



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

UNIDAD PROFESIONAL ADOLFO LÓPEZ MATEOS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Cálculo económico de consumo eléctrico de un túnel de viento para calibrar instrumentos de velocidad del aire

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Electricista

PRESENTAN

Enrique Eugenio Castellanos

Roberto Franco González

Director técnico: M. en C. Rene Tolentino Eslava.

Director de estructura: M. en C. Juan Abugaber Francis.



México, D. F. Enero 2016

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELECTRICA
UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS”

TEMA DE TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRICISTA
POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN TESIS COLECTIVA Y EXAMEN ORAL INDIVIDUAL
DEBERA (N) DESARROLLAR C. FRANCO GONZALEZ ROBERTO
C. EUGENIO CASTELLANOS ENRIQUE

**“CÁLCULO ECONÓMICO DE CONSUMO ELECTRICO DE UN TUNEL DE VIENTO PARA
CALIBRAR INSTRUMENTOS DE VELOCIDAD DE AIRE”.**

CALCULAR EL COSTO ENERGÉTICO QUE DEMANDA EL TUNEL DE VIENTO DURANTE UN PROCESO DE CALIBRACIÓN.

- ❖ INTRODUCCIÓN.
- ❖ FUNCIONAMIENTO DE LA INSTALACIÓN.
- ❖ TEORÍA PARA EL CÁLCULO DE POTENCIA ELÉCTRICA.
- ❖ PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN.
- ❖ COSTO ENERGÉTICO DEMANDADO POR EL TUNEL DE VIENTO.
- ❖ CONCLUSIONES.

MÉXICO D. F., A 28 DE ENERO DE 2016.

ASESOR

M. EN C. RENE TOLENTINO ESLAVA

M. EN C. JUAN ABUGABER FRANCIS

ING. CESAR DAVID RAMÍREZ ORTIZ
JEFE DEL DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE
INGENIERÍA ELÉCTRICA

JEFATURA DE
INGENIERIA ELECTRICA

ÍNDICE

	Pág.
RESUMEN.	1
INTRODUCCIÓN.	2
CAPÍTULO 1: FUNCIONAMIENTO DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL	1
1.1. Túnel de Viento.	1
1.2. Motores Eléctricos.	4
1.3. Variador de Frecuencia.	14
CAPÍTULO 2: TEORIA PARA EL CÁLCULO DE POTENCIA ELECTRICA.	18
2.1. Cálculo de Potencia en Motores Eléctricos.	18
2.2. Consumo Eléctrico de un Motor Eléctrico.	20
2.3. Tarifas de CFE.	21
2.4. Consideraciones para la Tarifa H-M	26
CAPÍTULO 3: PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN.	29
3.1. Descripción del Túnel de Viento.	29
3.2. Instrumentación.	31
3.3. Mediciones Eléctricas.	36
CAPÍTULO 4: COSTO ENERGETICO DEMANDADO POR EL TUNEL DE VIENTO.	43
4.1. Costo energético por cada frecuencia.	43
4.2. Costo energético total de una prueba de calibración.	49
4.3. Análisis de resultados.	54
CONCLUSIONES	59
BIBLIOGRAFÍA	61
APENDICE.	62
Datos Experimentales.	62

RESUMEN.

Se realizó una metodología para calcular el costo energético del consumo eléctrico de un túnel de viento para realizar pruebas de calibración de instrumentos de velocidad del aire. Estas pruebas se realizaron en el Laboratorio de Ingeniería Térmica e Hidráulica Aplicada (LABINTHAP), éste cuenta con un Túnel de viento, en el cual el flujo de aire es generado por un motor asíncrono de 100 hp, que es controlado por un variador de frecuencia.

Se inició conociendo los principios de funcionamiento y características del túnel de viento, el motor eléctrico y el variador de frecuencia. Posteriormente se investigó como calcular el costo energético que demanda el túnel de viento, el cual se calcula determinando la potencia consumida en un determinado tiempo multiplicándola por el factor de la tarifa. Se desarrollaron las pruebas en una frecuencia inicial de 5 Hz incrementándose cada 5 Hz hasta 30 Hz, en un tiempo de 10 minutos para cada frecuencia.

Se calcularon las potencias para cada frecuencia, se obtuvo el costo energético para la calibración de un instrumento que necesitará calibrarse en todas las frecuencias ya mencionadas o únicamente tomar el costo de una frecuencia. Esto ya que cada instrumento tiene un propósito específico y velocidades de calibración diferentes.

Es de importancia considerar el horario en el que se realizan las pruebas, teniendo en cuenta que el horario más factible es el denominado "horario intermedio" (6:00-18:00 hrs), así como el costo de las pruebas se incrementara en relación a la frecuencia a calibrar y el tiempo que esta dure.

INTRODUCCIÓN.

La velocidad del aire tiene una gran importancia en meteorología, aire acondicionado, ventilación, etc. Pero existen otras aplicaciones en las cuales interviene la medición de esta variable, como lo son en termoeléctricas que tienen torres de enfriamiento las cuales su medio para disminuir esta temperatura es únicamente el aire que circula por las mismas; por lo cual es necesario que haya un flujo de aire que cubra las características para lograr esta disminución de temperatura.

En aeronáutica es de relevancia ya que los pilotos necesitan de esta información para realizar el aterrizaje regulando los flaps para lograr que el avión pueda planear durante su descenso. En obras civiles como rascacielos se requiere conocer la velocidad de aire a la cual estará sujeta la estructura y realizar el diseño para soportar esta carga y que la construcción no ceda.

En la actualidad lo que está teniendo bastante auge son las plantas eólicas, cuando se desarrolla un proyecto de estos es fácil decir el por qué se necesita medir la velocidad del aire ya que estos aerogeneradores se tienen que diseñar a las características del medio ambiente en donde se instalarán. Dependiendo de la velocidad del aire será la construcción y el diseño de las aspas, la electrónica de potencia que se considere para generar, la energía necesaria así como contemplar las velocidades máximas y diseñar un sistema de control que frene cuando la velocidad del aire exceda los límites para los cuales fue diseñado el aerogenerador.

Es de gran importancia tener instrumentos que midan la velocidad del aire con gran precisión; esto se puede lograr en una instalación adecuada que otorgue una garantía de esta calibración. Por lo cual esta tesis está enfocada a determinar el costo de una calibración a determinado instrumento; enfocándose en la parte de energía eléctrica. No importa su aplicación mientras esté dentro del intervalo de calibración de 5 m/s a 35 m/s.

Para lograr el objetivo de este trabajo se presentan 4 capítulos.

En el capítulo 1 se explica el principio de funcionamiento de un túnel de viento; el cual requiere de ciertas características como una fuente que genere un flujo de aire, una sección de pruebas y algún elemento con el cual se pueda controlar este flujo ya sea por medio de una compuerta o un variador de frecuencia. También fue necesario conocer cómo funciona un motor eléctrico en este caso asíncrono y al igual que la forma en que opera un variador de frecuencia para tener una frecuencia de entrada fija y una frecuencia variable a la salida.

El capítulo 2 menciona como se realiza el cálculo de potencia para un motor trifásico y como medir esta potencia con ayuda de un analizador de redes el cual mide parámetros como tensión, corriente, factor de potencia, potencia real y reactiva. Así como los factores que se consideran para calcular el costo de facturación de una tarifa H-M.

En el capítulo 3 se abordó a detalle la descripción del túnel de viento y la instrumentación ocupada para realizar las pruebas. Así como un procedimiento de medición el cual contiene un diagrama de flujo para obtener los parámetros de tensión, corriente y factor de potencia en cada frecuencia; estos datos vaciarlos en las tablas de trabajo previamente elaboradas para calcular la potencia consumida en un tiempo de 10 minutos.

En el capítulo 4 se realizaron los cálculos y analizaron las potencias encontradas para el costo energético total de una prueba de calibración el cual contempla desde una frecuencia de 5 Hz hasta 30 Hz. Se analizan también individualmente los costos de cada frecuencia.

Finalmente se presentan las conclusiones que se obtuvieron de este trabajo de tesis

CAPÍTULO 1: FUNCIONAMIENTO DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

1.1. Túnel de Viento.

Es una instalación en la cual se obtiene un flujo de aire por medio de un ventilador; está podría ser de succión o de presión. La primera se refiere cuando la sección de pruebas se encuentra antes del ventilador por lo cual el viento pasa primero por esta y después se dirige hacia el ventilador para posteriormente ser descargado. Cuando se refiere al de presión lo que sucede es que el viento primero pasa por el ventilador para más tarde pasar la sección de pruebas y finalmente ser descargado al exterior del túnel de viento.

El túnel es un elemento de gran importancia para conocer los efectos que tiene el aire en los objetos a diferentes condiciones de velocidad. La ventaja de realizar las pruebas en el túnel de viento es que se pueden controlar diversas variables como son la velocidad del aire, el flujo de aire, la posición en que se investigue el objeto, etc.

En la figura 1 se puede observar un ejemplo del túnel de viento.

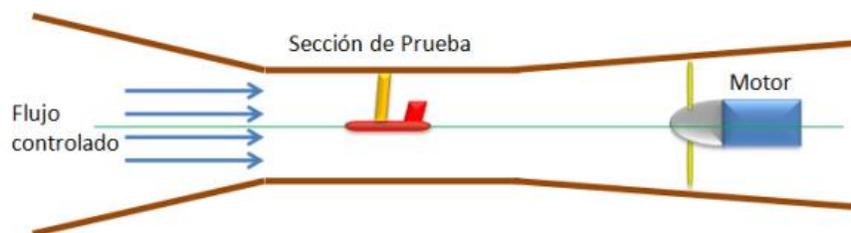


Figura 1. Túnel de Viento.

Un túnel de viento generalmente está compuesto por (Jewel B., William H., & Pope, 1999):

- Ventilador.
- Sección de pruebas.
- Difusor.
- Cono de contracción.

Ventilador

Es el encargado de producir el flujo de aire que se va a mover dentro del túnel de viento succionando el aire del exterior al interior del túnel a una velocidad predeterminada; regulada por la fuente motriz que le da la velocidad de giro al ventilador.

Sección de pruebas.

En ésta es donde se colocan los modelos a escala a ser probados a diferentes condiciones. La dimensión del tamaño de la sección de pruebas determinará que tanto se tendrá que escalar el objeto bajo estudio y normalmente es construida de un material que permite ver hacia el interior de la cámara para observar cómo se comporta el objeto.

Difusor.

Este junto con el cono de contracción son de las partes más importantes en el momento del diseño del túnel de viento ya que éste se sitúa después de la sección de pruebas, su función es la de disminuir la velocidad del aire y aumentar la presión del flujo de aire; por medio de un incremento proporcional en área del mismo. En la figura 2 se observa como incrementa el área.

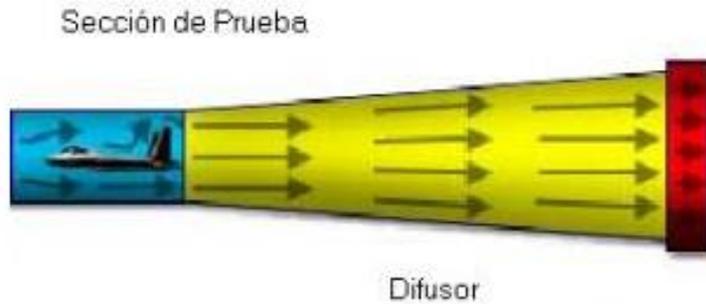


Figura 2. Difusor.

Cono de contracción.

Su objetivo principal es la de proporcionar un flujo de aire adecuado a la cámara de pruebas. Esto se logra reduciendo gradualmente el área del cono hasta llegar a la sección recta que es la cámara de pruebas como se observa en la figura 3.



Figura 3. Cono de Contracción.

1.2. Motores Eléctricos.

Los motores eléctricos son de gran importancia en la vida cotidiana de todos, desde el hogar en licuadoras, lavadoras bombas de agua, puertas eléctricas, etc., hasta en industrias para mover grandes cargas, como ventiladores, para sistemas de bombas contra incendios y muchas aplicaciones más.

Se iniciará clasificando a los motores:

- Motores de corriente continua:
 - De excitación independiente.
 - De excitación en serie.
 - De excitación en derivación (shunt).
 - De excitación compuesta (mixta).

- Motores de corriente alterna:
 - Motores síncronos.
 - Motores asíncronos.
 - Monofásicos.
 - De bobinado auxiliar.
 - Universal.
 - Trifásicos.
 - De rotor bobinado.
 - De rotor en corto circuito (jaula de ardilla).

El deslizamiento a plena carga de estos motores varía entre 1.5% y 3%. Los motores de más de 200 H.P. pueden tener deslizamientos menores del 1%. El funcionamiento de un motor eléctrico está basado en la acción del flujo magnético que gira alrededor del bobinado generado por la circulación de una corriente eléctrica a través del conductor.

$$\Phi = B * S = B * S \cos \alpha \quad (1.1)$$

Donde

Φ , flujo magnético que recorre al conductor, [Wb].

B, inducción magnética, [T].

S, superficie definida por el conductor, [m²].

α , ángulo que forma el vector S, perpendicular a la superficie definida al conductor.

Como lo menciona Stephen J. Chapman “El principio fundamental de operación de una máquina alterna es que si un grupo de corrientes trifásicas, cada una de igual magnitud y desfasadas 120°, fluye en un devanado trifásico; se producirá un campo magnético rotacional constante” (Chapman).

A los motores de corriente alterna se les llama asíncronos por el hecho de que la parte móvil (rotor) gira a una diferente velocidad de la de sincronismo. Estos se pueden conectar en estrella o en delta como se observa en las figuras 4 y 5.

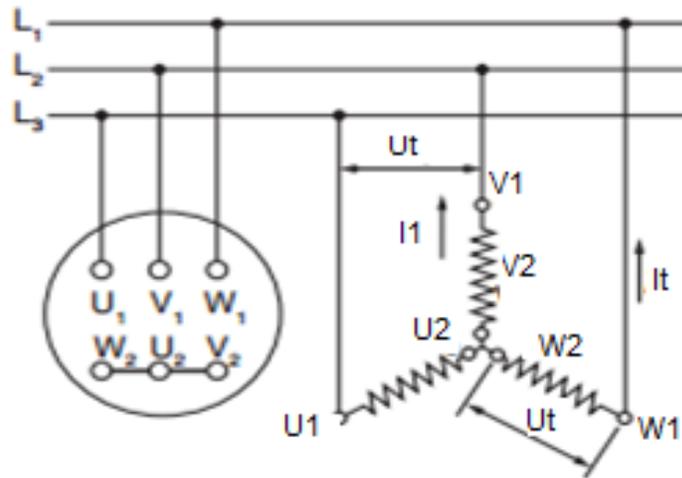


Figura 4. Conexión Estrella.

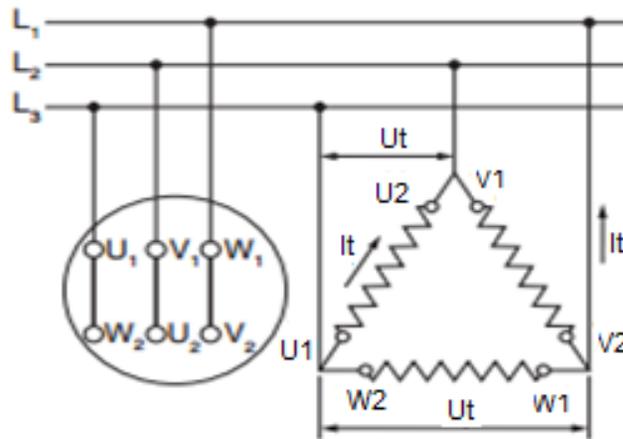


Figura 5. Conexión Delta.

La diferencia entre estas conexiones está dada por las tensiones y corrientes eléctricas entre fases. En la conexión estrella la magnitud de la corriente que circula por cada fase es igual a la corriente que existe entre fase y fase. A diferencia de la tensión que existe entre cada fase que es $\sqrt{3}$ veces menor a la tensión entre fase y fase.

Conexión Estrella:

$$V_F = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad (1.2)$$

$$I_L = I_F \quad (1.3)$$

Conexión Delta:

$$V_L = V_F \quad (1.4)$$

$$I_F = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \quad (1.5)$$

Un motor eléctrico está formado por un circuito magnético y dos eléctricos, en el circuito eléctrico uno está colocado en la parte fija (estator) y otro en la parte móvil (rotor). El circuito magnético está formado por las chapas magnéticas apiladas y aisladas entre sí para eliminar el magnetismo remanente. Este circuito está en forma de cilindro en el rotor y en forma de anillo en el estator como se muestra en la figura 6 (Juan Castillo Pedrosa, 2005).



Figura 6. Estator y rotor

Al estator se le colocan ranuras en la parte de afuera para colocar el bobinado inductor; esto estará fijo junto con la carcasa del motor. Al rotor va montado el eje del mismo y va ranurado para colocar el bobinado inducido; o bien este bobinado pueden ser conductores soldados a anillos que están soldados en los extremos del rotor (motor jaula de ardilla).

Al eje se le colocan unos rodamientos montados en la carcasa para reducir la fricción y que se pueda mover con más libertad. Las principales partes de las que consta un motor trifásico de inducción son:

- Carcasa.
- Ventilador.
- Rotor.
- Estator.
- Rodamientos.
- Devanados.
- Anillos.

A continuación se dará una breve descripción de cada una de las partes.

Carcasa

La función de este elemento es proteger al estator y al rotor de cualquier factor ambiental así como de cualquier accidente el cual pueda dañar el interior del motor.

Dependiendo de la aplicación para la cual se construya en motor pueden ser:

- Totalmente cerrada, (figura 7).
- Abierta, (figura 8).
- A prueba de goteo, (figura 9).
- A prueba de explosiones, (figura 10).
- De tipo sumergible, (figura 11).



Figura 7. Carcasa tipo cerrada.



Figura 8. Carcasa tipo abierta.



Figura 9. Carcasa tipo a prueba de goteo.



Figura 10. Carcasa tipo a prueba de explosión.



Figura 11. Carcasa tipo sumergible.

Ventilador.

Este va acoplado internamente al eje del motor el cual al girar producirá un flujo de aire que servirá como método de enfriamiento para todos los elementos del motor. Este flujo de aire dependerá tanto de la velocidad del motor; como de la altura a la que se encuentre el mismo. Esto ya que a mayor altura el aire se irá haciendo más ligero por lo que será más complicado el crear este flujo de aire a diferencia que si se hace a nivel del mar, donde el aire es mucho más denso lo cual propicia un flujo de aire para el propio enfriamiento del motor. En la figura 12 se observa como está acoplado el ventilador al eje del motor.

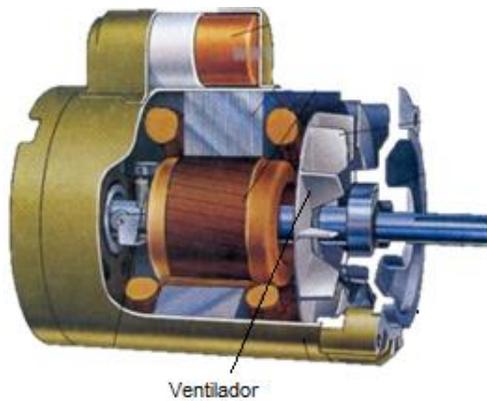
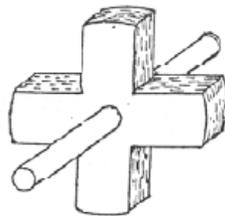


Figura 12. Ventilador en un motor eléctrico

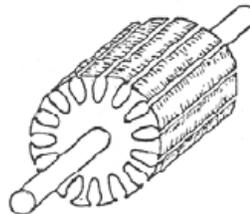
Rotor.

El rotor es la parte móvil del motor; este puede construirse de 3 formas (figura 13):

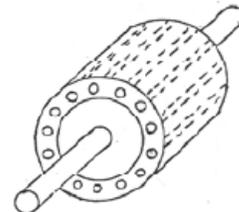
- Rotor ranurado.
- Rotor de polos salientes.
- Rotor jaula de ardilla.



Polos salientes



Ranurado



Jaula de ardilla

Figura 13. Tipos de rotor

El rotor está formado por un devanado al cual se le denomina 'inducido' esto es debido a que por el fenómeno de inducción y por corrientes de corriente alterna que se le inyectan a este devanado; el estator crea un flujo magnético en el rotor el cual comienza a girar con un ligero deslizamiento sobre la velocidad a la cual gira el flujo del estator.

Estator.

Este elemento es la parte fija del motor; en éste se encuentra el devanado inductor el cual producirá un flujo magnético que en cuanto se le haga pasar una corriente eléctrica por medio de una fuente externa este flujo comenzará a girar a la velocidad de sincronismo la cual estará determinada por la frecuencia a la que se encuentre la fuente de corriente alterna. En la figura 14 se observa como está construido el estator.



Figura 14. Estator.

Rodamientos.

Cuando el rotor es inducido por el estator se produce un movimiento rotatorio que hace que el eje al cual está acoplado el rotor gire por lo cual para reducir la fricción causada por este movimiento se instalan rodamientos los cuales se colocan sobre la carcasa del motor y el eje del rotor se pondrá en medio del rodamiento. Con esto se reducen las pérdidas producidas por este movimiento que se traducen en calor y a su vez en potencia de pérdida. En la figura 15 se muestran los rodamientos.



Figura 15. Rodamientos.

Devanados.

Estos son la parte fundamental del motor ya que son los que producen el movimiento del mismo. Están formados por espiras de cobre para que se creen polos magnéticos y se pueda inducir un movimiento.

El número de espiras dependerá del fabricante; aunque la mayoría ya están normalizados dependiendo el uso y potencia que se requiera. Existen dos devanados 'inductor' e 'inducido' como su nombre lo dice el devanado inductor es el que se alimenta de una fuente externa de corriente alterna con el propósito de inyectar una corriente al devanado produciéndose un flujo magnético generando un giro alrededor de este devanado a una velocidad la cual está definida por la ecuación (1.1) antes mencionada.

Al producirse este flujo magnético en el estator o devanado inductor, el devanado inducido; por el fenómeno electromagnético de inducción comenzará a generarse un flujo magnético que estará girando en el devanado inducido a una velocidad casi igual a la de sincronismo y esta velocidad se verá afectada por la carga a la cual esté conectada al eje del motor eléctrico (figura 16).

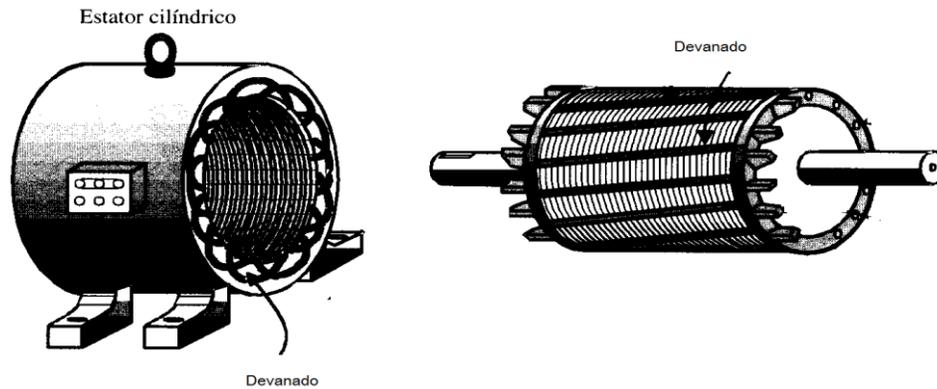


Figura 16. Devanados

1.3. Variador de Frecuencia.

La función del variador de frecuencia está basada en variar la frecuencia por medio de un circuito electrónico el cual recibe energía en corriente alterna y por medio de un rectificador la convierte en corriente directa. El cual por medio de un circuito controlado el más conocido el de Modulación por ancho de Pulso (Pulse Wide Module), invierte esta señal a corriente alterna; pero a una diferente frecuencia y así poder variar la velocidad en el motor. En la figura 17 se observa el diseño más básico del funcionamiento del variador de frecuencia.

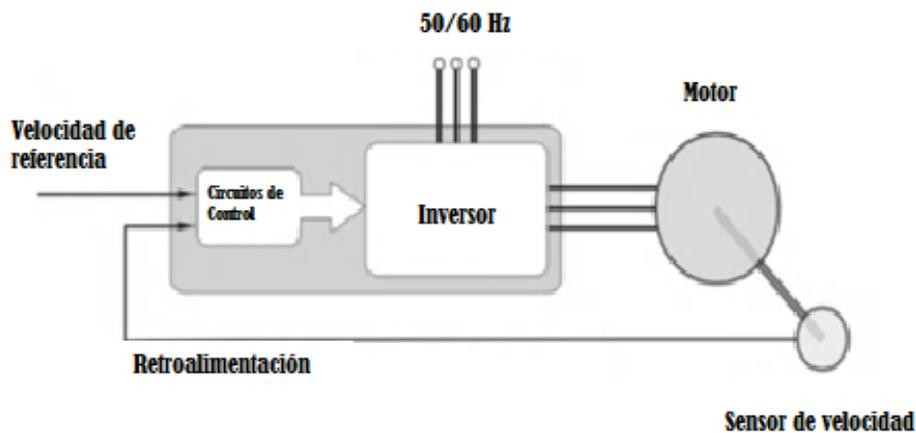


Figura 17. Circuito del variador de velocidad.

Rectificación

El circuito rectificador tiene 2 tiristores más (figura 18) a comparación del monofásico; esto da una mejor onda de tensión; ahora son 6 pulsos por ciclo (Drury, 2013).

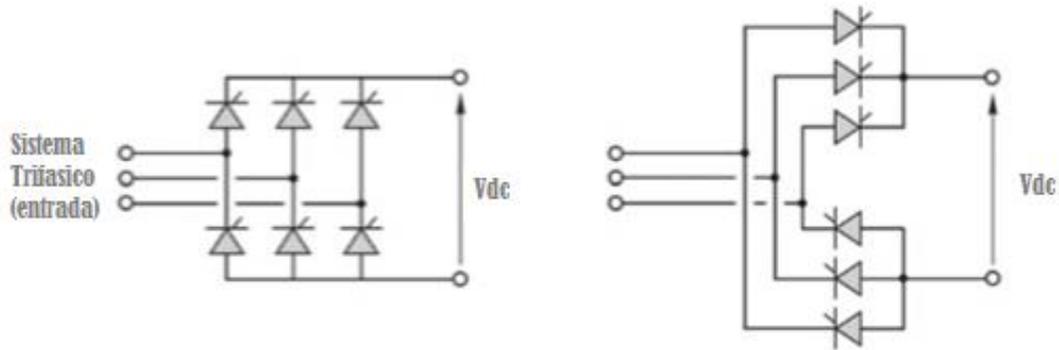


Figura 18. Circuito rectificador trifásico.

Los tiristores están en parejas para que rectifiquen en ambos ciclos (negativo y positivo). Cuando está activo el tiristor de la parte alta el tiristor que está conectado al mismo punto; pero en la parte baja no conduce y viceversa. Como se muestra en la figura 19 el ángulo es 0° corresponde al momento en que las fases tienen la misma magnitud por lo cual ahí se hace la conmutación entre los tiristores.

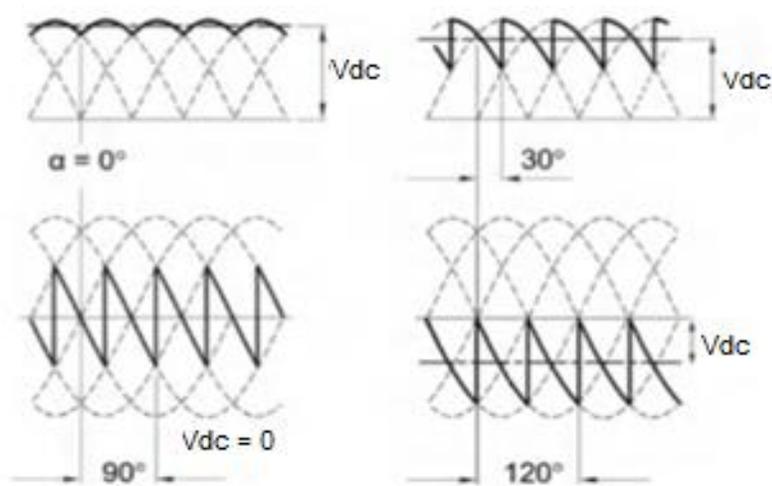


Figura 19: Ciclo de conmutación tiristores

Teniendo este rectificador de 6 pulsos la tensión de salida será:

$$V_{cd} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} V_{rms} \cos \theta \quad (1.6)$$

Inversor

Al proceso de conversión de corriente continua a corriente alterna es conocido como inversión. Este circuito es mostrado en la figura 20.

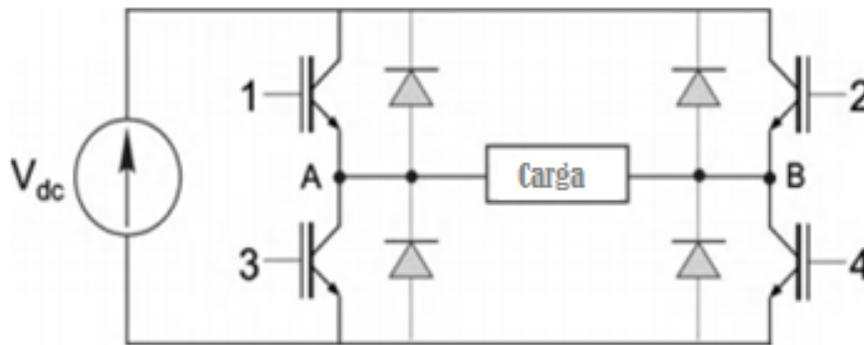


Figura 20: Inversor monofásico

Cuando los transistores 1 y 4 están activos la tensión en la carga es positiva a diferencia de cuando los transistores 2 y 3 están conduciendo la tensión en la carga será negativo. Si está conmutación no se da la tensión será cero. Cada pareja de dispositivos está activa cada tercio de ciclo de la frecuencia y están inactivos todos en dos periodos de los seis del ciclo. Así se logra la onda senoidal monofásica.

Para la inversión trifásica se le agregan 2 transistores más y ahora si se tiene un par para cada fase. Esta configuración se muestra en la figura 21.

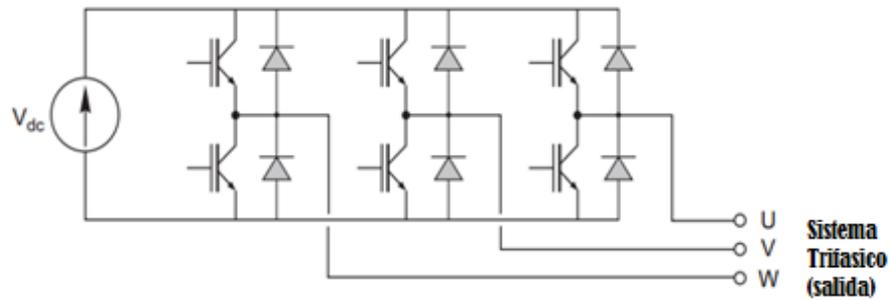


Figura 21: Inversor trifásico

En este circuito es requerido usar un diodo de camino libre en paralelo con cada transistor; como medio de protección para sobre tensiones generadas por una carga inductiva en este caso el motor. Esta es la forma en la que se constituye un variador de frecuencia, el rectificador, el circuito lógico y el inversor. Variaran de acuerdo a su uso y a los parámetros que se requieran controlar.

CAPÍTULO 2: TEORIA PARA EL CÁLCULO DE POTENCIA ELECTRICA.

2.1. Cálculo de Potencia en Motores Eléctricos.

Para hablar acerca del cálculo de la potencia eléctrica consumida por un equipo eléctrico, se debe establecer primero la relación de la potencia eléctrica real (P) que este consume durante un periodo de tiempo. Esta relación es el producto de la tensión eléctrica a la cual se encuentra trabajando dicho equipo por la intensidad de corriente eléctrica, cuando el motor se encuentra trabajando.

En la figura 22 se presenta el triángulo de potencias eléctricas, y su relación.

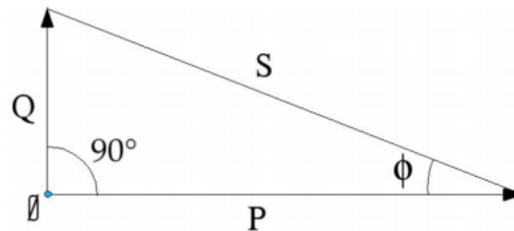


Figura 22: Triángulo de potencias eléctricas.

Del triángulo se definen tres tipos de potencias en cargas inductivas y capacitivas, cuando están siendo alimentadas por una red de corriente alterna.

- Potencia real o activa (P), es el producto de la tensión y la intensidad de corriente. Es la potencia disponible para realizar un trabajo. Se mide en Watt (W).

$$P = \sqrt{3} V \cdot I \cdot \text{Cos}\phi \quad (2.1)$$

Donde

P , potencia activa, [W].

V , tensión eléctrica aplicada a la carga, [V].

I , corriente consumida por la carga, [A].

\emptyset , ángulo de defasamiento entre la tensión y la corriente.

- b) Potencia reactiva (Q), es aquella cuando el producto de la tensión y la intensidad de corriente es negativo, es la potencia que regresa a la línea. Se mide en Volt-Ampere Reactivos (VAR).

$$Q = \sqrt{3} V \cdot I \cdot \text{Sen } \emptyset \quad (2.2)$$

Donde

Q , potencia reactiva, (VAR)

- c) Potencia aparente (S), es el producto entre la tensión de línea y la intensidad de corriente de la línea, se mide en Volt-Ampere (VA)

$$S = \sqrt{3} V \cdot I \quad (2.3)$$

Donde

S , potencia aparente, (VA)

Con ayuda de un voltmetro se puede conocer la tensión a la cual se encuentra alimentado el motor, la intensidad de corriente también se puede conocer con un multímetro de gancho. Cuando se obtienen los datos antes mencionados se puede sustituir en las ecuaciones (2.4) ó (2.5), cálculo de potencia real en un motor trifásico.

Potencia en motores monofásicos:

$$P = V_L \cdot I_L \cdot \cos \emptyset \quad (2.4)$$

Donde

V_L , tensión de línea, [V].

I_L , corriente de línea, [A].

Potencia real en motores trifásicos:

$$P = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \alpha \quad (2.5)$$

2.2. Consumo Eléctrico de un Motor Eléctrico.

Actualmente las empresas, industrias o cualquier consumidor de energía eléctrica buscan optimizar costos para ser más competitivos en el mercado. Para reducir los costos se puede actuar sobre un gran número de parámetros, entre ellos el consumo de energía eléctrica.

La forma en la que se puede conocer el consumo de un motor eléctrico es por medio de un medidor eléctrico y/o analizador de redes. Los analizadores que disponen de la más alta tecnología, miden una gran variedad de parámetros eléctricos (tensión, corriente, potencia real, aparente, lectura de armónicos), con el principal objetivo de obtener el control y la gestión de una instalación, máquina, industria, etc., permitiendo optimizar al máximo los costos energéticos.

Este medidor de potencia es un instrumento de medición multifunción que mide con precisión la corriente continua, la corriente alterna, la intensidad de corriente DC, la intensidad de corriente AC y la potencia real (W), entre otros (figura 23).



Figura 23: Analizador de redes.

2.3. Tarifas de CFE.

Las tarifas de energía eléctrica son las disposiciones específicas, que contienen las condiciones y cuotas que rigen para los suministros de energía eléctrica agrupados en cada clase de servicio. La estructura actual de las tarifas de energía eléctrica se basan en los costos de suministro de los usuarios, por lo cual se toman en cuenta las diferentes regiones, estaciones del año, horario de consumo, niveles de tensión de suministro y demanda. Los niveles de tensión de suministro están de acuerdo a la capacidad de carga que demandan, de la siguiente forma:

- Baja tensión: es el servicio que se suministra en niveles de tensión menores o iguales a 1.0 kV.
- Media tensión: es el servicio que se suministra en niveles de tensión mayores a 1.0 kV, pero menores o iguales a 34.5 kV.
- Alta tensión: es el servicio que se suministra a niveles de tensión mayores a 34.5 kV, pero menores a 230 kV.
- Extra alta tensión: es el servicio que se suministra a niveles de tensión mayores a 230 kV hasta 400 kV.

Las tarifas se identifican oficialmente por un número y letra(s), delante de su identificación se escribirá el título de respectiva tarifa, la tabla 1 muestra estas tarifas.

Tabla 1. Tarifas Eléctricas. (Electricidad, 2015)

	TITULO
1	Servicio Domestico
1a	Servicio Doméstico para localidades con temperatura media mínima de verano de 25°C
1b	Servicio Doméstico para localidades con temperatura media mínima de verano de 28°C
1c	Servicio Doméstico para localidades con temperatura media mínima de verano de 30°C
1d	Servicio Doméstico para localidades con temperatura media mínima de verano de 31°C
1e	Servicio Doméstico para localidades con temperatura media mínima de verano de 32°C
1f	Servicio Doméstico para localidades con temperatura media mínima de verano de 33°C
DAC	Servicio Doméstico de Alto Consumo
2	Servicio General hasta 25 kW de demanda
3	Servicio General para más de 25 kW de demanda
5 y 5a	Servicio para alumbrado público

6	Servicio para bombeo de aguas potables o negras de servicio público
7	Servicio temporal
9	Servicio para bombeo de agua para riego agrícola en baja tensión
9M	Servicio para bombeo de agua para riego agrícola en media tensión
O-M	Tarifa Ordinaria para servicio general en media tensión
	con demanda menor a 100 kW
H-M	Tarifa Ordinaria para servicio general en media tensión
	con demanda de 100 kW o más
H-MC	Tarifa horaria para servicio general en media tensión
	con demanda de 100 kW o más, para corta utilización
H-S	Tarifa horaria para servicio general en alta tensión,
	nivel subtransmisión
H-T	Tarifa horaria para servicio general en alta tensión,
	nivel transmisión
H-SL	Tarifa horaria para servicio general en alta tensión,
	nivel subtransmisión para larga utilización

La compañía suministradora de energía (CFE) emite un recibo por mes, donde desglosa los consumos eléctricos que fueron medidos con sus instrumentos para la tarifa contratada en los diferentes períodos. Dentro de los desgloses está la demanda máxima, factor de carga, factor de potencia, y consumos por período. A continuación se ilustra un recibo y se describe: en la parte superior del recibo, se especifica: el mes de facturación, el tipo de tarifa, monto a pagar, la demanda contratada, periodo de facturación, datos del usuario, etc., (figura 24).

La demanda contratada, la fija inicialmente el usuario, su valor no será menor del 60% de la carga total conectada, o de la capacidad del mayor motor o equipo instalado. En el caso de que el 60% de la carga total conectada exceda la capacidad de la subestación del usuario, solo se tomará como demanda contratada la capacidad de dicha subestación a un factor de 90%.

La compañía suministradora tiene equipos de medición en las subestaciones de la industria a facturar, en la cual mide los kW de energía totalizada consumida la que representa en diferentes horarios y tienen diferentes cuotas por período. Otra medición que hace la compañía suministradora es el factor de potencia, el cual puede causar un cargo o un reembolso dependiendo la región del país donde se encuentre.

La última medición que hacen es la demanda máxima, la que registra los valores máximos en los diferentes períodos, esto para tarifas donde aplica la tarifa horaria. El cargo tarifario para la demanda máxima medida mensualmente, tomando en cuenta el periodo en que ocurre, en forma de potencia reducida, esto es, sobre una demanda facturable definida como:

$$DF = DP + FRI(DI - DP) + FRB \times (DB - DPI) \quad (2.6)$$

Donde:

DF, demanda facturable, [kW].

DB, demanda base, [kW].

DI, demanda intermedia, [kW].

DP, demanda pico, [kW].

FRB, factor de reducción base

FRI, factor de reducción intermedio

2.4. Consideraciones para la Tarifa H-M

La tarifa en la que se encuentra la ESIME ZACATENCO, es una tarifa H-M. Para conocer los factores de facturación correspondientes al mes en el que se realizaron las pruebas, es necesario consultar la página oficial de la Comisión Federal de Electricidad, en el apartado de tarifas (CFE, 2015).

Como se observa en la figura 25, se muestran los siguientes datos: el cargo por kW de demanda facturable, el cargo por kWh de energía de punta, el cargo por kWh de energía intermedia y el cargo por kWh de energía base. Estos cargos se deben tomar en cuenta para determinar el costo del consumo energético.

Tarifa H-M (2014 - 2015)

Consultar tarifas de: 2015 ▾

Tarifa horaria para servicio general en media tensión, con demanda de 100 kW o más

1.- Aplicación

Esta tarifa se aplicará a los servicios que destinen la energía a cualquier uso, suministrados en media tensión, con una demanda de 100 kilowatts o más.

2.- Cuotas aplicables en el mes de FEBRERO ▾ de 2015.

Se aplicarán los siguientes cargos por la demanda facturable, por la energía de punta, por la energía intermedia y por la energía de base.

REGIÓN	CARGO POR KILOWATT DE DEMANDA FACTURABLE	CARGO POR KILOWATT - HORA DE ENERGÍA DE PUNTA	CARGO POR KILOWATT - HORA DE ENERGÍA INTERMEDIA	CARGO POR KILOWATT - HORA DE ENERGÍA DE BASE
Baja California	\$ 266.33	\$ 2.0872	\$ 0.9822	\$ 0.7715
Baja California Sur	\$ 255.98	\$ 1.6745	\$ 1.3626	\$ 0.9645
Central	\$ 184.54	\$ 2.0003	\$ 1.0874	\$ 0.9092
Noreste	\$ 169.66	\$ 1.8477	\$ 1.0096	\$ 0.8271
Noroeste	\$ 173.26	\$ 1.8585	\$ 1.0019	\$ 0.8395
Norte	\$ 170.45	\$ 1.8609	\$ 1.0194	\$ 0.8288
Peninsular	\$ 190.70	\$ 1.9566	\$ 1.0217	\$ 0.8415
Sur	\$ 184.54	\$ 1.9591	\$ 1.0390	\$ 0.8644

Figura 25: Tarifa H-M.

En la figura 26, se encuentra especificado la región y los factores para este caso. Se observa que existen dos períodos en el año, para aplicar los cargos de punta, intermedio y base; en diferentes horarios. El período en el que se realizaron las pruebas corresponde al de “el último domingo de octubre al sábado anterior al primer domingo de abril” (figura 27).

REGIÓN	FRI	FRB
Baja California	0.141	0.070
Baja California Sur	0.195	0.097
Central	0.300	0.150
Noreste	0.300	0.150
Noroeste	0.300	0.150
Norte	0.300	0.150
Peninsular	0.300	0.150
Sur	0.300	0.150

Figura 26: Región y factores de reducción.

Regiones Central, Noreste, Noroeste, Norte, Peninsular y Sur

Del primer domingo de abril al sábado anterior al último domingo de octubre

DÍA DE LA SEMANA	BASE	INTERMEDIO	PUNTA
lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 20:00 22:00 - 24:00	20:00 - 22:00
sábado	0:00 - 7:00	7:00 - 24:00	
domingo y festivo	0:00 - 19:00	19:00 - 24:00	

Del último domingo de octubre al sábado anterior al primer domingo de abril

DÍA DE LA SEMANA	BASE	INTERMEDIO	PUNTA
lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 18:00 22:00 - 24:00	18:00 - 22:00
sábado	0:00 - 8:00	8:00 - 19:00 21:00 - 24:00	19:00 - 21:00
domingo y festivo	0:00 - 18:00	18:00 - 24:00	

Figura 27: Horarios de tarifas H-M.

Para el cálculo del costo energético se deben considerar la energía consumida kWh y la demanda facturable. La energía consumida, es el producto de la potencia real (W) consumida por el sistema.

Para la demanda facturable se debe emplear la ecuación de ***Demanda facturable*** (ecuación 2.6) y aplicar el multiplicador del cargo por un kW de demanda del mes correspondiente y su factor de reducción. El multiplicador de cargo varía según el mes y la región y se debe tener en cuenta el horario en el que se realizaron las pruebas.

CAPÍTULO 3: PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN.

3.1. Descripción del Túnel de Viento.

En este caso se tienen los dos tipos de sección de pruebas; esto por el diseño del túnel de viento; en la primera sección de prueba, el ventilador es succión ya que el flujo es dirigido primero a la sección de pruebas y después al ventilador. Al pasar por la aspas del ventilador este flujo de aire es direccionado de forma axial hacia la segunda sección de pruebas, la cual por dirigirse primero al ventilador y luego a la zona de pruebas se convierte en un ventilador de presión, para que finalmente este flujo sea descargado en el interior del laboratorio de pruebas.

En este caso específico se utilizará esta instalación para calibrar diversos instrumentos de la velocidad del aire; pero tiene diversos campos de aplicación como lo es en ingeniería civil en cargas estáticas y dinámicas del viento para puentes; en arquitectura pruebas aerodinámicas en edificios; en energías renovables para el desarrollo de aerogeneradores.

El túnel de viento es de velocidad baja. La velocidad que puede alcanzar el túnel es de 60 m/s con un flujo de 24 m^3/s .

- Cuenta con entrada acampanada (figura 28) la cual es la entrada del flujo de aire del túnel; el cual utiliza un ventilador centrífugo de 9 álabes rectos con un diámetro de 1.895 m. Alimentado por un motor trifásico de 100 H.P. a 1750 r.p.m. y este a su vez es controlado por un variador de velocidad Emerson Industrial Controls tipo laser 3. También cuenta con una sección de pruebas de 0.60 m x 0.80 m x 1.50 m; y por último cuenta con la sección de descarga del flujo de aire (figura 29).

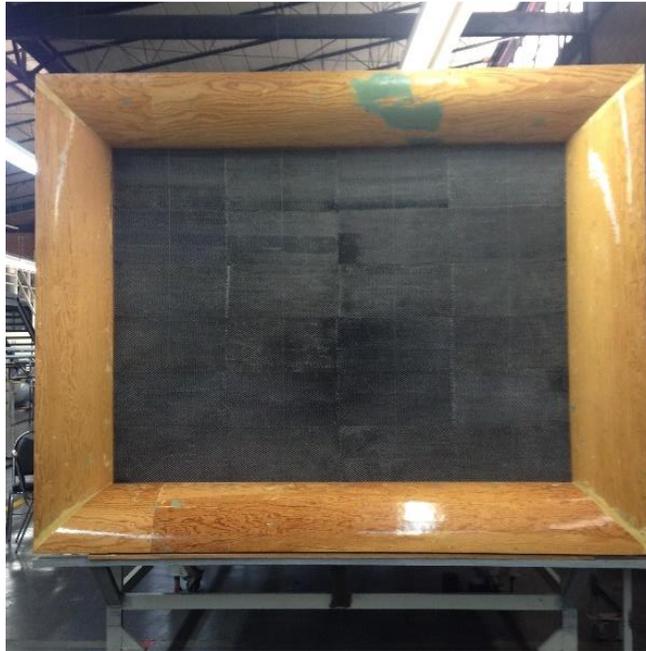


Figura 28: Entrada acampanada.

**Seccion de Descarga
del Flujo de aire**



Figura 29: Descarga del flujo de aire.

3.2. Instrumentación.

A continuación se describen los principales elementos que serán necesarios para poder realizar las pruebas de calibración.

3.2.1. Variador de Frecuencia.

El motor eléctrico es controlado por un variador de frecuencia de corriente alterna. Las especificaciones del variador de frecuencia son las siguientes:

- Marca: EMERSON.
- Modelo: Laser 3.
- Tensión nominal de entrada: 415 VCA/480 VCA, trifásico.
- Frecuencia de entrada: 50 Hz/60 Hz.
- Tensión nominal de salida 415 VCA/460 VCA, trifásico.
- Display digital para control de frecuencia uno a uno.
- Voltmetro analógico.
- Ampermetro analógico.

3.2.2. Instrumentos para la velocidad del viento.

Tubo de Pitot tipo L.

Este instrumento no mide directamente la velocidad del aire (figura 30), mide dos presiones que son la estática y la total, las cuales al conectarse en un manómetro muestra el valor de cada una diferentes presiones con las cuales al introducir esos valores en la ecuación (3.1), se obtiene la densidad del flujo en la sección de pruebas la cuál es necesaria para poder calcular la velocidad del viento. La ecuación (3.2) muestra cómo se calcula la velocidad del viento.

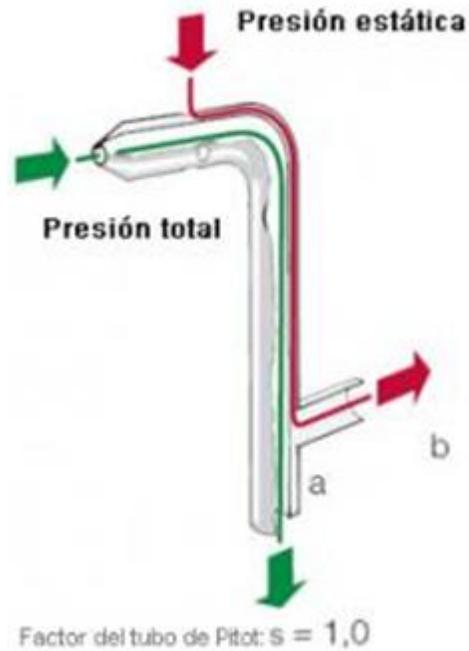


Figura 30: Tubo de Pitot L.

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (3.1)$$

$$V = \sqrt{\frac{2(Pt - Pe)}{\rho}} \quad (3.2)$$

Donde:

V , velocidad de aire, $\left[\frac{m}{s}\right]$

P_t , presión total, [Pa]

P_e , presión estática, [Pa]

ρ , densidad de flujo, $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

T , temperatura ambiente, [°C]

R , constante del gas, $\left[\frac{J}{K \cdot mol}\right]$

Tipos de Anemómetros

Existen diferentes tipos de anemómetros de acuerdo a su aplicación. Estos son de:

- Hilo caliente
- De momento
- De rotación o de copelas
- De presión

Se utilizó un anemómetro digital marca Extech Instruments (figura 31) y se instaló en el área de la sección de pruebas del túnel de viento para medir la velocidad del aire de acuerdo al variador de frecuencia. Este instrumento mide la velocidad y temperatura de aire al colocar el sensor en un conducto o ventila. El sensor está ubicado en el extremo de la varilla telescópica con cubierta protectora deslizable.

Las especificaciones del instrumento son las siguientes:

- Marca: Extech Instruments
- Nombre técnico: Termo-Anemómetro de hilo caliente
- Modelo: 407123
-

Descripción del medidor.

1. Pantalla LCD – Indica lecturas de velocidad y temperatura del aire, unidades de medición, icono de batería débil y otras alertas para el usuario.
2. Botones:
 - POWER: Apagar y encender el medidor
 - RETENCIÓN: Congela la lectura
 - C/F: Selector de unidades de temperatura
 - REGISTRO: Presione para registrar las lecturas máximas (MÁX) y mínimas (MÍN)

- RECUPERAR: Indica lecturas MÁX / MIN
 - UNIDAD: Unidades de medida de velocidad del aire
 - CERO: Presione para calibrar la pantalla a cero (debe estar cerrada la tapa del sensor)
3. Funda protectora – Forro de hule que envuelve el medidor.
 4. Compartimiento de batería - Ubicado atrás del medidor
 5. Enchufe de conexión para PC – Acepta conector de 3.5 mm de un cable de interfaz para PC (cable y software para captura de datos disponible con parte número 407001)
 6. Enchufe de entrada del sensor – Inserte el conector del sensor
 7. Abertura del sensor – El aire debe fluir a través de la abertura para tener medidas correctas
 8. Mango telescópico del sensor – Extensible hasta 1 m (39")
 9. Cubierta protectora del sensor

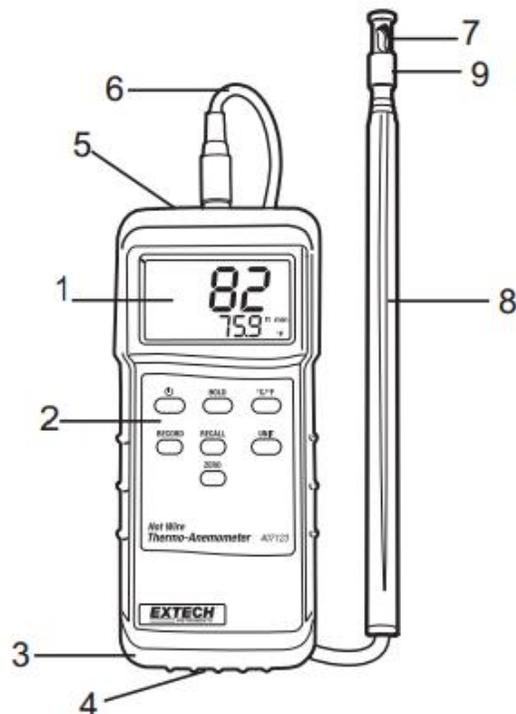


Figura 31: Anemómetro digital.

3.2.3. Analizador de redes.

La función de este instrumento es medir la tensión y la corriente presente en el sistema que demandará el túnel de viento durante cada prueba realizada. Esto con la finalidad de conocer la potencia consumida por el sistema durante cada prueba que se realice. El analizador de redes utilizado es un FLUKE 43B (figura 32).

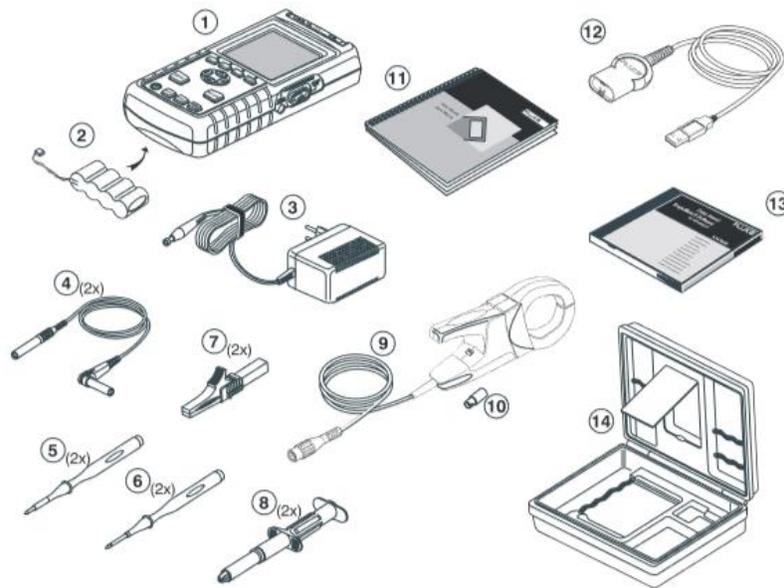


Figura 32: FLUKE 43B

Este puede medir:

- Volt/Ampere/Hertz.
- Potencia.
- Armónicos.
- Picos durante la medición.
- Transitorios.

En la tabla 2 se muestran algunas especificaciones del analizador de redes utilizado para este proyecto.

Tabla 2: Datos del analizador de redes.

Unidades	Alcances
Tensión	5 V a 500 V $\pm(1\% + 10 \text{ cuentas})$
Corriente	50 A a 500 KA $\pm(1\% + 10 \text{ cuentas})$
Frecuencia	10 Hz a 15 kHz
	40 Hz a 70 Hz $\pm(0.5\% + 2 \text{ cuentas})$
Potencia	250 W a 250 MW, 625 MW, 1.56 GW
	Cuando se seleccione la potencia total (%r): $\pm(2\% + 6 \text{ cuentas})$
	Cuando se seleccione la potencia fundamental (%f): $\pm(4\% + 4 \text{ cuentas})$
DPF	0 a 1.0
	0.00 a 0.25 no especificado
	0.25 a 0.90 ± 0.04
	0.90 a 1.0 ± 0.03
PF	0.0 a 1.0 ± 0.04

3.3. Mediciones Eléctricas.

En la figura 33 se muestra un diagrama de flujo, el cual indica el procedimiento que se siguió para la realización de las pruebas. Contempla un proceso de medición típica para la calibración de un instrumento, que tiene un intervalo de 5 Hz hasta la frecuencia final de 30 Hz.

Estas mediciones contemplan los valores de tensión, corriente, y velocidad del aire. Las cuales se emplearan para poder calcular la potencia demanda en cada prueba por el túnel de viento.

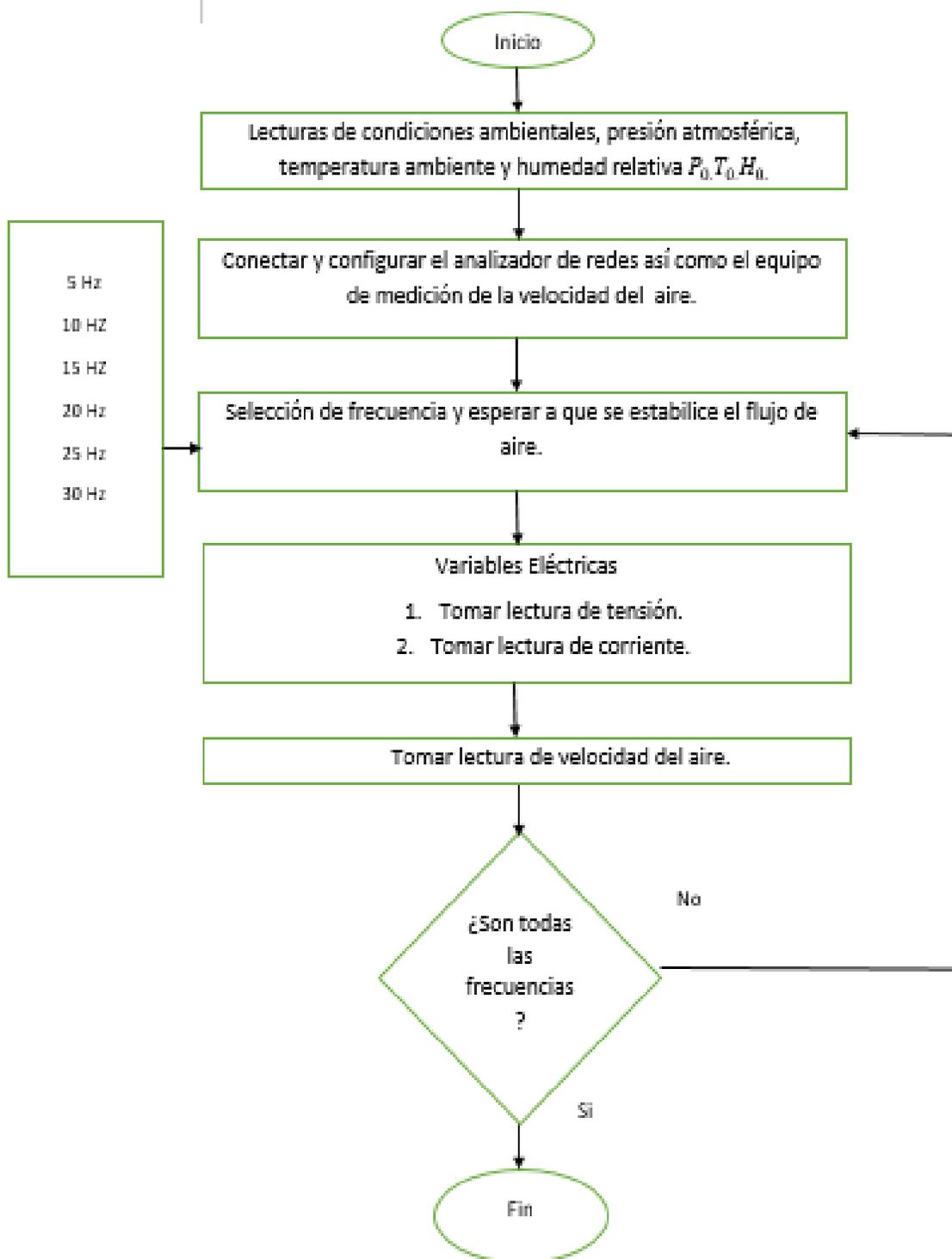


Figura 33: Diagrama de Flujo.

1. Se tomarán las medidas de temperatura ambiente, presión atmosférica y humedad relativa por medio de la estación meteorológica. Como se muestra en las figuras 34 y 35.



Figura 34: Estación meteorológica.



Figura 35: Lecturas de presión atmosférica, humedad relativa y temperatura.

2. Se conectó el analizador de redes en el variador de frecuencia. En la figura 36 se muestra el diagrama de conexiones.

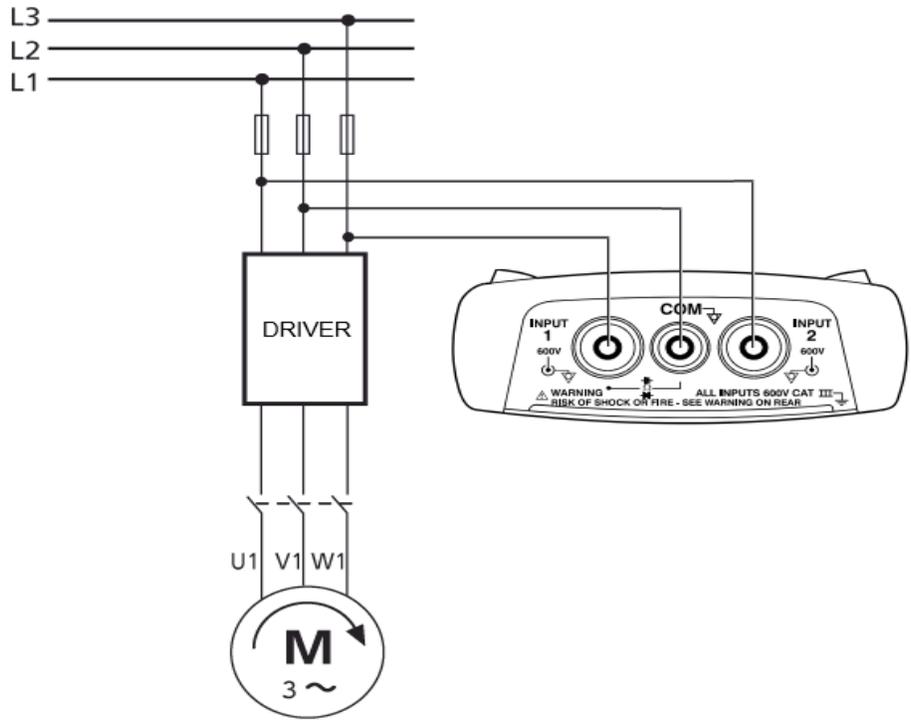


Figura 36: Diagrama de conexiones.

- Se configuró el analizador de redes FLUKE 43B y se comenzó a tomar las lecturas de tensión, corriente y factor de potencia (figura 37).

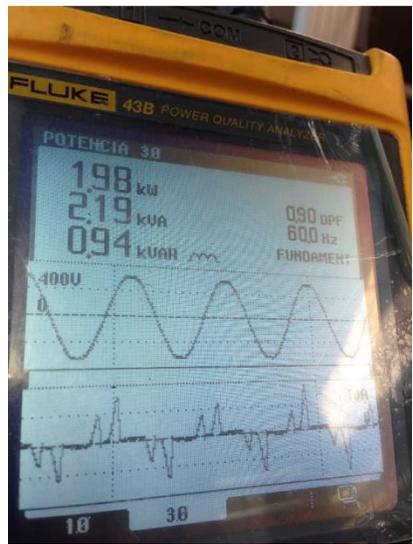


Figura 37: Potencia del analizador de redes

4. Por medio del ajuste manual de frecuencia se ajusta a la frecuencia inicial de 5 Hz, hasta observar la frecuencia deseada en el display (figura 38).

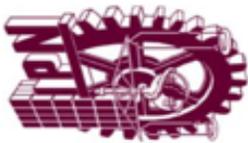
Cuando se establece la frecuencia deseada, se tiene que dejar aproximadamente un minuto antes de tomar las mediciones, con el propósito de que el flujo del aire se estabilice en la sección de pruebas, para evitar mediciones erróneas en la velocidad.



Variador de Frecuencia

Figura 38: Variador de frecuencia.

5. Se energiza el variador de frecuencia modificando la frecuencia hasta un valor de 5 Hz y se modifica cada 10 minutos en pasos de 5 Hz hasta obtener 30 Hz.
6. En cada frecuencia se tomarán las lecturas de tensión, corriente y factor de potencia; obtenidas del analizador de redes. Cada lectura tomada se anotará en la tabla de trabajo de acuerdo a la frecuencia en la cual se haya efectuado la medición (tabla 3).
7. Se repetirá el proceso desde el paso 3, un total de 5 veces para comparar resultados.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
 MECÁNICA Y ELÉCTRICA
 UNIDAD PROFESIONAL ADOLFO LÓPEZ MATEOS
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Tabla 3: Tabla de trabajo.

Datos experimentales									
Realizo:	Enrique Eugenio C.		Roberto Franco G.		Fecha	Número de prueba		Reviso	
Temperatura ambiente	Presión atmosférica.		Humedad relativa.			Hora de inicio.		Hora de término.	
Frecuencia (Hz)	Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Velocidad Seccion (m/s)	Tensión (V)	Corriente (A)	F.P.			
5									
10									
15									
20									
25									
30									

3.3.1. Diagrama de Conexiones

El siguiente diagrama muestra la conexión del analizador de redes en el variador de frecuencia para la obtención de las mediciones (figura 39).



Figura 39: Diagrama de conexión física.

CAPÍTULO 4: COSTO ENERGETICO DEMANDADO POR EL TUNEL DE VIENTO.

A continuación se muestran los cálculos para cada frecuencia; inicialmente a una frecuencia de 5 Hz, con intervalos de 5 hasta finalizar con la frecuencia de 30 Hz. En cada frecuencia el tiempo que se dejará trabajar el túnel de viento deberá ser de 10 minutos, se consideró 10 minutos por la experiencia que tiene el laboratorio realizando pruebas similares.

En los siguientes subcapítulos se realizó el cálculo con todas las frecuencias antes mencionadas, para poder observar la diferencia entre las diferentes velocidades, ya que se puede dar el caso de que algún instrumento sea solicitado a calibración en un punto en particular y que este sea alguno de los que se muestran en esta tesis. Esto para tener el costo particular de cada frecuencia ya que cuando se requiera calibrar un instrumento dependerá de las necesidades específicas para las que se requiera emplear.

4.1. Costo energético por cada frecuencia.

Para poder ejemplificar los cálculos de esta tesis, se tomaron los resultados obtenidos en experimentación de la **sesión número 3** de las 5 que se realizaron.

Las mediciones que se tomaron en cuenta fueron la velocidad en la sección de pruebas, la tensión y la corriente en el variador de frecuencia; así como el factor de potencia demandado por el mismo. También se obtuvo la lectura de temperatura ambiente, presión atmosférica, humedad relativa y la hora de inicio y fin de cada prueba.

Los resultados obtenidos en la tercera sesión de prueba fueron las siguientes (tabla 4):

Tabla 4: Datos obtenidos, en la tercera sesión de prueba.

Datos experimentales									
Realizo:	Enrique Eugenio C.		Roberto Franco G.		Fecha		Número de prueba		Revisó
	Presión atmosférica.		Humedad relativa.		17/02/2015		3		
Temperatura ambiente	0.779		36.2		Hora de inicio.		Hora de término.		
22.57					04:00 p. m.		05:08 p. m.		
Frecuencia	Inicio de la prueba		Velocidad Sección		Tensión		Corriente		F.P.
(Hz)	Fin de la prueba		(m/s)		(V)		(A)		
5	16:08	16:18	4.86	452	5.21	91			
10	16:18	16:28	9.00	453.1	6.17	92			
15	16:28	16:38	13.30	456.1	8.85	96			
20	16:38	16:48	18.10	457.3	11.83	95			
25	16:48	16:58	22.60	455.2	20.81	95			
30	16:58	17:08	26.30	456.3	28.16	96			

En la figura 40 se observa la gráfica de la tercera prueba que se realizó donde se muestra que la velocidad y la frecuencia son parámetros que se comportan de forma lineal. Si se aumenta la frecuencia de igual manera se incrementa la velocidad y viceversa. La figura 41 se puede observar como aumentara el costo; ya que la potencia aumenta con respecto a la frecuencia utilizada.

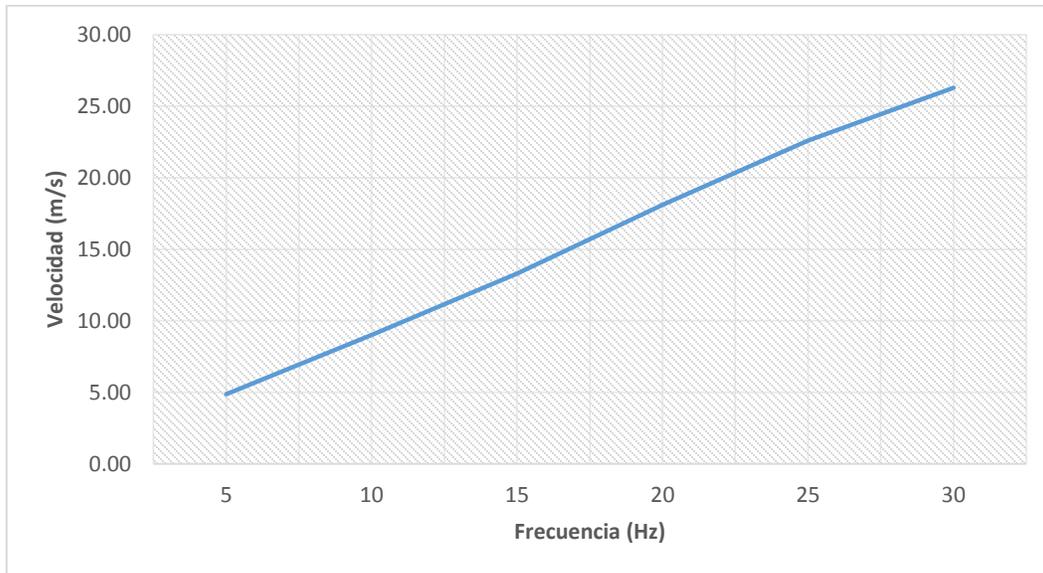


Figura 40: Frecuencia Vs. Velocidad

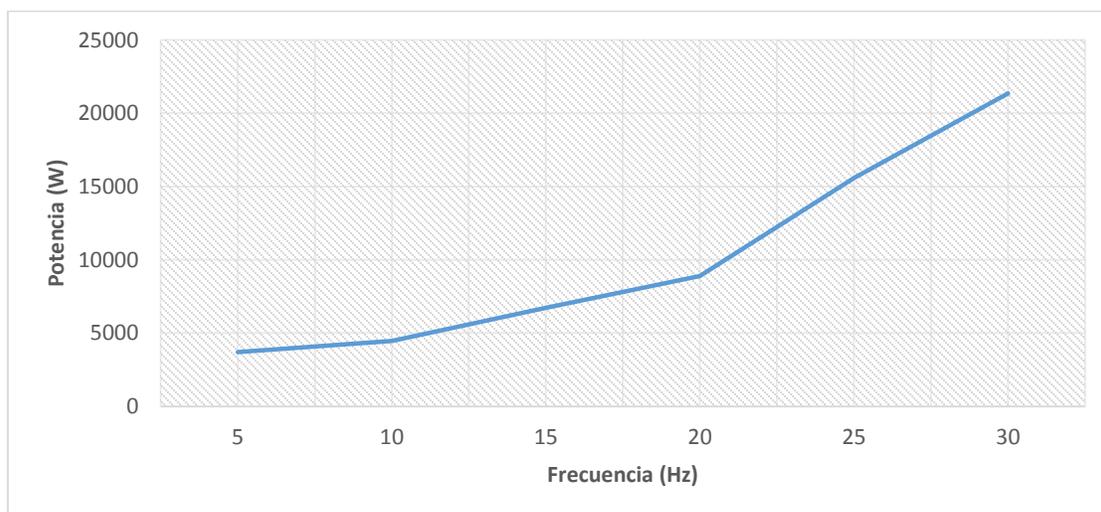


Figura 41: Frecuencia Vs. Potencia

Estos datos se tomaron para ejemplificar el cálculo y el análisis del costo energético, en la que se puede observar que se trabajó dentro del horario de **tarifa intermedia**, de las 4:00 pm a las 5:08 pm.

A continuación se mostrara un ejemplo de cómo se realiza el cálculo para conocer el consumo en relación a la energía eléctrica que demanda el túnel de viento. Y posteriormente únicamente se mostraran los resultados de todas las frecuencias a las cuales se realizaron las pruebas.

Se muestra el análisis del costo del consumo energético para, 5 Hz. La frecuencia que se eligió es la más baja dentro de las pruebas, la cual equivale a 4.86 m/s.

Como primer paso se calcula la potencia consumida por el túnel de viento a esta frecuencia como se observa en la tabla 5, la frecuencia a 5 Hz, considerando la tensión y la corriente ecuación (2.5). De las cuales se obtuvieron:

$$\mathcal{P} = \sqrt{3} \cdot 452 \cdot 5.21 \cdot 0.91$$
$$\mathcal{P} = 3711.74 \text{ W}$$

Tabla 5: Cálculo de potencia real a 5 Hz.

Frecuencia	Tensión (V)	Corriente (I)	Factor de potencia	Potencia (W)
5	452	5.21	0.91	3711.745

Esta potencia eléctrica demandada por el túnel de viento para fines prácticos se divide entre 1000 para obtener kW.

$$\frac{3711.74W}{1000} = 3.711 kW$$

Por consiguiente se procede a aplicar la ecuación (2.6) de demanda facturable:

$$DF = 0 + 0.300(3.711 - 0) + 0.150 x (0 - 0)$$

$$DF = 1.1133 kW$$

Para conocer el consumo energético, la potencia (W) se convierte a kiloWatt por hora (kWh). Esta conversión se realizó tomando en cuenta que la duración por frecuencia de la prueba fueron 10 minutos, teniendo este parámetro como referencia se convierte a horas; obteniendo un resultado de 0.167 horas como se observa en la tabla 6.

$$1 \text{ hora} = 60 \text{ minutos}$$

$$10 \text{ minutos} = \frac{10 \text{ minutos} * 1 \text{ hora}}{60 \text{ minutos}} = 0.167 \text{ horas}$$

$$kWh = 3.711kW \cdot 0.167h = 0.619 kWh$$

Tabla 6: Consumo energético (kWh) a 5 Hz.

Frecuencia	Tensión (V)	Corriente (I)	Factor de potencia	Potencia (W)	Tiempo (h)	Potencia en kiloWatt (kW)	kW*h
5	452	5.21	0.91	3711.745	0.167	3.712	0.619

Una vez que se tiene el consumo energético (*kWh*), considerando que el cargo por el horario base y punta no aplica, solo se multiplica el consumo energético de la tabla anterior, por el factor del cargo del horario intermedia, el cual corresponde un valor de \$1.0874 pesos por cada kWh usados en este periodo de tiempo.

La tabla 7 muestra los conceptos aplicables para conocer el costo monetario del consumo energético, “Energía en Intermedia kWh” y “Demanda Facturable” y su precio unitario correspondiente.

Tabla 7: Conceptos facturables a 5 Hz.

Conceptos	Totales	Precios Unitarios
Energía en Base kWh	0	\$0.9092
Energía en Intermedia kWh	0.619	\$1.0874
Energía en Punta kWh	0	\$2.0003
Demanda Facturable kW	1.114	\$184.5400

Para calcular el importe total, es la suma del producto de los totales por su respectivo precio unitario, quedando como resultado la tabla 8.

$$\text{Energía} = 0.619 * \$ 1.0874 = \$0.67$$

$$\text{Demanda facturable} = 1.114 * \$184.53 = \$205.49$$

$$\text{Total} = \$0.67 + \$205.49 = \$206.16$$

Tabla 8: Importe total a 5 Hz.

Conceptos	Importe \$
Energía	\$0.67
Demanda Facturable	\$205.49
Total	\$206.16

Este es el cálculo del costo de energético que demanda el túnel de viento en un solo punto. Este es el punto de frecuencia inicial en el que se mantuvo constante la frecuencia durante un periodo de tiempo igual a 10 minutos. El costo total del consumo energético para la prueba en un solo punto (5 Hz) es de **\$206.16**.

4.1.1 Resultados por cada frecuencia

La tabla 9 muestra el importe total que demanda el túnel de viento en cada frecuencia.

Tabla 9: Importe total para cada frecuencia.

Frecuencia (Hz)	Importe Total (\$)
5	\$ 206.16
10	\$ 247.43
15	\$ 372.79
20	\$ 494.43
25	\$ 865.74
30	\$ 206.16

4.2. Costo energético total de una prueba de calibración.

En este subcapítulo se realizó el cálculo del costo de una prueba completa, suponiendo que sea necesario el costo total, desde la frecuencia inicial de 5 Hz hasta la de 30 Hz, pero para diferenciar este cálculo del anterior, se tomaron en cuenta los valores obtenidos de la quinta sesión de pruebas (tabla 10).

Tabla 10: Datos obtenidos, en la quinta sesión de prueba.

Datos experimentales										
Realizo:	Enrique Eugenio C.		Roberto Franco G.			Fecha		Número de prueba		Revisó
	Presión atmosférica.		Humedad relativa.			20/02/2015		5		
Temperatura ambiente	0.7784		31.3			Hora de inicio.		Hora de término.		
Frecuencia	Inicio de la prueba (Hora)	Fin de la prueba (Hora)	Velocidad Seccion Pruebas (m/s)	Tensión		Corriente		F.P.		
(Hz)			(V)			(A)				
5	17:05	17:15	4.84	457		3.92		93		
10	17:15	17:25	8.90	452.1		5.67		95		
15	17:25	17:35	12.90	452.2		9.01		96		
20	17:35	17:45	17.90	453.3		12.84		96		
25	17:45	17:56	22.50	453.1		19		95		
30	17:56	18:06	26.50	452.7		27.04		95		

Se tomaron los resultados de la tabla 10, para analizar el consumo energético del motor eléctrico. Posteriormente se calcularon la demanda facturable (*kW*) y finalmente se calculó el consumo energético (*kWh*).

Se calcula la potencia consumida, para cada frecuencia, considerando la tensión, la corriente y el factor de potencia medidos con el analizador; aplicando la ecuación (2.5) para la potencia eléctrica. En la tabla 11 se muestran los datos y los resultados obtenidos con este cálculo.

$$P_{5\text{ Hz}} = 457 * 3.92 * \sqrt{3} * 0.93 = 2885.66\text{ W}$$

$$P_{10\text{ Hz}} = 452.1 * 5.97 * \sqrt{3} * 0.95 = 4217.95\text{ W}$$

$$P_{15\text{ Hz}} = 452.2 * 9.01 * \sqrt{3} * 0.96 = 6774.65\text{ W}$$

$$P_{20\text{ Hz}} = 453.3 * 12.84 * \sqrt{3} * 0.96 = 9677.93\text{ W}$$

$$P_{25\text{ Hz}} = 453.1 * 19 * \sqrt{3} * 0.95 = 14165.49\text{ W}$$

$$P_{30\text{ Hz}} = 452.7 * 27.04 * \sqrt{3} * 0.95 = 20141.94\text{ W}$$

Tabla 11: Cálculo de potencia real.

Tensión (V)	Corriente (A)	Factor de Potencia	Potencia (W)
457	3.92	0.93	2885.66454
452.1	5.67	0.95	4217.95361
452.2	9.01	0.96	6774.6554
453.3	12.84	0.96	9677.93282
453.1	19	0.95	14165.4996
452.7	27.04	0.95	20141.9454

Obtenido los valores de la potencia real de cada frecuencia, se suman para poder obtener el consumo eléctrico durante la prueba.

$$W_{total} = 2885.66 + 4217.95 + 6774.65 + 9677.93 + 14165.49 + 20141.94 = 57863.65 W$$

Este consumo total obtenido para fines prácticos se divide entre 1000 para obtener kW.

$$\frac{57863.65 W}{1000} = 57.863 kW$$

Aplicando la ecuación (2.6) de demanda facturable

$$DF = 0 + 0.300(57.863 - 0) + 0.150 x (0 - 0)$$

$$DF = 17.359 kW$$

La potencia (kW) obtenida se convierte a kW por hora (kWh). Esta conversión se realizó tomando en cuenta que por cada frecuencia de la prueba fueron 10 minutos, lo que equivale a 0.167 horas. Y con esto se obtiene la tabla 12.

Tabla 12: Consumo energético.

Tensión (V)	Corriente (A)	Factor de Potencia	Potencia (W)	Tiempo (h)	Potencia (KW)	KW*Hr
457	3.92	0.93	2885.66454	0.167	2.88566454	0.48094409
452.1	5.67	0.95	4217.95361	0.167	4.21795361	0.70299227

452.2	9.01	0.96	6774.6554	0.167	6.7746554	1.12910923
453.3	12.84	0.96	9677.93282	0.167	9.67793282	1.6129888
453.1	19	0.95	14165.4996	0.167	14.1654996	2.3609166
452.7	27.04	0.95	20141.9454	0.167	20.1419454	3.3569909
Total:			57863.6514	0.167	57.8636514	9.64394189

Para calcular el importe económico total, primero se multiplican los totales por el precio unitario para posteriormente sumar estos valores y sacar el costo total.

Puesto que el cargo por el horario base y punta no aplica para este caso solo se multiplica la suma total del consumo energético por el factor del cargo del horario intermedia y el resultado de la demanda facturable, por el precio unitario del kW (tabla 13). Teniendo estos valores solo se suman y se obtiene el importe total (tabla 14).

Tabla 13: Conceptos facturables.

Conceptos	Totales	Precios Unitarios
Energía en Base kWh	0	\$0.9092
Energía en Intermedia kWh	9.644	\$1.0874
Energía en Punta kWh	0	\$2.0003
Demanda Facturable kW	17.359	\$184.5400

Tabla 14: Importe total.

Conceptos	Importe (\$)
Energía	\$10.49
Demanda Facturable	\$3,203.45
Total	\$3,213.93

Este es el cálculo del costo de energía consumida por una corrida total de calibración. Se inició en 5 Hz con una velocidad en la sección de pruebas del túnel de viento de 4.86 m/s hasta una frecuencia final de 30Hz con una velocidad en la sección de pruebas del túnel de viento de 26.3 m/s.

El costo total del consumo energético para la prueba es de **\$3,213.14**.

4.3. Análisis de resultados.

Se analizaran los resultados del costo de del consumo energético obtenidos en los subcapítulos 4.1 y 4.2. Esto ya que para las pruebas de calibración se realizó cinco pruebas de las cuales se tomaron dos para comparar y corroborar que no hubiera gran diferencia entre una y otra al calcular el costo de calibración.

La tercer prueba se utilizó calculando el costo por cada frecuencia y en la quinta prueba se calculó el costo de una prueba considerando todas las frecuencias ya antes mencionadas. En la figura 42 se puede observar una comparación entre las pruebas ya descritas entre las cuales se puede ver que no existe mucha diferencia de consumo eléctrico. Las diferencias más notables se encuentran en los puntos de 5 Hz en la cual existe una diferencia de 826 Watt, a los 20 Hz en la que hay una variación de 776 Watt siendo mayor la potencia en la prueba cinco; pero al aumentar a una frecuencia de 30 Hz la diferencia es de 1223 Watt siendo mayor el consumo en la tercer prueba.

Estas variaciones como se pueden ver no son tan diferentes y estas variaciones se llegan a dar por las condiciones ambientales que no son las mismas entre un día de prueba y otro. Es posible observar en la figura 42 que estas variaciones de consumo se van intercalando entre frecuencias siendo mayor una a dada frecuencia y viceversa; por lo cual en el consumo energético final entre cada prueba no existe una gran diferencia.

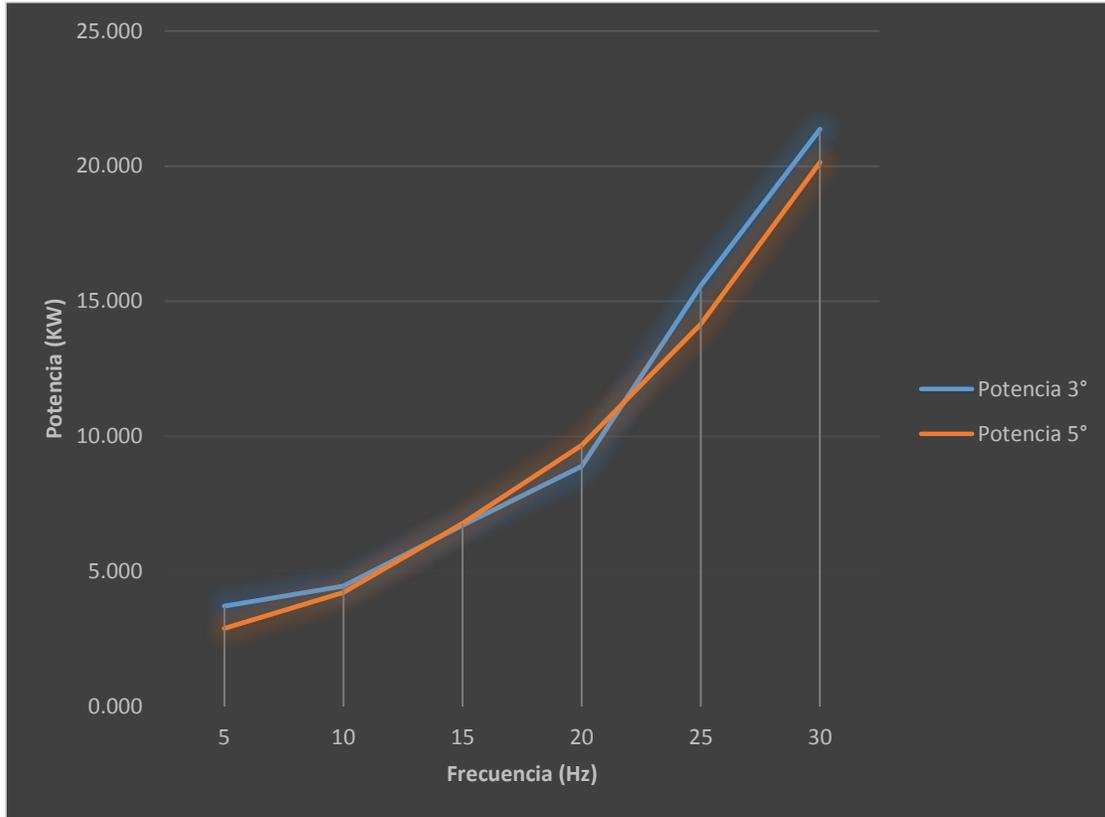


Figura 42: Grafica potencias de las pruebas 3° y 5°.

Como se puede observar hay poca diferencia entre una y otra prueba realizada; esto se puede dar por las condiciones ambientales y el horario de la prueba. Pero también es fácil observar el comportamiento entre una y otra prueba es muy similar por lo que se puede decir que se realizaron de una manera correcta. Esta afirmación se da por el concepto de repetitividad.

En la tabla 15 se muestra la diferencia en pesos que existe entre una prueba y otra la cual es de \$160 pesos. Con lo cual se puede comprobar que las pruebas hechas están bien realizadas al tener datos similares y bastante coherentes.

Tabla 15: Comparación de costos.

	Costo (\$)
1° Prueba	\$10,314.36
2° Prueba	\$11,453.64
3° Prueba	\$11,218.56
4° Prueba	\$13,072.10
5° Prueba	\$10,688.65
Promedio	\$11,349.46

En la figura 43 se muestra el comportamiento que tiene cada prueba con respecto al costo que genera la misma. Y se puede observar que el mayor costo es 15 % más elevado en la 4 prueba y el menor costo es sólo 10% más bajo con respecto al promedio (\$11,349.46) de todas las pruebas realizadas para este proyecto.

Con lo cual se observa que no hay mucha diferencia entre una y otra prueba realizada. Y al tener resultados tan similares se puede tener una gran certidumbre acerca de los resultados obtenidos durante las pruebas realizadas.

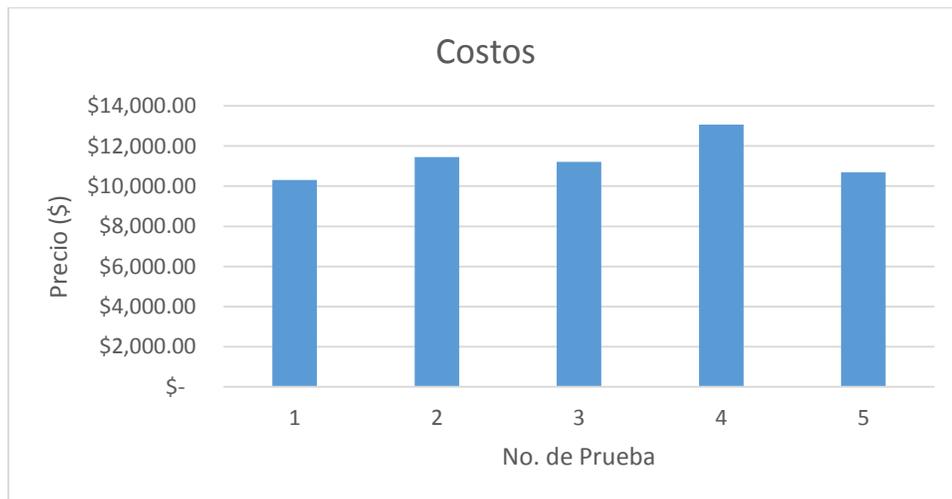


Figura 43: Costos

En la figura 44 se observa el comportamiento que tuvieron las 5 pruebas realizadas durante el proyecto. La cual muestra que en la prueba 1 y la prueba 5 contienen resultados muy similares y únicamente en la prueba 4 hay una desviación mayormente marcada con respecto a las demás. Esto se pudo haber obtenido ya que en la prueba 4 hubo mucho viento del exterior al momento de realizar la prueba lo cual afecta directamente a la instalación del túnel de viento causando fluctuaciones en la velocidad del viento dentro de la zona de pruebas.

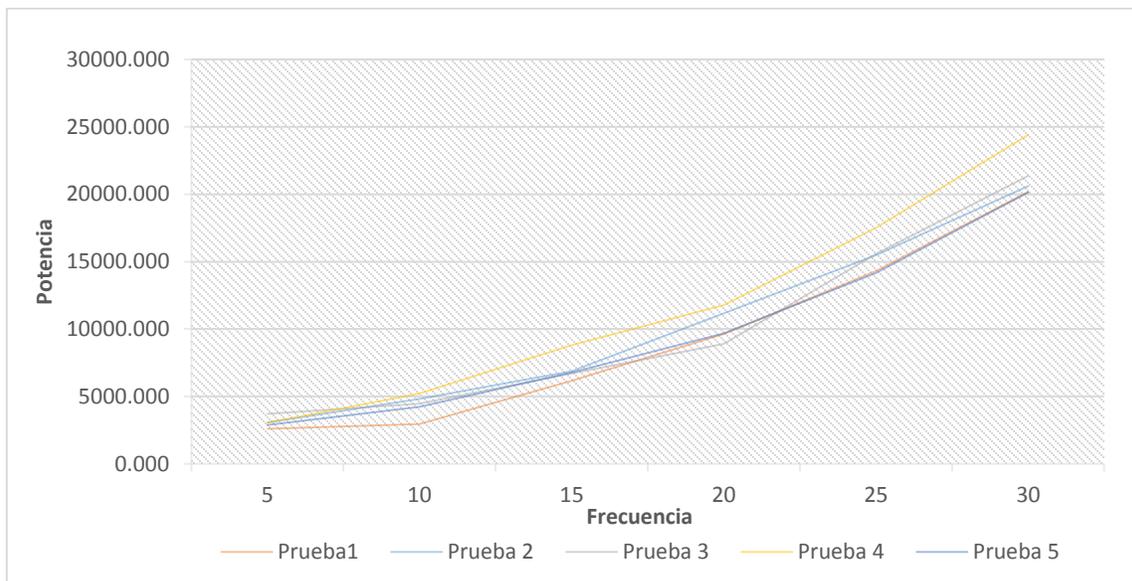


Figura 44: Relación de pruebas

En la figura 45 se muestran los costos de cada frecuencia utilizada durante las pruebas realizadas; las cuales tienen un comportamiento lineal lo cual nos dice que conforme se vaya incrementando la frecuencia de igual forma ira aumentando el valor del costo que se genere por cada una de estas. Es decir a mayor frecuencia el costo será mayor.

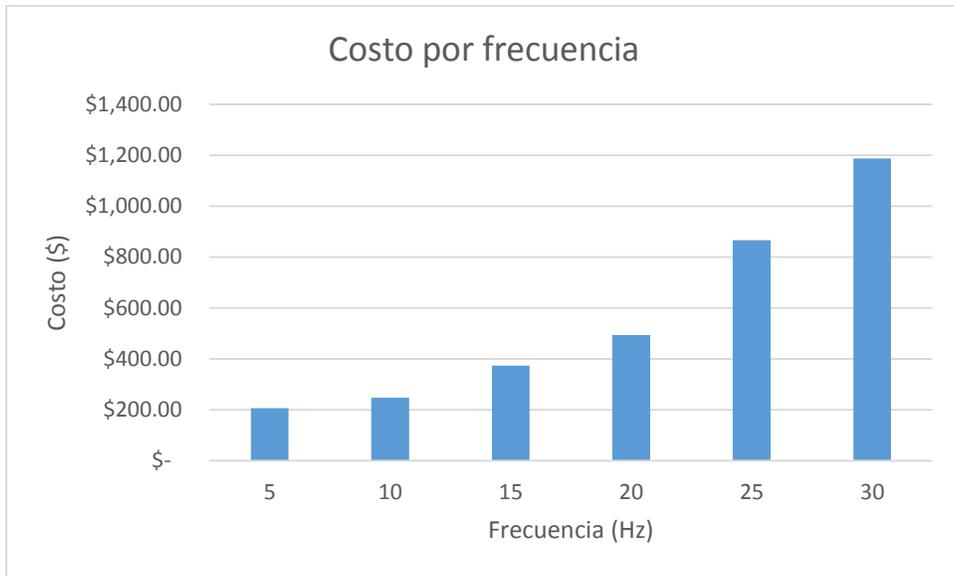


Figura 45: Costos por frecuencia

CONCLUSIONES

Se realizó una metodología para calcular el costo de calibración de instrumentos de velocidad para dos casos: a) un costo individual y, b) un costo total. Por lo que se concluye el costo en relación al consumo energético que demanda el motor el cual genera el flujo de aire durante una calibración completa (de 5 Hz a 30 Hz) está directamente relacionado con el tiempo que dura la prueba. En este caso el tiempo de prueba fue a 10 minutos por cada una de las frecuencias, ya que por experiencia de calibración este valor es en el cual se tienen contemplados instrumentos típicos para la medición del viento, ya que pueden existir instrumentos para propósitos especiales.

Un resultado de importancia que se observó durante las pruebas es que la tensión permaneció constante a diferencia de la corriente que iba en incremento conforme la frecuencia, por consecuencia de esto la potencia incrementaba haciendo que el costo a frecuencias mayores incrementara considerablemente, a los 30 Hz la corriente es aproximadamente ocho veces mayor en la frecuencia inicial de 5 Hz, por lo que es razonable el incremento del costo energético.

Una recomendación que se puede hacer al momento de calibrar un instrumento es que la calibración se haga en un horario intermedio (6 am-6 pm); no es el menos costoso pero es el más factible dado que el horario propuesto coincide con el horario laboral y con esto se reduciría en gran medida no el consumo del motor, si no el valor de la facturación pagado a CFE.

Con todo esto se puede observar de una forma muy clara que los costos de cada prueba son muy parecidos desde la primera hasta la quinta; lo cual indica dice que por el concepto de repetitividad las mediciones fueron correctas. El costo incrementara de acuerdo a la frecuencia que se esté calibrando. Esto es que a una frecuencia de 5 Hz el costo será aproximadamente de \$206.16 y el costo a 30 Hz

será de \$1,186.71 y el costo promedio por una calibración a todas las frecuencias ya mencionadas será aproximadamente de \$11,349.46; aclarando que este costo únicamente contempla el consumo en cuestión de energía eléctrica consumida por las pruebas realizadas.

BIBLIOGRAFÍA

CENAM. (29 de Septiembre de 2014). *CENAM*. Obtenido de <http://www.cenam.mx/resultados/default.aspx?q=patron%20nacional%20>

CFE. (18 de 02 de 2015). Obtenido de http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_negocio.asp?Tarifa=HM

Chapman, S. J. (s.f.). *Maquinas electricas*. Mc Graw Hill.

Drury, A. H. (2013). Voltage Control . En *Electric Motors and Drives*. Elsevier.

Electricidad, C. F. (Diciembre de 2015). *CFE*. Obtenido de http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_negocio.asp

Extech instruments. (Febrero de 2015). Obtenido de <http://www.extech.com/instruments/product.asp?catid=1&prodid=39>

Jewel B., B., William H., R. J., & Pope, A. (1999). *Low Speed Wind Tunnel Testing*. John Wiley & Sons.

Juan Castillo Pedrosa, E. M. (2005). *Instalaciones Electricas Basicas*. Mc Graw Hill.

APENDICE.

Datos Experimentales.

Tablas de trabajo



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA

MECÁNICA Y ELÉCTRICA

UNIDAD PROFESIONAL ADOLFO LÓPEZ MATEOS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Datos experimentales									
Realizo:	Enrique Eugenio C.		Roberto Franco G.		Fecha	Número de prueba	Reviso		
Temperatura ambiente	Presión atmosférica.		Humedad relativa.		11 / 02 / 2015	1	Hora de término.		
10° C	0.7797		31.37%		2:00		3:30		
Frecuencia (Hz)	Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Velocidad (m/s)	Tensión (V)	Corriente (A)	F.P.			
5	2:14	2:24	4.80	153.1	2.05	91			
10	2:27	2:37	8.9	156.7	5.92	95			
15	2:42	2:52	13.1	159.9	8.23	95			
20	2:56	3:06	17.9	153	12.78	96			
25	3:07	3:17	22.7	152.3	19.93	95			
30	3:17	3:27	26.7	152.2	27.13	95			

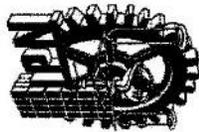


INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD PROFESIONAL ADOLFO LÓPEZ MATEOS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Datos experimentales									
Realizo:	Enrique Eugenio C.	Roberto Franco G.	Fecha	Número de prueba	Reviso				
			13 - 2 - 15	2					
Temperatura ambiente		Presión atmosférica.		Humedad relativa.					
18.7°C	0.7610	44.4%	16:45	16:05	16:05				
Frecuencia (Hz)	Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Velocidad (m/s)	Tensión (V)	Corriente (A)	F.P.			
5	16:50	17:20	4.81	460.3	4.22	91			
10	17:10	17:20	8.9	462.6	6.47	93			
15	17:20	17:30	13	463.3	9.01	95			
20	17:30	17:40	17.9	462	14.54	96			
25	17:40	17:50	22.1	459.2	20.47	96			
30	17:50	18:00	26.3	457.9	27.35	95			

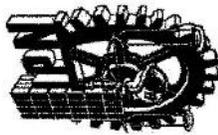


INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
 MECÁNICA Y ELÉCTRICA
 UNIDAD PROFESIONAL ADOLFO LÓPEZ MATEOS
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Datos experimentales									
Realizo:	Enrique Eugenio C.		Roberto Franco G.		Fecha	Número de prueba	Reviso		
Temperatura ambiente	Presión atmosférica.		Humedad relativa.		17/02/2015	3	Hora de término.		
22.37	0.7790		36.2		15:00		17:08		
Frecuencia (Hz)	Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Velocidad (m/s)	Tensión (V)	Corriente (A)	F.P.			
5	16:08	16:18	4.86	452.0	5.21	21			
10	16:18	16:28	9	453.1	6.17	22			
15	16:28	16:38	13.3	456.1	8.85	26			
20	16:38	16:48	18.1	457.3	11.83	25			
25	16:48	16:58	22.6	455.2	20.81	25			
30	16:58	17:08	26.3	456.3	18.16	26			

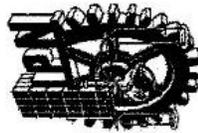


INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD PROFESIONAL ADOLFO LÓPEZ MATEOS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Datos experimentales									
Realizo:	Enrique Eugenio C.	Roberto Franco G.	Fecha	Número de prueba	Reviso				
			2012/15	4	Hora de término.				
Temperatura ambiente	Presión atmosférica.		Humedad relativa.						
23.11	6.7785		35.4						
Frecuencia (Hz)	Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Velocidad (m/s)	Tensión (V)	Corriente (A)	F.P.			
5	15:38	15:48	1.85	125.7	7.19	92			
10	15:48	15:58	9	457.3	6.95	95			
15	15:59	16:09	13.1	253.2	11.45	98			
20	16:09	16:19	14.9	252.1	15.20	99			
25	16:19	16:29	22.4	151.4	23.32	96			
30	16:30	16:40	26.4	155.4	31.89	97			



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
 MECÁNICA Y ELÉCTRICA
 UNIDAD PROFESIONAL ADOLFO LÓPEZ MATEOS
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Datos experimentales									
Realizo:	Enrique Eugenio C.		Roberto Franco G.		Fecha		Número de prueba		Reviso
	Presión atmosférica.		Humedad relativa.		20-02-15		5		
Temperatura ambiente	0.7784		31.3		17:00		Corriente		18:10
Frecuencia (Hz)	Inicio de la prueba	Fin de la prueba	Velocidad (m/s)	Tensión (V)					F.P.
5	17:05	17:15	1.84	157.0	3.92		4.5		
10	17:15	17:27	3.9	152.1	3.57		2.5		
15	17:26	17:36	12.9	152.2	4.01		2.6		
20	17:36	17:46	18.9	153.3	1.84		2.6		
25	17:46	17:56	22.5	153.1	1.4		2.5		
30	17:56	18:06	26.5	152.4	2.704		2.5		