195	0,3195				
	Coque de coquería	26,80	3,71	3,195	0,3195				
	Alquitrán de hulla	38,00	3,71	3,195	0,3195				
	Biomasa	Biomasa en general	14,12	3,92	3,382	0,3382			
		Leña y ramas	15,87	4,41	3,800	0,3800			
Leñas tallares		10,44	2,90	2,500	0,2500				
Leñas de podas		10,44	2,90	2,500	0,2500				
Leñas de olivos y cultivos agrícolas		10,44	2,90	2,500	0,2500				
Serrines y virutas		15,79	4,38	3,780	0,3780				
Cortezas		15,24	4,23	3,650	0,3650				
Astilla de pino triturada (Humedad <20%)		15,07	4,19	3,608	0,3608				
Residuos de poda		15,66	4,35	3,750	0,3750				
Otros reiduos forestales		13,82	3,84	3,310	0,3310				
Biomasa de la industria forestal		14,60	4,06	3,497	0,3497				
Biomasa agrícola		12,53	3,48	3,000	0,3000				
Sarmientos de vid		13,70	3,80	3,280	0,3280				
Ramilla de uva		12,32	3,42	2,950	0,2950				
Hueso de aceituna		16,12	4,48	3,860	0,3860				
Orujillo		15,79	4,38	3,780	0,3780				
Orujo de uva		13,53	3,76	3,240	0,3240				
Cáscara de frutos secos		15,49	4,30	3,710	0,3710				
Cáscara de cereales		13,15	3,65	3,150	0,3150				
Cáscara de almendra (Humedad <20%)		15,90	4,42	3,808	0,3808				
Paja de cereales		13,20	3,67	3,160	0,3160				
Zuro de maíz (Humedad <25%)		16,24	4,51	3,888	0,3888				
Otros residuos agrícolas		13,82	3,84	3,310	0,3310				
Poso de café		27,14	7,54	6,500	0,6500				
Marro de café		25,06	6,96	6,000	0,6000				
Residuo molinda de café		8,14	2,26	1,950	0,1950				
Pellets en general		16,45	4,57	3,940	0,3940				
Pellet de madera (Humedad <15%)		18,04	5,01	4,319	0,4319				
Carbón vegetal		15,87	4,41	3,800	0,3800				
Biocombustibles		Bioetanol	26,93	7,48	6,449	0,6449	0,5016		
		Biodiesel	36,90	10,25	8,837	0,8837	0,7882		

Anexo 11

Prueba 1			Prueba 2		
Velocidad Turbina	Flujo	Tiempo de Operación	Velocidad Turbina	Flujo	Tiempo de Operación
(RPM)	kg/h	min	(RPM)	kg/h	min
3105.91	26.210	0.233	3100.00	25.907	0.200
2857.54	24.584	0.517	2851.63	24.281	0.484
2486.25	20.093	0.733	2480.34	19.790	0.700
1910.94	18.386	1.033	1905.03	18.083	1.000
1388.85	13.656	1.333	1382.94	13.353	1.300
1013.13	11.761	1.633	1007.22	11.458	1.600
777.05	10.867	1.900	771.14	10.564	1.867
446.43	10.674	2.150	440.52	10.371	2.117
131.54	10.227	2.450	125.63	9.924	2.417
0.00	10.130	2.616	0.00	9.827	2.583
T. Amb	20.05		T. Amb	22.1	
T. Agua	19.5		T. Agua	20	
%H.R.	80		%H.R.	75	

Prueba 3			Prueba 4		
Velocidad Turbina	Flujo	Tiempo de Operación	Velocidad Turbina	Flujo	Tiempo de Operación
(RPM)	kg/h	min	(RPM)	kg/h	min
3110.51	26.610	0.267	3102.50	25.956	0.217
2862.14	24.985	0.551	2854.13	24.330	0.501
2490.85	20.493	0.767	2482.84	19.839	0.717
1915.54	18.786	1.067	1907.53	18.132	1.017
1393.45	14.057	1.367	1385.44	13.402	1.317
1017.73	12.162	1.667	1009.72	11.507	1.617
781.65	11.267	1.934	773.64	10.613	1.884
451.03	11.074	2.184	443.02	10.420	2.134
136.14	10.627	2.484	128.13	9.973	2.434
0.00	10.531	2.650	0.00	9.876	2.600
T. Amb	21.71		T. Amb	20.08	
T. Agua	19.9		T. Agua	19	
%H.R.	75		%H.R.	76	

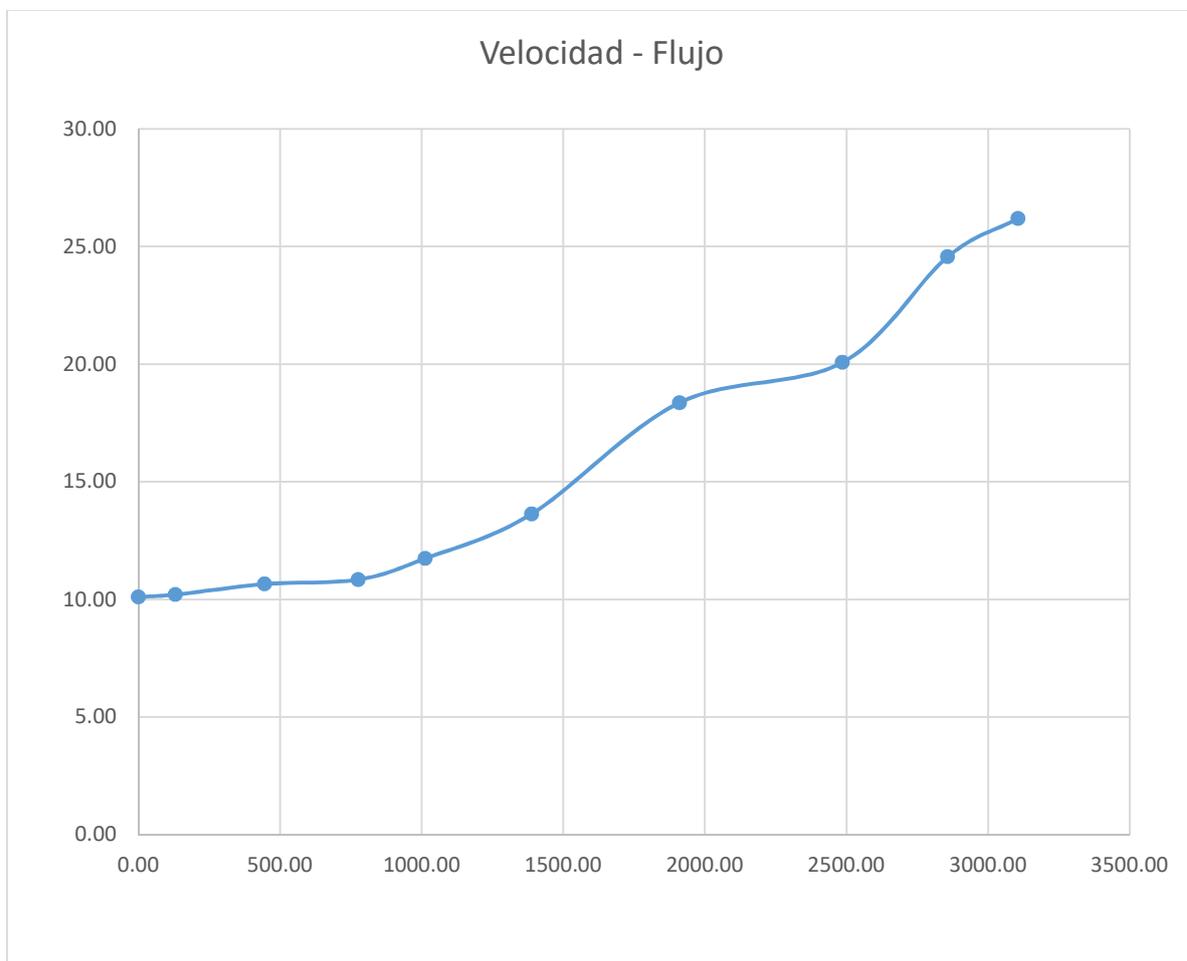
Prueba 5			Prueba 6		
Velocidad Turbina	Flujo	Tiempo de Operación	Velocidad Turbina	Flujo	Tiempo de Operación
(RPM)	kg/h	min	(RPM)	kg/h	min
3105.91	26.210	0.233	3100.00	25.907	0.200
2857.54	24.584	0.517	2851.63	24.281	0.484
2486.25	20.093	0.733	2480.34	19.790	0.700
1910.94	18.386	1.033	1905.03	18.083	1.000
1388.85	13.656	1.333	1382.94	13.353	1.300
1013.13	11.761	1.633	1007.22	11.458	1.600
777.05	10.867	1.900	771.14	10.564	1.867
446.43	10.674	2.150	440.52	10.371	2.117
131.54	10.227	2.450	125.63	9.924	2.417
0.00	10.130	2.616	0.00	9.827	2.583
T. Amb	19.55		T. Amb	21.51	
T. Agua	20.02		T. Agua	19.5	
%H.R.	71		%H.R.	77	

Prueba 7			Prueba 8		
Velocidad Turbina	Flujo	Tiempo de Operación	Velocidad Turbina	Flujo	Tiempo de Operación
(RPM)	kg/h	min	(RPM)	kg/h	min
3110.51	26.610	0.267	3102.50	25.956	0.217
2862.14	24.985	0.551	2854.13	24.330	0.501
2490.85	20.493	0.767	2482.84	19.839	0.717
1915.54	18.786	1.067	1907.53	18.132	1.017
1393.45	14.057	1.367	1385.44	13.402	1.317
1017.73	12.162	1.667	1009.72	11.507	1.617
781.65	11.267	1.934	773.64	10.613	1.884
451.03	11.074	2.184	443.02	10.420	2.134
136.14	10.627	2.484	128.13	9.973	2.434
0.00	10.531	2.650	0.00	9.876	2.600
T. Amb	20.66		T. Amb	22.17	
T. Agua	19.55		T. Agua	20.61	
%H.R.	76		%H.R.	80	

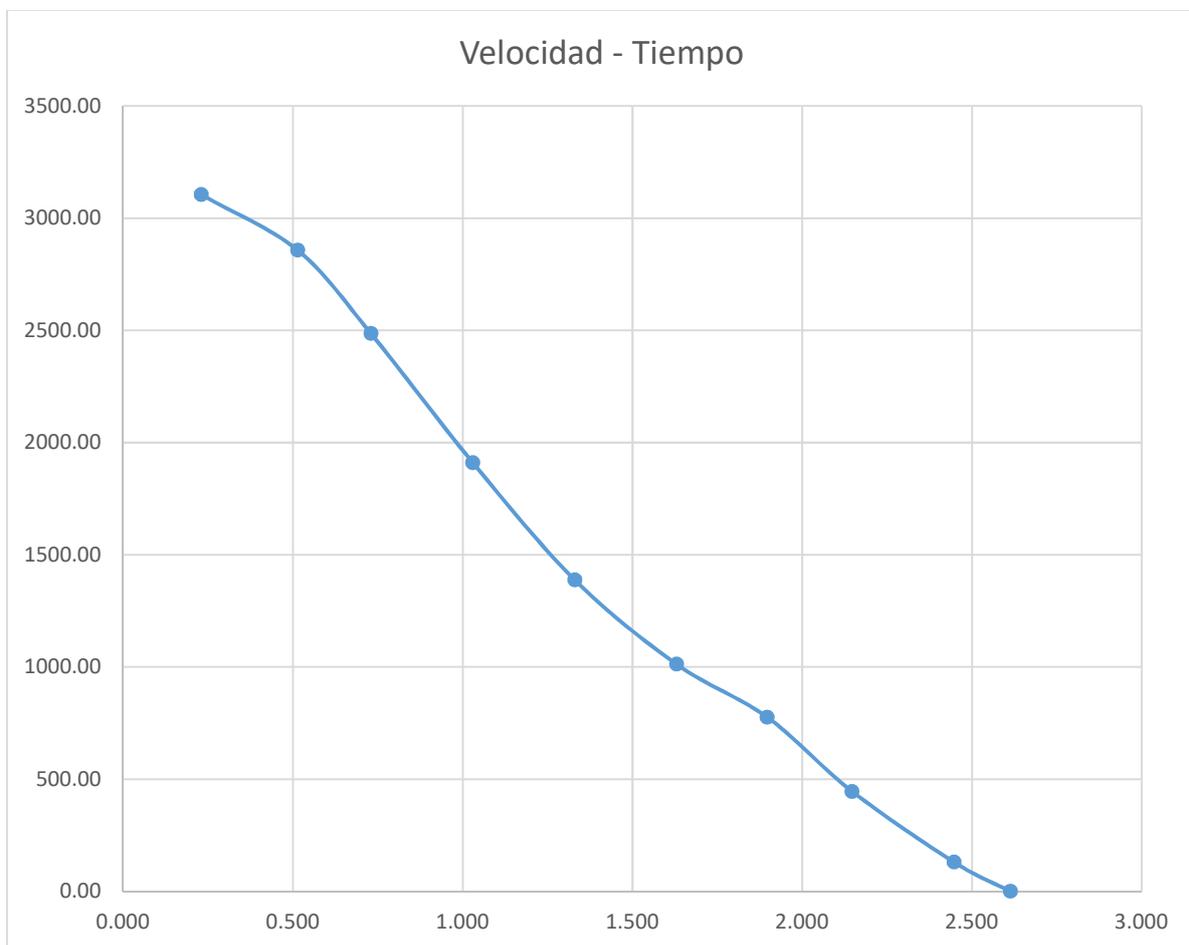
Prueba 9			Prueba 10		
Velocidad Turbina	Flujo	Tiempo de Operación	Velocidad Turbina	Flujo	Tiempo de Operación
(RPM)	kg/h	min	(RPM)	kg/h	min
3100.00	25.907	0.200	3110.51	26.610	0.267
2851.63	24.281	0.484	2862.14	24.985	0.551
2480.34	19.790	0.700	2490.85	20.493	0.767
1905.03	18.083	1.000	1915.54	18.786	1.067
1382.94	13.353	1.300	1393.45	14.057	1.367
1007.22	11.458	1.600	1017.73	12.162	1.667
771.14	10.564	1.867	781.65	11.267	1.934
440.52	10.371	2.117	451.03	11.074	2.184
125.63	9.924	2.417	136.14	10.627	2.484
0.00	9.827	2.583	0.00	10.531	2.650
T. Amb	22.17		T. Amb	21.02	
T. Agua	20.11		T. Agua	19.93	
%H.R.	78		%H.R.	81	

Promedio		
Velocidad Turbina	Flujo	Tiempo de Operación
(RPM)	kg/h	min
3104.84	26.19	0.230
2856.47	24.56	0.514
2485.18	20.07	0.730
1909.87	18.36	1.030
1387.78	13.63	1.330
1012.06	11.74	1.630
775.98	10.85	1.897
445.36	10.65	2.147
130.47	10.21	2.447
0.00	10.11	2.613

Anexo 12



Anexo 13



Anexo 14

Propiedades de gases a la presión de 1 atm (*conclusión*)

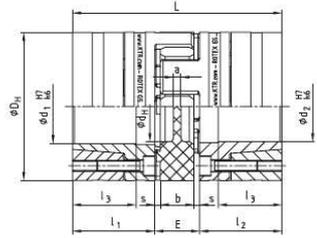
Temp., $T, ^\circ\text{C}$	Densidad, $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico, $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica, $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica, $\alpha, \text{m}^2/\text{s}^2$	Viscosidad dinámica, $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática, $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl, Pr
<i>Nitrógeno, N₂</i>							
-50	1.5299	957.3	0.02001	1.366×10^{-5}	1.390×10^{-5}	9.091×10^{-6}	0.6655
0	1.2498	1 035	0.02384	1.843×10^{-5}	1.640×10^{-5}	1.312×10^{-5}	0.7121
50	1.0564	1 042	0.02746	2.494×10^{-5}	1.874×10^{-5}	1.774×10^{-5}	0.7114
100	0.9149	1 041	0.03090	3.244×10^{-5}	2.094×10^{-5}	2.289×10^{-5}	0.7056
150	0.8068	1 043	0.03416	4.058×10^{-5}	2.300×10^{-5}	2.851×10^{-5}	0.7025
200	0.7215	1 050	0.03727	4.921×10^{-5}	2.494×10^{-5}	3.457×10^{-5}	0.7025
300	0.5956	1 070	0.04309	6.758×10^{-5}	2.849×10^{-5}	4.783×10^{-5}	0.7078
400	0.5072	1 095	0.04848	8.727×10^{-5}	3.166×10^{-5}	6.242×10^{-5}	0.7153
500	0.4416	1 120	0.05358	1.083×10^{-4}	3.451×10^{-5}	7.816×10^{-5}	0.7215
1 000	0.2681	1 213	0.07938	2.440×10^{-4}	4.594×10^{-5}	1.713×10^{-4}	0.7022
1 500	0.1925	1 266	0.11793	4.839×10^{-4}	5.562×10^{-5}	2.889×10^{-4}	0.5969
2 000	0.1502	1 297	0.18590	9.543×10^{-4}	6.426×10^{-5}	4.278×10^{-4}	0.4483
<i>Oxígeno, O₂</i>							
-50	1.7475	984.4	0.02067	1.201×10^{-5}	1.616×10^{-5}	9.246×10^{-6}	0.7694
0	1.4277	928.7	0.02472	1.865×10^{-5}	1.916×10^{-5}	1.342×10^{-5}	0.7198
50	1.2068	921.7	0.02867	2.577×10^{-5}	2.194×10^{-5}	1.818×10^{-5}	0.7053
100	1.0451	931.8	0.03254	3.342×10^{-5}	2.451×10^{-5}	2.346×10^{-5}	0.7019
150	0.9216	947.6	0.03637	4.164×10^{-5}	2.694×10^{-5}	2.923×10^{-5}	0.7019
200	0.8242	964.7	0.04014	5.048×10^{-5}	2.923×10^{-5}	3.546×10^{-5}	0.7025
300	0.6804	997.1	0.04751	7.003×10^{-5}	3.350×10^{-5}	4.923×10^{-5}	0.7030
400	0.5793	1 025	0.05463	9.204×10^{-5}	3.744×10^{-5}	6.463×10^{-5}	0.7023
500	0.5044	1 048	0.06148	1.163×10^{-4}	4.114×10^{-5}	8.156×10^{-5}	0.7010
1 000	0.3063	1 121	0.09198	2.678×10^{-4}	5.732×10^{-5}	1.871×10^{-4}	0.6986
1 500	0.2199	1 165	0.11901	4.643×10^{-4}	7.133×10^{-5}	3.243×10^{-4}	0.6985
2 000	0.1716	1 201	0.14705	7.139×10^{-4}	8.417×10^{-5}	4.907×10^{-4}	0.6873
<i>Vapor de agua, H₂O</i>							
-50	0.9839	1 892	0.01353	7.271×10^{-6}	7.187×10^{-6}	7.305×10^{-6}	1.0047
0	0.8038	1 874	0.01673	1.110×10^{-5}	8.956×10^{-6}	1.114×10^{-5}	1.0033
50	0.6794	1 874	0.02032	1.596×10^{-5}	1.078×10^{-5}	1.587×10^{-5}	0.9944
100	0.5884	1 887	0.02429	2.187×10^{-5}	1.265×10^{-5}	2.150×10^{-5}	0.9830
150	0.5189	1 908	0.02861	2.890×10^{-5}	1.456×10^{-5}	2.806×10^{-5}	0.9712
200	0.4640	1 935	0.03326	3.705×10^{-5}	1.650×10^{-5}	3.556×10^{-5}	0.9599
300	0.3831	1 997	0.04345	5.680×10^{-5}	2.045×10^{-5}	5.340×10^{-5}	0.9401
400	0.3262	2 066	0.05467	8.114×10^{-5}	2.446×10^{-5}	7.498×10^{-5}	0.9240
500	0.2840	2 137	0.06677	1.100×10^{-4}	2.847×10^{-5}	1.002×10^{-4}	0.9108
1 000	0.1725	2 471	0.13623	3.196×10^{-4}	4.762×10^{-5}	2.761×10^{-4}	0.8639
1 500	0.1238	2 736	0.21301	6.288×10^{-4}	6.411×10^{-5}	5.177×10^{-4}	0.8233
2 000	0.0966	2 928	0.29183	1.032×10^{-3}	7.808×10^{-5}	8.084×10^{-4}	0.7833

Nota: Para los gases ideales, las propiedades c_p , k , μ y Pr son independientes de la presión. Las propiedades ρ , ν y α a una presión P (en atm) diferente de 1 atm se determinan al multiplicar los valores de ρ , a la temperatura dada, por P y al dividir ν y α entre P .

Fuente: Datos generados basándose en el software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Originalmente basados en varias fuentes.

Anexo 15

ROTEX® GS Mangones light de fijación cónica



Rosca M1 entre tornillos de apriete

- Acoplamiento elástico sin juego con sistema de fijación cónica integrado
- Velocidades periféricas de hasta 50 m/s
- Material: Aluminio. Opcional mixto o acero
- Posibilidad tipo GS-P de precisión, según DIN 69002
- Ideal para máquina-herramienta, robótica, etc.

Material del mangón - Aluminio (Al-H) / Material del anillo de fijación - Aluminio (Al-H)

Tamaño	Par [Nm] ¹⁾				Dimensiones (mm)								Tornillos de apriete				Peso de cada mangón con máx. agujero [kg]	Momento de inercia por mangón con máx. agujero - Ø [kgm²]	
	92 Sh-A		98 Sh-A		D _H ²⁾	d _H	L	l ₁ ; l ₂	l ₃	E	b	s	a	M	Número z	T _A [Nm]			M ₁
	T _{KN}	T _{Kmax}	T _{KN}	T _{Kmax}															
14	7,5	15	12,5	25	30	10,5	50	18,5	13,5	13	10	1,5	2,0	M3	4	1,34	M3	0,032	0,04 x 10 ⁻⁴
19	10	20	17	34	40	18	66	25	18	16	12	2,0	3,0	M4	6	3	M4	0,077	0,19 x 10 ⁻⁴
24	35	70	60	120	55	27	78	30	22	18	14	2,0	3,0	M5	4	6	M5	0,162	0,78 x 10 ⁻⁴
28	95	190	160	320	65	30	90	35	27	20	15	2,5	4,0	M5	8	6	M5	0,240	1,70 x 10 ⁻⁴
38	190	380	325	650	80	38	114	45	35	24	18	3,0	4,0	M6	8	10	M6	0,490	5,17 x 10 ⁻⁴
42	265	530	450	900	95	46	126	50	35	26	20	3,0	4,0	M8	4	25	M8	0,772	11,17 x 10 ⁻⁴
48	310	620	525	1050	105	51	140	56	41	28	21	3,5	4,0	M10	4	49	M10	1,066	18,81 x 10 ⁻⁴

Agujero d₁/d₂ y los correspondientes pares de fricción transmisibles T_r para el mangón de fijación cónica

Tamaño	Ø6	Ø10	Ø11	Ø14	Ø15	Ø16	Ø19	Ø20	Ø24	Ø25	Ø28	Ø30	Ø32	Ø35	Ø38	Ø40	Ø42	Ø45	Ø48	Ø50	Ø55
14	5,4	7,5	11,3	24,7																	
19		17	20	41	49	36	56	64													
24				47	57	67	98	110	127	139	175										
28							121	133	201	219	248	285	253	307	329						
38								203	304	331	394	452	453	543	550	609	669	634			
42											444	508	535	638	692	763	754	858	964	976	
48												572	638	762	842	929	943	1074	1208	1136	1336

¹⁾ Existen estrellas de 80° Sh-A, 64° Sh-D y 72° Sh-D. Puede hallar más información en nuestro catálogo de empresa.

²⁾ ØD_H + 2mm a altas velocidades para permitir la expansión de la estrella

Los pares transmisibles de las conexiones de fijación contemplan el máximo juego con ajuste de eje k6/agujero H7. Ante un mayor juego, el par se reduce. Como material del eje puede utilizarse acero o fundición nodular con un límite de elasticidad aprox. de 250 N/mm². Para el cálculo de la rigidez eje/eje hueco ver KTR estándar 45510 en www.aguirrezabal.com

Anexo 16



HOJA TÉCNICA F40 650W

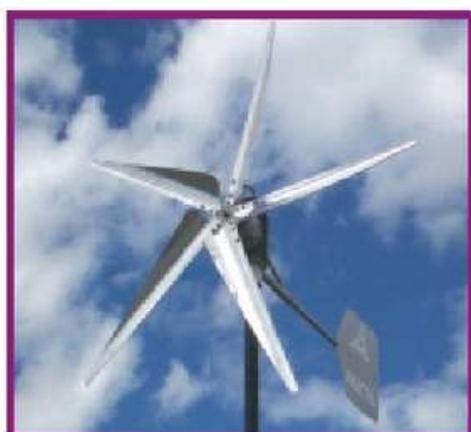


Foto actual de aparato



Curva de Potencia

ROTOR	
NUMERO DE ASPAS	5 PIEZAS
DIAMETRO	1.50 m.
MATERIAL ASPAS	ALUMINIO 6061 DUREZA H14
MATERIAL HUB Y TORNILLOS	ACERO INOXIDABLE

SISTEMA ELECTRICO	
TIPO DE ALTERNADOR	TRIFASICO IMANES PERMANENTES
TIPO IMANES	NEODIMIO N42
POTENCIA NOMINAL	650W
VOLTAJE	12V / 24V

FUNCIONAMIENTO	
INICIA GIRO	11 KM/H
POTENCIA NOMINAL	45 KM/H
SOporta VIENTOS DE HASTA	120 KM/H
BASE PARA COLOCAR EN TUBO	1 1/2" NEGRO CEDULA 40

- PRODUCCION PROMEDIO DE 50V CON 13A A 675 RPM
- PRODUCCIÓN MÁXIMA DE 900W
- PARA CARGAR BATERÍAS EN BANCOS DE 12V, 24V.
- TRABAJA BAJO LA LLUVIA, CON NIEVE Y TORMENTAS ELÉCTRICAS.
- CONSTRUIDO CON BALEROS DE ALTA CALIDAD, PARA 25 AÑOS DE USO
- INCLUYE RECTIFICADOR DE CORRIENTE CON CAPACIDAD DE 75A.
- SLIP RING, DESTORCEDOR DE CABLE 3 HILOS CON CAPACIDAD DE 25A CADA UNO.
- 3 AÑOS DE GARANTÍA EN PIEZAS MECÁNICAS
- 1 AÑO DE GARANTÍA EN ELECTRÓNICO.

Anexo 17



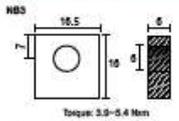
Features

- Absorbent Glass Mat (AGM) technology for superior performance
- Valve regulated, spill proof construction allows safe operation in any position
- Power/volume ratio yielding unrivaled energy density
- Rugged impact resistant ABS case and cover (UL94-HB)
- Integrated ABS carrying handles for ease of movement
- Approved for transport by air. D.O.T., I.A.T.A., F.A.A. and C.A.B. certified
- U.L. recognized under file number MH 20845

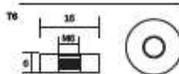
Terminals

(mm)

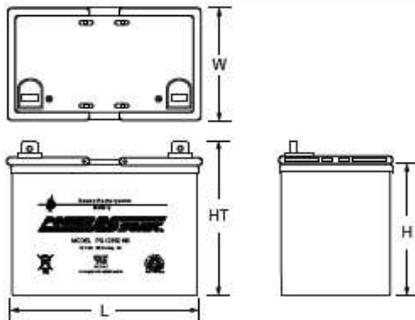
- NB3: Heavy duty terminal posts with nut and bolt fasteners



- TG: Threaded insert w. 6 mm stud fastener



Physical Dimensions: in (mm)



L: 7.72 (196) W: 5.14 (131) H: 6.22 (158) HT: 7.00 (176)

Tolerances are +/- 0.04 in. (+/- 1mm) and +/- 0.08 in. (+/- 2mm) for height dimensions. All data subject to change without notice.

Performance Specifications

Nominal Voltage 12 volts (6 cells)

Nominal Capacity

20-hr. (1.75A to 10.50 volts)	35.0 AH
10-hr. (3.3A to 10.50 volts)	33.0 AH
5-hr. (6.2A to 10.20 volts)	31.0 AH
1-hr. (25A to 9.00 volts)	25.0 AH
15-min. (70A to 9.00 volts)	17.5 AH

Approximate Weight 24.70 lbs. (11.20 kg)

Energy Density (20-hr. rate) 1.70 W-h/in³ (103.84 W-h/l)

Specific Energy (20-hr. rate) 17.00 W-h/lb (37.49 W-h/kg)

Internal Resistance (approx.) 8 milliohms

Max Discharge Current (7 Min.) 105.0 amperes

Max Short-Duration Discharge Current (10 Sec.) 350.0 amperes

Shelf Life (% of nominal capacity at 68 °F (20 °C))

1 Month	97%
3 Months	91%
6 Months	83%

Operating Temperature Range

Charge	-4 °F (-20 °C) to 122 °F (50 °C)
Discharge	-40 °F (-40 °C) to 140 °F (60 °C)

Case ABS Plastic

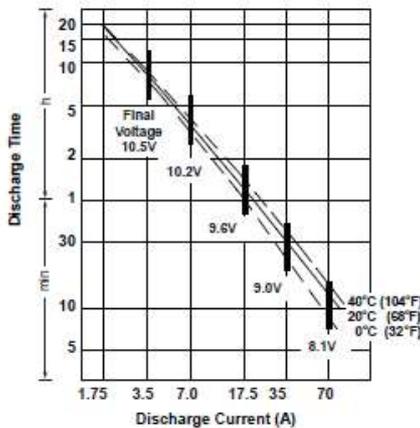
Power-Sonic Chargers PSC-124000A, 124000A-C

To ensure safe and efficient operation always refer to the latest edition of our Technical Manual, as published on our website. All data subject to change without notice.

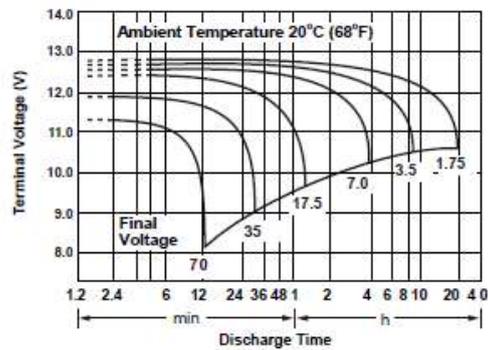
www.power-sonic.com

Constant Power Discharge Ratings								
MODEL	FINAL VOLTAGE	WATTS PER CELL @ 25° C						
		5 MIN	10 MIN	15 MIN	20 MIN	30 MIN	45 MIN	60 MIN
PS-12350	1.75	245	170	133	108	80	60	45
	1.70	251	174	136	110	82	61	47
	1.67	258	176	139	113	83	62	48

Discharge Time vs. Discharge Current



Discharge Characteristics



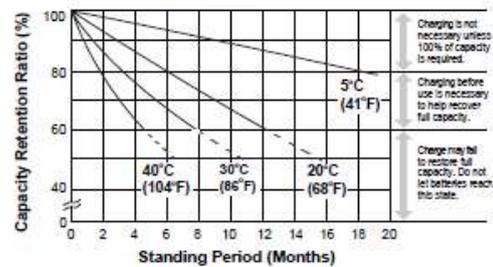
Charging

Cycle Applications: Limit initial current to 10.5A. Charge until battery voltage (under charge) reaches 14.4 to 14.7 volts at 68°F (20°C). Hold at 14.4 to 14.7 volts until current drops to under 350mA. Battery is fully charged under these conditions, and charger should be disconnected or switched to "float" voltage.

"Float" or "Stand-By" Service: Hold battery across constant voltage source of 13.5 to 13.8 volts continuously. When held at this voltage, the battery will seek its own current level and maintain itself in a fully charged condition.

Note: Due to the self-discharge characteristics of this type of battery, it is imperative that they be charged within 6 months of storage, otherwise permanent loss of capacity might occur as a result of sulfation.

Shelf Life & Storage



Chargers

Power-Sonic offers a wide range of chargers suitable for batteries up to 100AH. Please refer to the Charger Selection Guide in our specification sheets for "C-Series Switch Mode Chargers" and "Transformer Type A and F Series". Please contact our Technical department for advice if you have difficulty in locating suitable models.

Further Information

Please refer to our website www.power-sonic.com for a complete range of useful downloads, such as product catalogs, material safety data sheets (MSDS), ISO certification, etc..

Contact Information

			www.power-sonic.com
DOMESTIC SALES Tel: +1-619-661-2020 Fax: +1-619-661-3850 national-sales@powersonic.com	CUSTOMER SERVICE Tel: +1-619-661-2030 Fax: +1-619-661-3648 customerservice@powersonic.com	TECHNICAL SUPPORT Tel: +1-619-661-2020 Fax: +1-619-661-3648 support@power-sonic.com	INTERNATIONAL SALES Tel: +1-850-364-5001 Fax: +1-850-366-3662 international-sales@power-sonic.com
CORPORATE OFFICE • 7550 Panasonic Way • San Diego, CA 92154 • USA • Tel: +1-619-661-2020 • Fax: +1-619-661-3850			

© 2012, Power-Sonic Corporation. All rights reserved. All trademarks are the property of their respective owners.

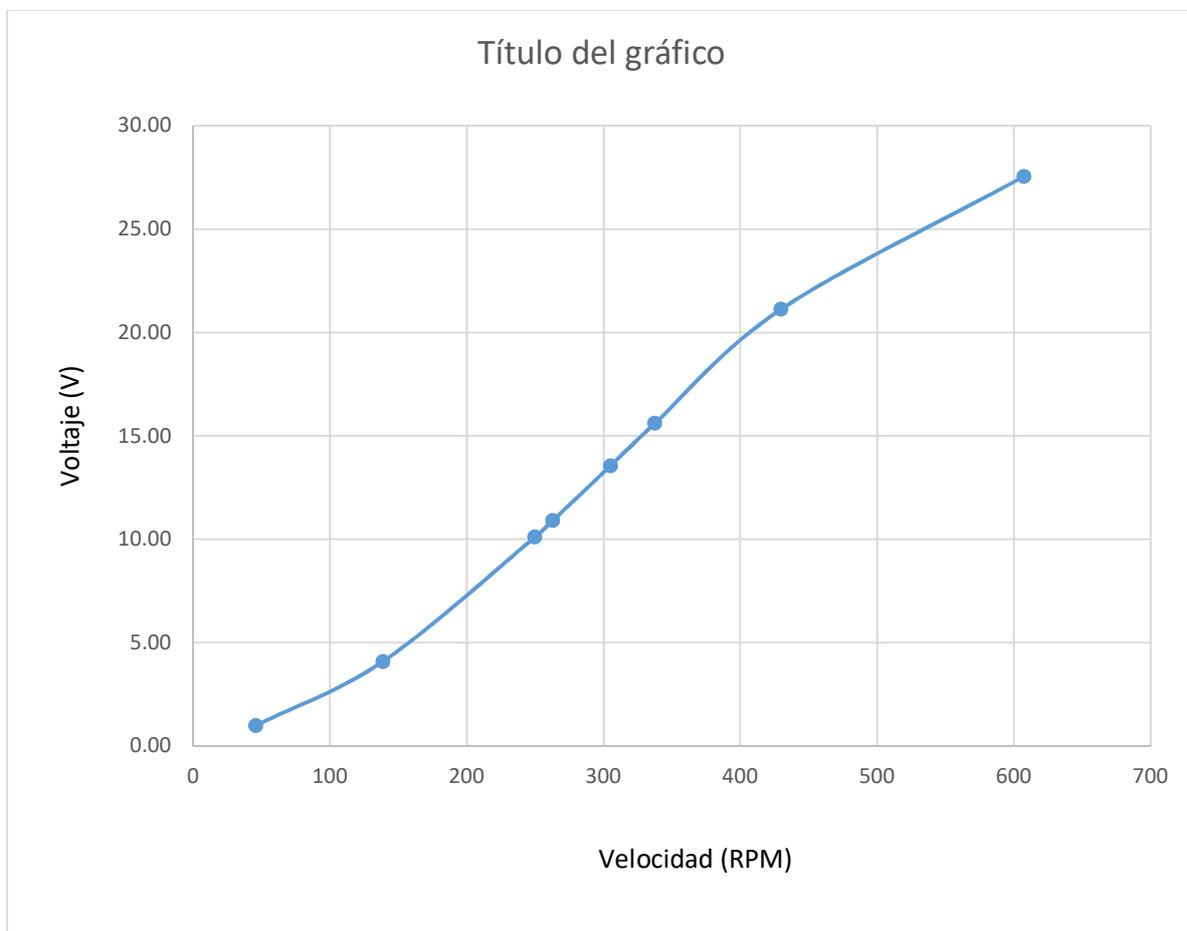
Anexo 18

Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Prueba 4	
Velocidad	Voltaje	Velocidad	Voltaje	Velocidad	Voltaje	Velocidad	Voltaje
RPM	V _{DC}						
608.8	27.56	605.3	27.52	609.5	27.57	609.1	27.56
431.1	21.20	427.6	21.00	431.8	21.24	431.4	21.21
338.9	15.69	335.4	15.47	339.6	15.73	339.2	15.71
306.4	13.64	302.9	13.42	307.1	13.68	306.7	13.66
264.1	10.98	260.6	10.77	264.8	11.03	264.4	11.00
251.1	10.19	247.6	9.97	251.8	10.23	251.4	10.20
140	4.15	136.5	3.99	140.7	4.18	140.3	4.16
47.1	1.02	43.6	0.95	47.8	1.03	47.4	1.03
Temp. Amb	21.51	Temp. Amb	20.63	Temp. Amb	21.52	Temp. Amb	20.41
Temp. Agua	20.12	Temp. Agua	20.05	Temp. Agua	19.81	Temp. Agua	20.03
%H.R.	70	%H.R.	75	%H.R.	78	%H.R.	76

Prueba 5		Prueba 6		Prueba 7		Prueba 8	
Velocidad	Voltaje	Velocidad	Voltaje	Velocidad	Voltaje	Velocidad	Voltaje
RPM	V _{DC}						
605.9	27.53	607.5	27.54	606.2	27.53	609.8	27.57
428.2	21.04	429.8	21.13	428.5	21.05	432.1	21.25
336	15.51	337.6	15.61	336.3	15.53	339.9	15.75
303.5	13.45	305.1	13.56	303.8	13.47	307.4	13.70
261.2	10.80	262.8	10.90	261.5	10.82	265.1	11.05
248.2	10.01	249.8	10.11	248.5	10.03	252.1	10.25
137.1	4.02	138.7	4.09	137.4	4.03	141	4.20
44.2	0.96	45.8	0.99	44.5	0.97	48.1	1.04
Temp. Amb	19.55	Temp. Amb	21.51	Temp. Amb	21.03	Temp. Amb	20.36
Temp. Agua	19.02	Temp. Agua	19.55	Temp. Agua	21.51	Temp. Agua	20.16
%H.R.	80	%H.R.	83	%H.R.	76	%H.R.	81

Prueba 9		Prueba 10		Promedio	
Velocidad	Voltaje	Velocidad	Voltaje	Velocidad	Voltaje
RPM	V _{DC}	RPM	V _{DC}	RPM	V _{DC}
605.3	27.52	606.9	27.54	607.43	27.54
427.6	21.00	429.2	21.09	429.73	21.12
335.4	15.47	337	15.57	337.53	15.60
302.9	13.42	304.5	13.52	305.03	13.55
260.6	10.77	262.2	10.87	262.73	10.90
247.6	9.97	249.2	10.07	249.73	10.10
136.5	3.99	138.1	4.07	138.63	4.09
43.6	0.95	45.2	0.98	45.73	0.99
Temp. Amb	22.17	Temp. Amb	20.18	Temp. Amb	20.887
Temp. Agua	20.11	Temp. Agua	19.39	Temp. Agua	19.975
%H.R.	79	%H.R.	78	%H.R.	77.6

Anexo 19



Anexo 20

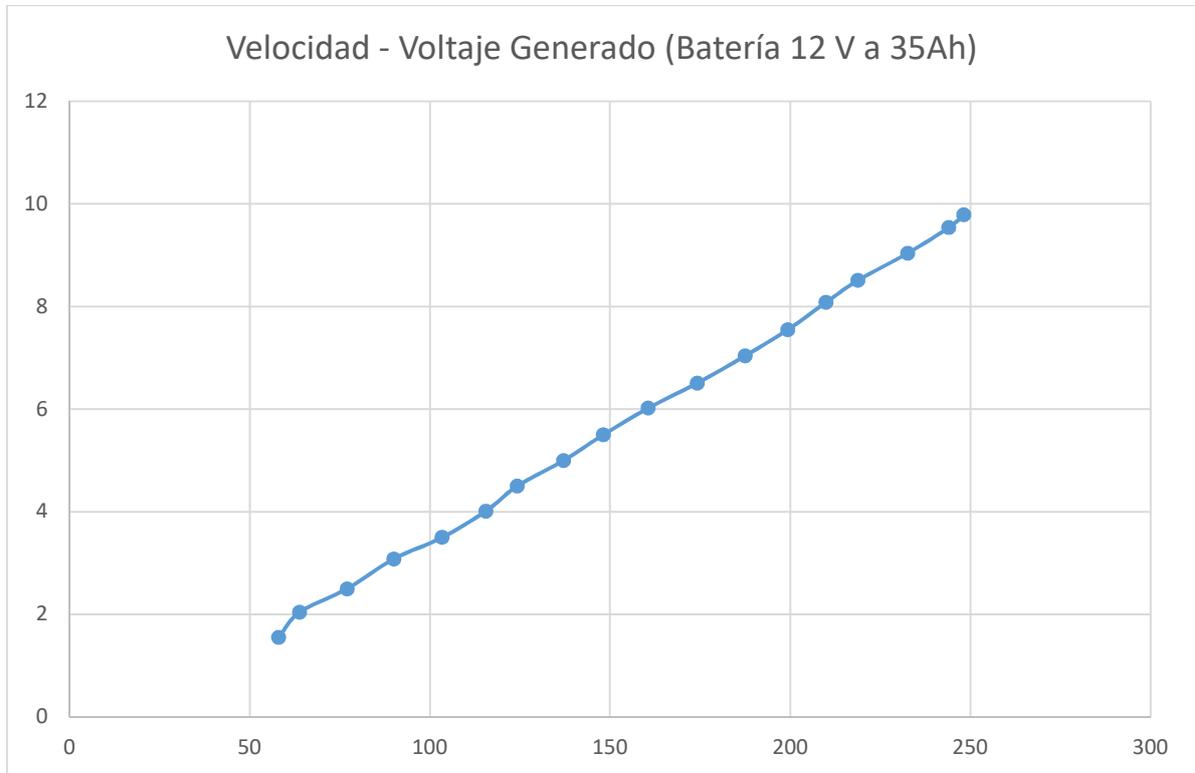
Prueba1			Prueba2			Prueba3		
Voltaje	Velocidad	Flujo	Voltaje	Velocidad	Flujo	Voltaje	Velocidad	Flujo
(V)	(RPM)	(Kg/h)	(V)	(RPM)	(Kg/h)	(V)	(RPM)	(Kg/h)
9.79	248.2	37.9497	9.89	250.1	37.9497	9.87	249.6	37.9497
9.54	244	37.6398	9.71	245.9	37.6398	9.69	245.4	37.6398
9.04	232.6	36.8401	9.22	234.5	36.8401	9.19	234	36.8401
8.51	218.8	35.9524	8.62	220.7	35.9524	8.59	220.2	35.9524
8.08	209.9	35.4251	8.23	211.8	35.4251	8.21	211.3	35.4251
7.55	199.3	34.8418	7.77	201.2	34.8418	7.74	200.7	34.8418
7.04	187.5	34.2470	7.25	189.4	34.2470	7.23	188.9	34.2470
6.51	174.2	33.6411	6.67	176.1	33.6411	6.65	175.6	33.6411
6.02	160.6	33.0867	6.08	162.5	33.0867	6.06	162	33.0867
5.5	148.1	32.6298	5.55	150	32.6298	5.53	149.5	32.6298
5	137.1	32.2651	5.08	139	32.2651	5.06	138.5	32.2651
4.5	124.2	31.8770	4.54	126.1	31.8770	4.52	125.6	31.8770
4.01	115.5	31.6366	4.18	117.4	31.6366	4.16	116.9	31.6366
3.5	103.4	31.3273	3.69	105.3	31.3273	3.67	104.8	31.3273
3.08	90	31.0138	3.16	91.9	31.0138	3.14	91.4	31.0138
2.5	77	30.7338	2.65	78.9	30.7338	2.64	78.4	30.7338
2.04	63.8	30.4691	2.16	65.7	30.4691	2.14	65.2	30.4691
1.55	58	30.3580	1.95	59.9	30.3580	1.93	59.4	30.3580
T. Amb	20.05		T. Amb	22.1		T. Amb	21.71	
T. Agua	19.5		T. Agua	20		T. Agua	19.9	
%H.R.	80		%H.R.	75		%H.R.	75	

Prueba4			Prueba5			Prueba6		
Voltaje	Velocidad	Flujo	Voltaje	Velocidad	Flujo	Voltaje	Velocidad	Flujo
(V)	(RPM)	(Kg/h)	(V)	(RPM)	(Kg/h)	(V)	(RPM)	(Kg/h)
9.83	248.7	37.9497	9.80	248.1	37.9497	9.87	249.7	37.9497
9.65	244.5	37.6398	9.62	243.9	37.6398	9.69	245.5	37.6398
9.16	233.1	36.8401	9.13	232.5	36.8401	9.20	234.1	36.8401
8.56	219.3	35.9524	8.53	218.7	35.9524	8.60	220.3	35.9524
8.17	210.4	35.4251	8.14	209.8	35.4251	8.21	211.4	35.4251
7.70	199.8	34.8418	7.68	199.2	34.8418	7.75	200.8	34.8418
7.19	188	34.2470	7.16	187.4	34.2470	7.23	189	34.2470
6.61	174.7	33.6411	6.58	174.1	33.6411	6.65	175.7	33.6411
6.02	161.1	33.0867	6.00	160.5	33.0867	6.07	162.1	33.0867
5.49	148.6	32.6298	5.46	148	32.6298	5.53	149.6	32.6298
5.02	137.6	32.2651	5.00	137	32.2651	5.06	138.6	32.2651
4.48	124.7	31.8770	4.46	124.1	31.8770	4.52	125.7	31.8770
4.12	116	31.6366	4.10	115.4	31.6366	4.17	117	31.6366
3.63	103.9	31.3273	3.61	103.3	31.3273	3.67	104.9	31.3273
3.10	90.5	31.0138	3.08	89.9	31.0138	3.14	91.5	31.0138
2.60	77.5	30.7338	2.58	76.9	30.7338	2.64	78.5	30.7338
2.11	64.3	30.4691	2.09	63.7	30.4691	2.14	65.3	30.4691
1.90	58.5	30.3580	1.87	57.9	30.3580	1.93	59.5	30.3580
T. Amb	20.08		T. Amb	19.55		T. Amb	21.51	
T. Agua	19		T. Agua	20.02		T. Agua	19.5	
%H.R.	76		%H.R.	71		%H.R.	77	

Prueba7			Prueba8			Prueba9		
Voltaje	Velocidad	Flujo	Voltaje	Velocidad	Flujo	Voltaje	Velocidad	Flujo
(V)	(RPM)	(Kg/h)	(V)	(RPM)	(Kg/h)	(V)	(RPM)	(Kg/h)
9.90	250.3	37.9497	9.87	249.6	37.9497	9.82	248.4	37.9497
9.72	246.1	37.6398	9.69	245.4	37.6398	9.64	244.2	37.6398
9.23	234.7	36.8401	9.19	234	36.8401	9.14	232.8	36.8401
8.63	220.9	35.9524	8.59	220.2	35.9524	8.54	219	35.9524
8.24	212	35.4251	8.21	211.3	35.4251	8.15	210.1	35.4251
7.77	201.4	34.8418	7.74	200.7	34.8418	7.69	199.5	34.8418
7.26	189.6	34.2470	7.23	188.9	34.2470	7.18	187.7	34.2470
6.68	176.3	33.6411	6.65	175.6	33.6411	6.60	174.4	33.6411
6.09	162.7	33.0867	6.06	162	33.0867	6.01	160.8	33.0867
5.56	150.2	32.6298	5.53	149.5	32.6298	5.48	148.3	32.6298
5.09	139.2	32.2651	5.06	138.5	32.2651	5.01	137.3	32.2651
4.55	126.3	31.8770	4.52	125.6	31.8770	4.47	124.4	31.8770
4.19	117.6	31.6366	4.16	116.9	31.6366	4.11	115.7	31.6366
3.70	105.5	31.3273	3.67	104.8	31.3273	3.62	103.6	31.3273
3.17	92.1	31.0138	3.14	91.4	31.0138	3.09	90.2	31.0138
2.66	79.1	30.7338	2.64	78.4	30.7338	2.59	77.2	30.7338
2.17	65.9	30.4691	2.14	65.2	30.4691	2.10	64	30.4691
1.95	60.1	30.3580	1.93	59.4	30.3580	1.89	58.2	30.3580
T. Amb	20.66		T. Amb	22.17		T. Amb	22.17	
T. Agua	19.55		T. Agua	20.61		T. Agua	20.11	
%H.R.	76		%H.R.	80		%H.R.	78	

Prueba10			Promedio		
Voltaje	Velocidad	Flujo	Voltaje	Velocidad	Flujo
(V)	(RPM)	(Kg/h)	(V)	(RPM)	(Kg/h)
9.89	250.1	37.9497	9.85	249.28	37.9497
9.71	245.9	37.6398	9.67	245.08	37.6398
9.22	234.5	36.8401	9.17	233.68	36.8401
8.62	220.7	35.9524	8.58	219.88	35.9524
8.23	211.8	35.4251	8.19	210.98	35.4251
7.77	201.2	34.8418	7.72	200.38	34.8418
7.25	189.4	34.2470	7.20	188.58	34.2470
6.67	176.1	33.6411	6.63	175.28	33.6411
6.08	162.5	33.0867	6.05	161.68	33.0867
5.55	150	32.6298	5.52	149.18	32.6298
5.08	139	32.2651	5.05	138.18	32.2651
4.54	126.1	31.8770	4.51	125.28	31.8770
4.18	117.4	31.6366	4.14	116.58	31.6366
3.69	105.3	31.3273	3.65	104.48	31.3273
3.16	91.9	31.0138	3.13	91.08	31.0138
2.65	78.9	30.7338	2.62	78.08	30.7338
2.16	65.7	30.4691	2.12	64.88	30.4691
1.95	59.9	30.3580	1.88	59.08	30.3580
T. Amb	21.02		T. Amb	21.102	
T. Agua	19.93		T. Agua	19.812	
%H.R.	81		%H.R.	76.9	

Anexo 21



Anexo 21

PRODUCT DESCRIPTION

An optical/contact tachometer for measuring speeds of rotating objects in RPM or for measuring surface speeds in metres per minute or feet per minute. High accuracy is achieved by combining CPU, photoelectrical and laser techniques. The ergonomic design makes the instrument comfortable to use.

- **Measurements:**

Optical: RPM non contact via supplied reflective tape

Contact: RPM via cone or funnel

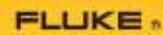
Contact: Ft/min or m/min via surface wheel

- Impact resistant ABS case
- Laser spot for easy identification of target (optical mode)
- 28mm LCD display with function indicators
- Recall of last measured value
- Min/Max memory updated automatically
- Interchangeable cone, funnel and surface wheel for contact measurements
- Sampling time of 0.8secs (over 60 RPM)
- Low battery indicator
- Battery powered or via AC/DC mains power adapter for continuous operation
- Supplied with battery, foam padded carry case and 700mm reflective tape
- Also includes contact adaptor & accessories kit– **(ADT-KIT1)** cone, funnel and surface wheel

TECHNICAL SPECIFICATION

Range	2.5 to 99,999 rpm (optical) 0.5 to 19,999 rpm (contact) 0.05 to 1,999.9 m/min 0.2 to 6,560 ft/min
Resolution	0.1 up to 999.9 rpm, 1 above 0.01 up to 100 m/min, 0.1 above 0.1 up to 1,000 ft/min, 1 above
Accuracy	±0.05%, ±1 digit
Power	4 x 1.5V AA Alkaline Batteries (ALR-6)
Dimensions	210 x 74 x 37mm
Weight	300g

DIGITAL MULTIMETERS



Fluke 170 Series Digital Multimeters

Maintenance experts can find most electrical and HVAC problems

The Fluke 170 Series True-rms Multimeters is simple to use with significant improvements over the original Fluke 70 Series.

- Wide 1000 V measurement range
- True-rms for precise measurement of non-linear signals
- Capacitance, resistance, continuity and frequency
- Built-in thermometer (Fluke 179 only)
- Backlight for work in dimly lit areas (Fluke 177 and 179 only)
- Min/Max/Avg to record signal fluctuations
- Display hold and auto hold
- Manual and automatic ranging
- Basic dc accuracy (179/0.09%, 177/0.09%, 175/0.15%)
- Also available: 177 with true-rms and backlight and 175 with true-rms

Specifications

DC voltage	800.0 mV, 8.000 V, 80.00 V, 800.0 V, 1000 V	± 0.09% (Models 177 and 179) ± 0.15% (Model 175)
AC voltage ¹	800.0 mV, 8.000 V, 80.00 V, 800.0 V, 1000 V	± 1.0% of reading
DC current	50.00 mA, 400.0 mA, 6.000 A, 10.00 A ²	± 1.0% of reading
AC current ²	60.00 mA, 400.0 mA, 6.000 A, 10.00 A ²	± 1.5% of reading
Resistance	600.0 Ω, 6.000 kΩ, 60.00 kΩ, 600.0 kΩ, 6.000 MΩ, 50.00 MΩ	± 0.9% of reading
Capacitance	1000 nF, 10.00 μF, 100.0 μF, 9999 μF	± 1.2% of reading
Frequency ³	99.99 Hz, 999.9 Hz, 9.999 kHz, 99.99 kHz	± 0.1% of reading
Temperature (179 only)	-40 °C to +400 °C (-40 °F to +752 °F)	1.0% of reading
Battery life	200 hours typical for alkaline	
Dimensions (HxWxD)	4.3 cm x 9.0 cm x 18.5 cm (1.7 in x 3.5 in x 7.3 in)	

¹All ac voltage and ac current ranges are specified from 5% of range to 100% of range.

²10 A continuous, 20 A for up to 30 seconds.

³Voltage frequency is specified from 2 Hz to 100 kHz. Current frequency is specified from 2 Hz to 30 kHz.

Ordering information

Models	Included accessories
FLUKE-179 Digital Multimeter	Test leads, temperature probe, 9 V battery (installed), manual
FLUKE-177 Digital Multimeter	Test leads, 9 V battery (installed), manual
FLUKE-175 Digital Multimeter	Test leads, 9 V battery (installed), manual



Kits—buy more, save more



179/EDA2 Electronics Multimeter and Deluxe Accessory Combo Kit

Recommended accessories



TLK-225 SureGrip® Master Accessory Set

C25 Meter Case



www.fluke.com/dmm