



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESPECIALIZACIÓN EN AHORRO Y USO  
EFICIENTE DE LA ENERGÍA.

**TESINA**  
**“ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA  
EN EL PROCESO DE TREFILADO (CONJUNTO  
VARIADOR DE FRECUENCIA-MOTOR) EN  
UNA FÁBRICA METALMECÁNICA”**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
ESPECIALISTA EN AHORRO Y USO  
EFICIENTE DE LA ENERGÍA

**PRESENTA:**

ING. LUIS ARMIN GUTIÉRREZ OSORNIO

**DIRECTOR DE TESINA**

DR. GONZALO SANDOVAL RODRÍGUEZ.



CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, NOVIEMBRE 2018



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Agradecimientos

Al **Fondo Sectorial CONACYT-Secretaría de Energía-Sustentabilidad Energética**, por el fomento al desarrollo de profesionistas comprometidos con el medio ambiente.

A los colaboradores de los **Proyectos de Ahorro de Energía de la Facultad de Ingeniería (PAEFI)**.

A los profesores de la **Especialización en Ahorro y Uso Eficiente de la Energía**.

## ÍNDICE

Introducción.....	4
Capítulo I . Antecedentes .....	5
1.1 Situación actual .....	5
1.1.1 Descripción de la empresa.....	5
1.1.2 Proceso productivo.....	5
1.1.3 Uso de la energía eléctrica.....	8
1.1.4 Línea base energética.....	9
1.2 Planteamiento del problema y justificación .....	12
1.3 Objetivos .....	12
1.3.1 Objetivo general .....	12
1.4 Practicas actuales en el sistema de trefilado .....	13
Capítulo II. Desempeño energético del sistema (variador de frecuencia -motor) .....	16
2.1 Consideraciones normativas .....	16
2.1.1 Clasificaciones de la IEC 61800-9-2 .....	16
2.1.2 Métodos para determinar pérdidas y esquemas de medición.....	18
2.2 Factor de carga y pérdidas en los variadores de frecuencia. ....	20
Capítulo III. Metodología de análisis y resultados.....	24
3.1 Proceso metodológico.....	24
3.2 Mediciones .....	25
3.3 Resultados de la evaluación del factor de carga y pérdidas en el variador de frecuencia.....	26
Capítulo IV. Análisis de alternativas.....	30
4.2. Análisis de rentabilidad (análisis económico).....	33
Capítulo V. Conclusiones .....	35
Referencias .....	36
Anexo 1 ficha técnica del variador actual modelo CIMR-F7U4132.....	38
Anexo 2 ficha técnica del variador propuesto YASKAWA Modelo CIMR-F7 U4090. ....	39
Anexo 3 ficha técnica del variador propuesto ABB ACS880-01-180A-5.....	40
Anexo 4 ficha técnica del variador propuesto SIEMENS Modelo 6SL3224-0BE38-8UA0. 41	41
Anexo 5. Aspectos básicos para evaluar la eficiencia energética de un sistema Variador de frecuencia-Motor .....	42

---

## Introducción

El presente trabajo contiene un análisis energético para una fábrica del ramo metalmeccánico, cuya actividad principal es la elaboración de clavos, alambre recocido y malla electrosoldada. El interés por este análisis surge debido a que la empresa no conoce el grado de desempeño energético con el que se lleva a cabo los procesos de producción.

La identificación de los equipos instalados, así como la caracterización de los equipos de mayor consumo de energía, son algunas de las herramientas que permiten analizar el desempeño energético en la fábrica, ubicando así las áreas o procesos que tienen mayor oportunidad en la mejora de la eficiencia energética, lo cuál puede derivar en una reducción en los costos de operación. Bajo esa óptica se implementa una metodología que consiste en identificar el proceso más representativo, y una vez que ya se ha identificado se realiza un análisis con la finalidad de determinar la eficiencia con la que operan dichos equipos.

La particularidad de este trabajo es la introducción de la norma internacional de reciente publicación (IEC 61800-9-2) que evalúa la eficiencia del conjunto variador de frecuencia-motor, dicho conjunto es parte del sistema más representativo en cuanto a consumo de energía eléctrica en la fábrica; sin embargo al momento de la visita a la fábrica no se contaba con el conocimiento de dicha norma, la cuál no es de acceso público, por lo que la información mencionada respecto a dicha norma es resultado de la investigación de documentos que hacen referencia de manera indirecta y ayudan a contextualizar el uso de la misma. Dicho lo anterior, el análisis al sistema más representativo tiene como alcance únicamente al variador de frecuencia identificando así factores que afectan su desempeño energético.

Los resultados obtenidos se agrupan en una propuesta económica sobre el reemplazo de los variadores en las líneas más críticas del proceso de trefilado, así como recomendaciones del uso eficiente de la energía en dicho proceso. Como anexo informativo (ANEXO 6) y parte fundamental de este trabajo, se proporcionan los aspectos básicos para evaluar la eficiencia energética de un sistema variador de frecuencia-motor desde la perspectiva de la norma IEC 61800-9-2, de tal forma que cualquier persona que desee analizar dicho sistema utilice este anexo como herramienta introductoria al uso de la norma.

## Capítulo I . Antecedentes.

### 1.1 Situación actual

#### 1.1.1 Descripción de la empresa

La empresa objeto del estudio está situada en un parque industrial de la ciudad de Puebla, ésta fue fundada en 1985 y desde entonces se ha especializado en la fabricación de material para la construcción, iniciando con la fabricación de clavos hasta posteriormente productos tales como: alambón, alambre pulido, alambre recocido, malla electrosoldada, castillo electrosoldado, estribo y varilla corrugada.

La planta cuenta con un área de 8,250 m<sup>2</sup>, donde se distribuye principalmente el maquinado, terminado y almacén, este último el de mayor área. Además cuenta con un área de oficinas y un área de servicios como, baños, vestidores y comedor para los empleados. El horario de producción de la planta es de lunes a viernes las 24 horas, y sábado de 8 a 14 horas.

#### 1.1.2 Proceso productivo

- Proceso de trefilado: Consiste en reducir progresivamente la sección inicial de un alambre, haciéndolo pasar por el orificio de un dado calibrado cuya sección es inferior a la del alambre que se va a degradar. El alambre es llevado a cada dado mediante tracción mecánica originada por motores eléctricos acoplados. Dicho proceso es el más representativo en cuanto al consumo de energía eléctrica y se tiene una línea de proceso de trefilado para cada calibre de la producción de la empresa, por lo que la capacidad de los motores va desde 5 HP hasta 40 HP.
- Claveras: En este proceso se hace pasar un segmento de alambre a una maquinaria, en la cual se segmenta y se deja preparado el producto (clavo). La maquinaria obtiene la dinámica de sus mecanismos a través de un motor eléctrico en cada una de las 12 claveras; las capacidades de los motores en este proceso va de 1.5 HP a 5 HP.
- Pulidoras: Una vez que los clavos se encuentran segmentados, ingresan a un recipiente giratorio en donde se pulen mediante giros programados en intervalos de tiempo. La empresa cuenta con nueve pulidoras y cada una utiliza un motor eléctrico cuya capacidad va de 1.5 HP a 5 HP.

- Electro soldadura: En este proceso se ingresa alambre corrugado en una máquina que suelda la intersección de dos alambres, de modo que se forma una malla que posteriormente es enrollada mediante un motor eléctrico de 5 HP. La empresa cuenta con dos electrosoldadoras y cada una se compone de un motor eléctrico y un sistema de electrodos para llevar a cabo el punto de soldadura.
- Horneado: El alambre proveniente del trefilado es ingresado al horno en donde debe alcanzar una temperatura de re-cocimiento de 820°C, dicho proceso utiliza gas natural para calentar las bobinas de alambre, y también cuenta con un motor eléctrico para el soplador de 5 HP.

En la Tabla 1 se muestra la producción anual expresada en toneladas, se observa que la mayor producción es de alambre recocido, con una producción de 5875 toneladas anuales.

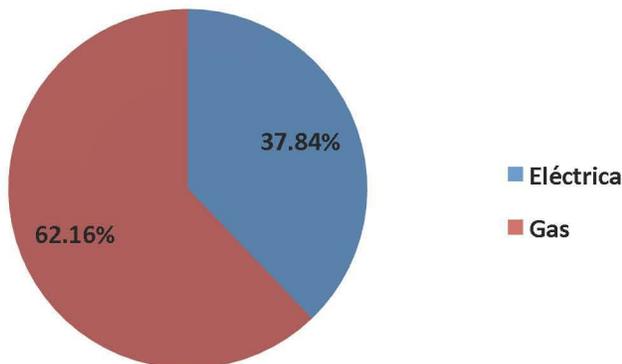
**Tabla 1. Producción anual**

Descripción	Producción anual [Ton]
<b>Alambre Recocido</b>	5,875
<b>Clavo</b>	3,619
<b>Malla Electrosoldada 66/1010</b>	1,646
<b>Malla Electrosoldada 66/66</b>	340
<b>Castillo en hoja</b>	1,005
<b>Total</b>	12,485

Fuente: Elaboración propia con los datos de la empresa

En la empresa se utilizan dos tipos de energéticos para el desarrollo de las diferentes actividades productivas: La energía eléctrica y la energía térmica. La energía térmica derivada del gas LP, su utilidad se centra en el proceso de tratamiento térmico para el alambre recocido. En el Gráfico 1 se puede observar la distribución en el consumo de los energéticos utilizados en la empresa.

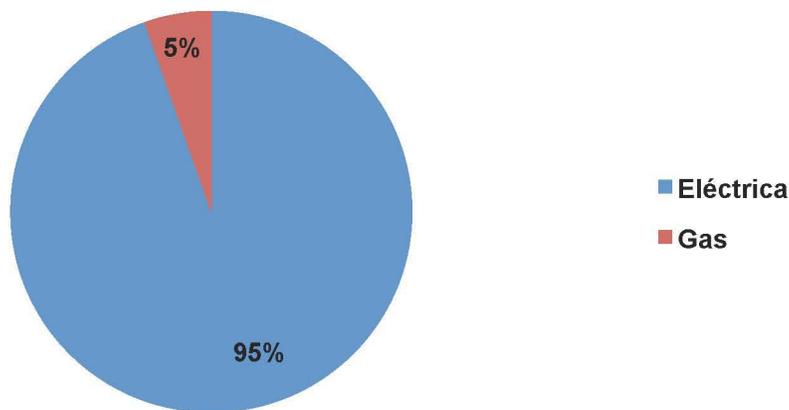
**Gráfico 1**  
**Consumo de Energía Total Oct 16- Sep 17**  
**12,305,567.63 MJ**



Fuente: Elaboración propia con los datos de la empresa

Tal como lo muestra el Gráfico 1, el mayor consumo de energía es en gas, con 64.16% del total del consumo; sin embargo la energía eléctrica es la que representa un mayor costo. En el Gráfico 2 se muestra que la energía eléctrica representa el 95% del costo total de la energía en el periodo de octubre del 2016 a septiembre del 2017.

**Gráfico 2**  
**Costos de la energía**  
**Oct 16- Sep 17**  
**Costo total \$2,822,295.50**



Fuente: Elaboración propia con datos de la empresa

### 1.1.3 Uso de la energía eléctrica

El uso de energía eléctrica en la planta es prioritario, debido a que ésta es utilizada en toda la planta de forma directa o indirecta para llevar a cabo el proceso de producción. El uso de energía eléctrica se divide en tres grupos de cargas eléctricas: iluminación, cargas de oficina (equipo de cómputo, hornos de microondas, cafeteras, etc.) y cargas de fuerza (motores eléctricos).

La carga con mayor capacidad instalada es el sistema de fuerza tal como se muestra en la Tabla 2. Dicho sistema representa el 96.32% del total de la carga instalada, siendo las cargas de iluminación y oficinas prácticamente poco significativas respecto a la de fuerza.

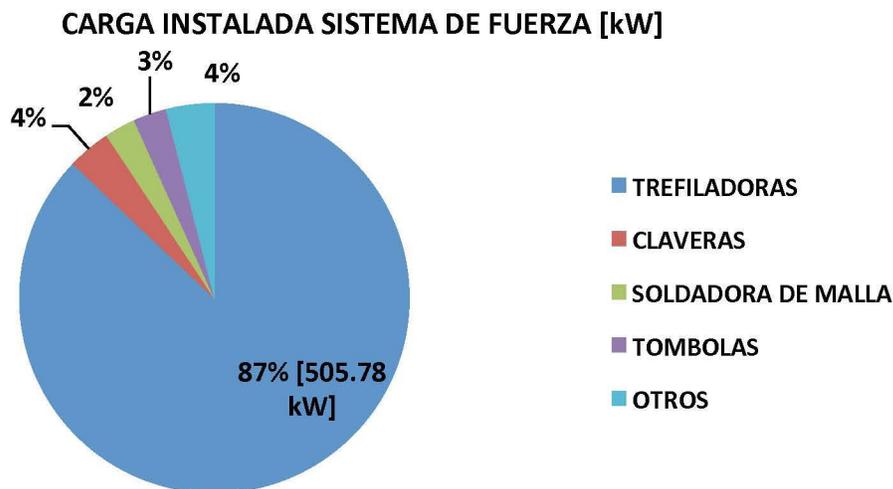
**Tabla 2. Potencia instalada en la planta**

Cargas Eléctricas	POTENCIA INSTALADA	
	[KW]	[%]
<b>Fuerza</b>	588.22	96.32
<b>Iluminación</b>	9.53	2.12
<b>Cargas de oficina</b>	12.95	1.56
<b>Total</b>	<b>610.70</b>	<b>100.00</b>

Fuente: Elaboración propia con datos de la empresa

Los equipos del sistema de fuerza a su vez se dividen de acuerdo al proceso que se lleva a cabo para elaboración de los diferentes productos (Gráfico 3).

**Gráfico 3**



Fuente: Elaboración propia con datos de la empresa

El proceso de trefilado es el más representativo, con 87% del total de la carga de fuerza, esto equivale a una capacidad instalada de 505.788 kW. El resto se conforma por claveras, soldadoras y tombolas.

En cuanto al consumo de energía eléctrica se estima que el sistema de fuerza es el mayor consumidor, seguido del sistema de iluminación y las cargas de oficinas (Tabla 3). Respecto al consumo de energía eléctrica en la planta, el sistema de fuerza representa el 95.24 % del consumo total al año.

**Tabla 3. Consumo estimado en la planta**

Cargas Eléctricas	CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA ESTIMADO	
	[kWh/año]	[%]
<b>Fuerza</b>	1,222,639	95.24
<b>Iluminación</b>	34,680.40	2.70
<b>Cargas de oficina</b>	26,426.84	2.06
<b>Total</b>	<b>1,283,746.08</b>	<b>100.00</b>

Fuente: Elaboración propia con datos de la empresa.

### 1.1.4 Línea base energética

La línea base es el punto de partida para medir el desempeño energético de la empresa, a partir de la información derivada de la revisión energética se puede establecer la línea base obteniendo algunos indicadores de desempeño energético los cuales proporcionan medidas cuantitativas y reflejan el uso y el consumo de energía del proceso, área o equipo donde se define [16]. Con base en lo anterior se generó la línea base para determinar la relación entre toneladas de producción y el consumo de energía eléctrica en la empresa. La línea base se generó partiendo de la facturación mensual de energía eléctrica junto con los datos de producción proporcionados por la empresa, correspondientes al periodo de octubre 2016 a septiembre del 2017.

En la tabla 4 se muestra la información de la producción total y el consumo de energía eléctrica por mes, se observa que no en todo el periodo se obtiene la misma cantidad de producción y que la energía asociada a la producción tampoco se presenta de forma constante.

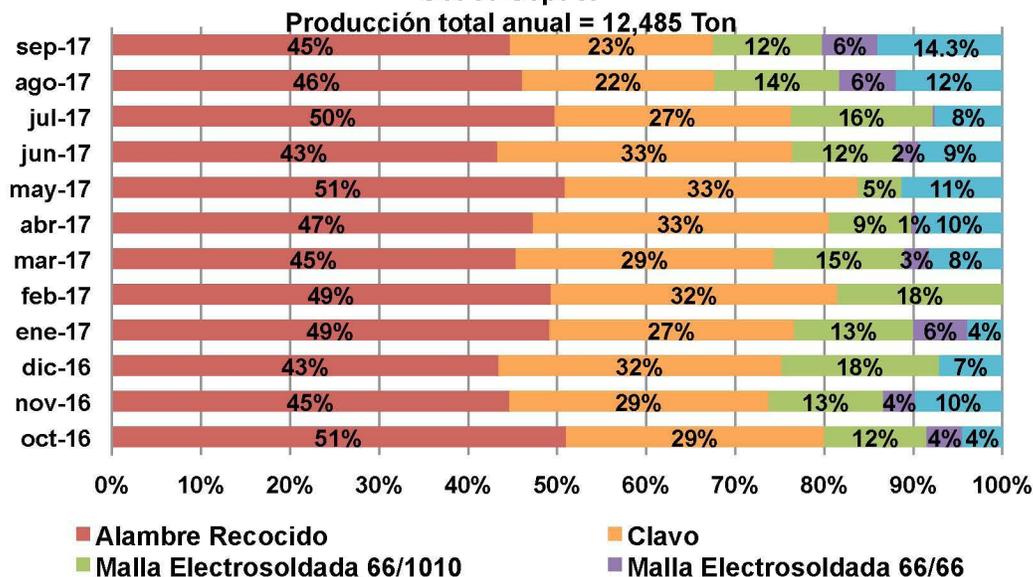
**Tabla 4. Producción y consumo de energía mensual**

Mes	Producción [Ton]	Energía eléctrica [kWh]
Septiembre-17	1,030	113,928
Agosto-17	1,085	114,409
Julio-17	977	109,750
Junio-17	1,060	114,659
Mayo-17	1,012	114,575
Abril-17	905	102,086
Marzo-17	1,167	128,303
Febrero-17	1,050	119,995
Enero-17	1,176	132,844
Diciembre-16	1,060	118,197
Noviembre-16	983	106,303
Octubre-16	980	115,885
<b>Total Anual</b>	<b>12,485</b>	<b>1,283,746.08</b>

Fuente: Elaboración propia con datos de la empresa

En el gráfico 6 se muestra en porcentaje la producción mensual por producto procesado: alambre recocido, clavo, malla electrosoldada 66/1010 y malla electrosoldada 66/66. Se observa que no en todos los meses se producen todos los productos que la empresa elabora. En el caso de el alambre recocido y el clavo mensualmente se presenta una producción más uniforme que el resto de los productos que no se elaboran en la misma proporción a lo largo del periodo de análisis.

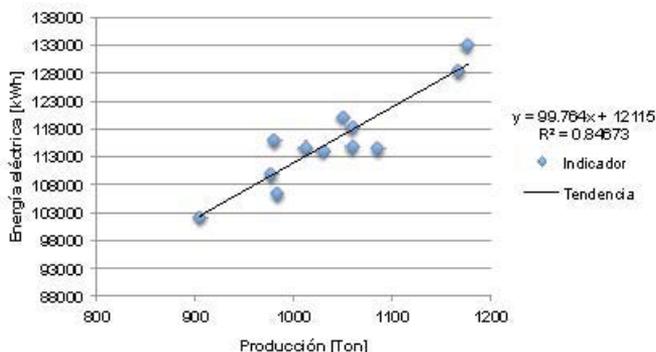
**Gráfico 6**  
**Producción total por tipo de producto**  
**Oct 16-Sept 17**



Fuente: Elaboración propia con datos de la empresa

Con la información mostrada se elaboró la línea base de energía eléctrica (Gráfico 7). Por un lado, el valor de correlación ( $R^2$ ) indica que el 84.67% de la variación de consumo energético se debe directamente a la variación de la producción.<sup>1</sup> En cuanto a la ordenada al origen, ésta representa el valor de energía no asociada a la producción, que en este caso el valor es de 12,115 kWh equivalente al 11% del consumo promedio mensual.

**Gráfico 7**  
**Línea base energía eléctrica**



Fuente: Elaboración propia con datos de la empresa

Por otro lado, la pendiente del modelo de regresión indica que se tiene un consumo promedio de 99.764 kWh por cada tonelada de producción, esto permite tener una referencia para poder comparar cualquier cambio que ocurra en el consumo de energía. Es importante recordar que el proceso de trefilado representa el 76% del consumo de energía eléctrica en el sistema de fuerza, además de que la mayoría de productos pasan por el proceso de trefilado. Por lo tanto, se estima que cualquier medida de ahorro de energía eléctrica en el sistema más representativo podría tener un impacto en el costo de producción.

<sup>1</sup> Los puntos que no se ajustan a la línea de tendencia pueden deberse a la diversificación de la producción mensual entre los productos elaborados.

## 1.2 Planteamiento del problema y justificación

La fábrica metal mecánica en cuestión no conoce el grado de desempeño energético con el que se lleva a cabo los procesos de producción. La identificación de los equipos instalados, así como la caracterización de los de mayor consumo de energía es primordial para identificar las áreas o procesos que tienen mayor oportunidad en la mejora de la eficiencia energética.

El problema se asienta debido a que las líneas de producción se basan en procesos de alto consumo de energía eléctrica con máquinas como pulidoras, claveras, electrosoldadoras y trefiladoras. Donde las capacidades de los motores de las primeras tres van desde 1.5 hasta 5 HP. Sin embargo, en el caso de las trefiladoras las capacidades de los motores van desde los 5 HP y llegan hasta los 40 HP. El proceso de trefilado es el más representativo en cuanto a carga instalada y el consumo de energía eléctrica podría ser alto debido a que todos los productos de esta empresa pasan por el proceso de trefilado.

Por lo anterior, se requiere de un análisis para conocer el desempeño energético del conjunto que compone el proceso de trefilado (variador de frecuencia–motor) y proponer mejoras en la eficiencia energética.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo general

Determinar el grado de eficiencia con la que es utilizada la energía eléctrica en el proceso de trefilado para recomendar medidas de uso eficiente de la energía eléctrica.

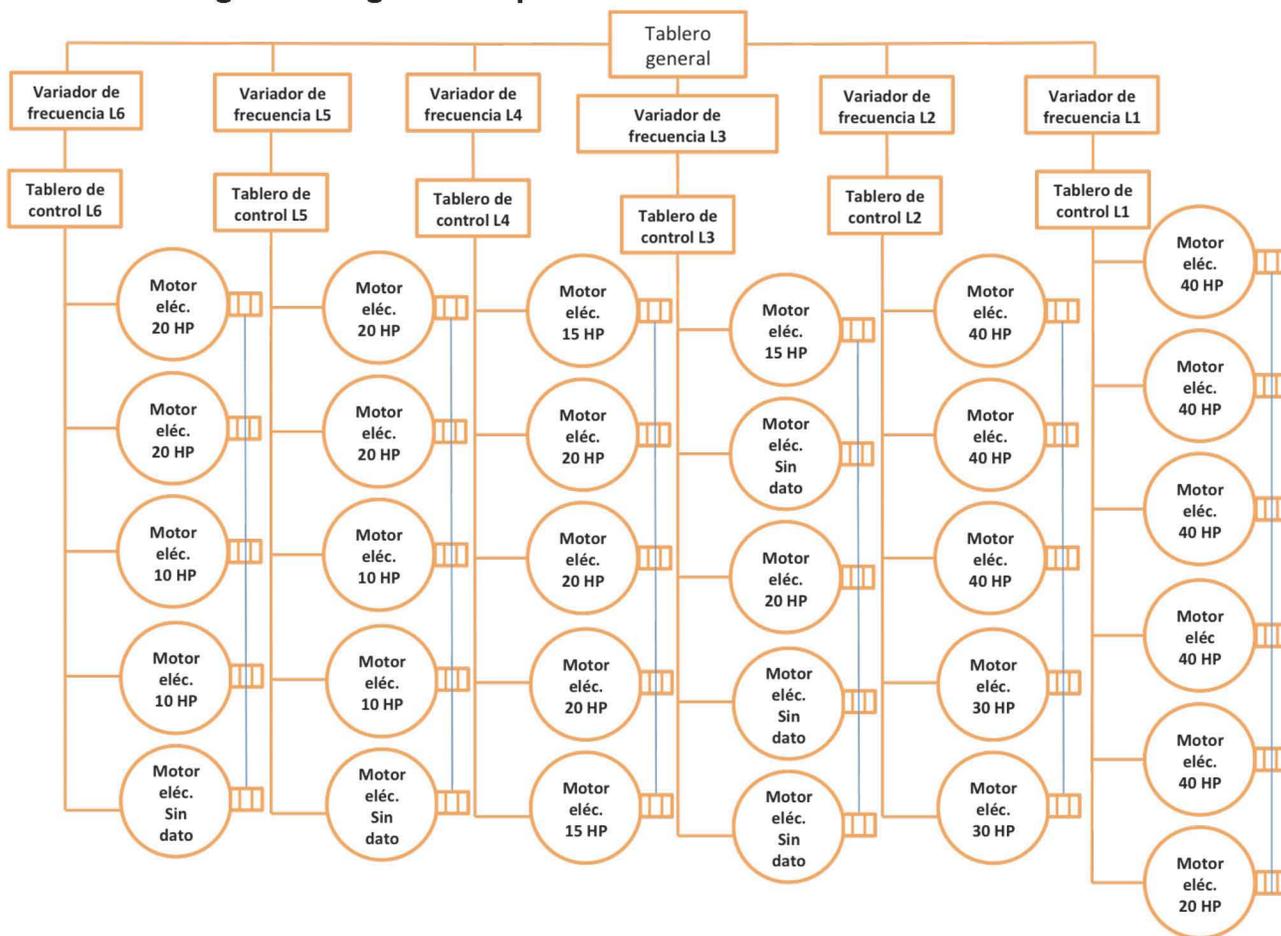
### 1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar el diagnóstico energético para determinar cómo es utilizada la energía eléctrica en el sistema de trefilado.
- Proponer las medidas apropiadas de eficiencia energética basadas en los hallazgos del diagnóstico energético para realizar un análisis técnico económico de las propuestas de ahorro y uso eficiente de la energía.

## 1.4 Practicas actuales en el sistema de trefilado

Como se ha mencionado, el proceso de trefilado es el más representativo, en cuanto a carga instalada y consumo de energía eléctrica. Este proceso consta de seis líneas de producción de acuerdo al calibre que hay que degradar, cinco líneas operan con cinco motores y una con seis motores, a su vez cada línea es controlada por un variador de frecuencia (Imagen 1), el cual ajusta la velocidad de los motores de manera que se acople a la carga.

Imagen 1. Diagrama esquemático del sistema de trefilado



Fuente: Elaboración propia con datos de la empresa

Durante la visita técnica el personal de mantenimiento informó que los motores eléctricos que pertenecen al proceso de trefilado fueron adquiridos hace más de 10 años y su eficiencia es estándar, derivado de la ampliación de las líneas de trefilado, la empresa ha incorporado motores de alta eficiencia (que cumplen con la NOM-016-ENER-2010) al proceso, por tal motivo existe una combinación de motores de eficiencia estándar y alta eficiencia. Una práctica común en la empresa es el rebobinado de los motores eléctricos y en caso de falla de algún motor éste es retirado de la línea de trefilado y es sustituido por otro motor de distinta capacidad; la empresa argumenta que rebobinar les resulta más barato que comprar un motor nuevo y desconocen que al hacerlo los motores pierden eficiencia. También se identificó que la temperatura en la carcasa en algunos motores supera la temperatura de operación que indica la placa de datos, esto podría deberse a la acumulación de polvo en la superficie del motor, otra situación identificada es la mala condición de la instalación eléctrica para algunos motores. Las imágenes 2, 3 y 4 muestran las condiciones actuales de los motores de trefilado, las cuales revelan la falta de mantenimiento.

**Imagen 2. Condición de los conductores eléctricos**



**Imagen 3. Falta de limpieza**



**Imagen 4. Uso de cartón como protección a las aletas del motor**



Fuente: Fotografías tomadas por el autor

La imagen 5 expone que no se tiene un área libre alrededor del motor, significando un riesgo, ya que los objetos pueden obstruir la polea que acopla el motor y el mecanismo de jalado, ocasionando un paro en la producción, poniendo en riesgo al personal y dañando el motor. Algunas de las placas de datos ya no son legibles o se encuentran en mal estado, haciendo que la placa que contiene la información básica y fundamental del motor se desconozca (Imagen6).

**Imagen 5. Acomulación de basura en el espacio del motor**



**Imagen 6. Placa de datos ilegible y placa dañada.**



Fuente: Fotografías tomadas por el autor

Una vez identificadas las condiciones en las que se encuentran los motores en ésta empresa, es necesario evaluar la eficiencia con la que operan; una herramienta para evaluar la eficiencia de los motores eléctricos que se comercializan en México es mediante el proceso propuesto por el Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE) “Metodo de la eficiencia ajustada” [14]; sin embargo, este procedimiento no es aplicable para motores que son alimentados por variadores de frecuencia, como es el caso del sistema de trefilado de la empresa en estudio. Se hace notar que existe una norma internacional de reciente publicación (marzo 2017) la cuál menciona una metodología de análisis de motores alimentados por variadores de frecuencia, pero, desafortunadamente, no se tenía conocimiento de dicha norma cuando se realizó el diagnóstico energético en la empresa.

## Capítulo II. Desempeño energético del sistema (variador de frecuencia -motor)

### 2.1 Consideraciones normativas

En marzo de 2017, la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) publicó un nuevo estándar para equipos de velocidad variable, la IEC 61800: *Accionamientos eléctricos de potencia de velocidad variable. Parte 9-2: Ecodiseño para los accionamientos eléctricos de potencia, arrancadores de motores, electrónica de potencia y sus aplicaciones. Indicadores de eficiencia energética para accionamientos eléctricos de potencia y arrancadores de motores*. Esta nueva norma se refiere a componentes tales como motores, variadores de frecuencia (VFD) y componentes mecánicos (engranajes, correas, frenos, embragues) [3].

IEC 61800-9 (parte 1 y 2) se basa en el estándar europeo EN 50598 (parte 1 y 2), que ha estado en vigor desde 2014; las diferencias entre los dos estándares consisten principalmente en ajustes que abarcan las diferentes tensiones y frecuencias (50 Hz/60 Hz) en todo el mundo [3].

Debido a que durante el desarrollo del presente trabajo no se logró obtener dicha norma, se mencionan aspectos relevantes sobre el tema que se obtuvieron de documentos que hacen referencia de manera indirecta; estos aspectos se presentan a continuación.

#### 2.1.1 Clasificaciones de la IEC 61800-9-2

La IEC 61800-9-2 se focaliza en la interacción de motores con los variadores de frecuencia (VFD), y parte con una clasificación “IE” del convertidor de frecuencia, que la norma denomina “módulo de convertidor completo” o CDM por sus siglas en inglés. El CDM consta del convertidor y de cualquiera de los otros equipos auxiliares conectados a él, como un chopper de frenado o un filtro CEM (compatibilidad electromagnética), o EMC por sus siglas en inglés. La clasificación IE es parecida a la de los motores y va de la IE0 a la IE4. Cuanto más bajo sea el número IE, menos eficiente será el CDM [4].

En segundo lugar se tiene una clasificación del sistema IES para el “sistema de accionamiento de potencia” o PDS por sus siglas en inglés, que es la combinación del motor y el convertidor (Imagen 7).

**Imagen 7. Sistema de accionamiento de potencia (PDS)**



Fuente: Elaboración propia

Esto es algo nuevo y valioso porque, además de la clasificación de eficiencia general, la norma ofrece un conjunto definido de puntos de trabajo en los que se mide la eficiencia del sistema de accionamiento de potencia [4]. En el caso del proceso de trefilado los motores eléctricos no necesitan funcionar a máxima velocidad; basta con que funcionen a carga parcial.

Las mediciones en puntos de trabajo definidos, ofrecen los valores de eficiencia de cargas parciales. Esto significa que se puede prever el uso de energía en un proceso o en una máquina conforme a perfiles de trabajo típicos. Estos datos son sumamente útiles en cualquier situación, desde el momento de tomar las decisiones de compra hasta la creación de presupuestos y de evaluaciones energéticas. Puede utilizarse para determinar la rentabilidad de la inversión e incluso para prever pérdidas de potencia [4].

Las clases IES para el conjunto accionador van de la IES0, la eficiencia más baja, a la IES2, la etiqueta actual de la calificación de eficiencia más alta. En el futuro se definirán más clases IES. Estas clasificaciones nuevas son válidas para motores eléctricos y variadores de frecuencia en el rango de 100 a 1000 V, con una potencia de hasta 1000 kW [4].

Se debe tener en cuenta que las mediciones o los cálculos dependen de lo que produzca el fabricante. Por ejemplo, ABB fabrica tanto motores como variadores, de modo que, conforme a la norma, ABB puede ofrecer valores IE independientes para el CDM y el motor, así como el valor IES para la combinación de un motor y

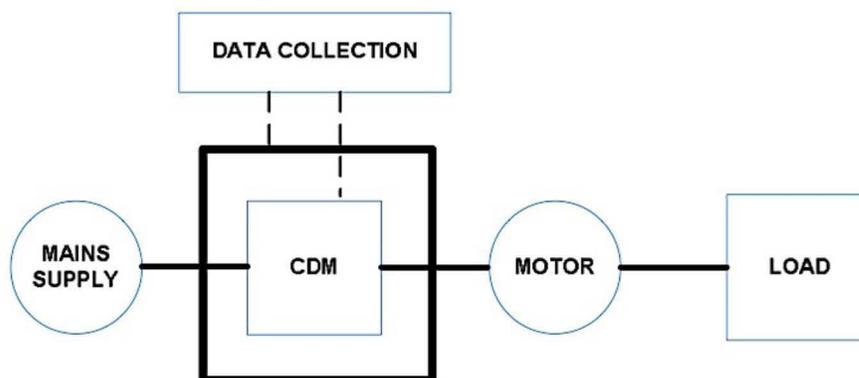
un variador de frecuencia determinados. Para los fabricantes que solo producen el motor o el variador, la norma ofrece modelos de referencia. Esto permite a esos fabricantes sustituir el modelo de referencia que se usará al determinar una clasificación IES del sistema de accionamiento de potencia o PDS [4].

### 2.1.2 Métodos para determinar pérdidas y esquemas de medición

La norma define tres métodos para la determinación de pérdida del CDM y PDS:

1. Cálculo de pérdidas en el CDM y PDS según los modelos matemáticos previstos en la norma, o bien, cada proveedor es libre de utilizar sus propios modelos teóricos o simulaciones para determinar las pérdidas [5].
2. Para la determinación de las pérdidas de los CDM, puede ser utilizado el método calorimétrico cómo se muestra en la Imagen 8 (dicho método se explica en [5]). En ese caso, las pérdidas de energía se miden por medio de refrigeración de flujo y temperaturas. Las condiciones de la prueba son descritas en la norma.

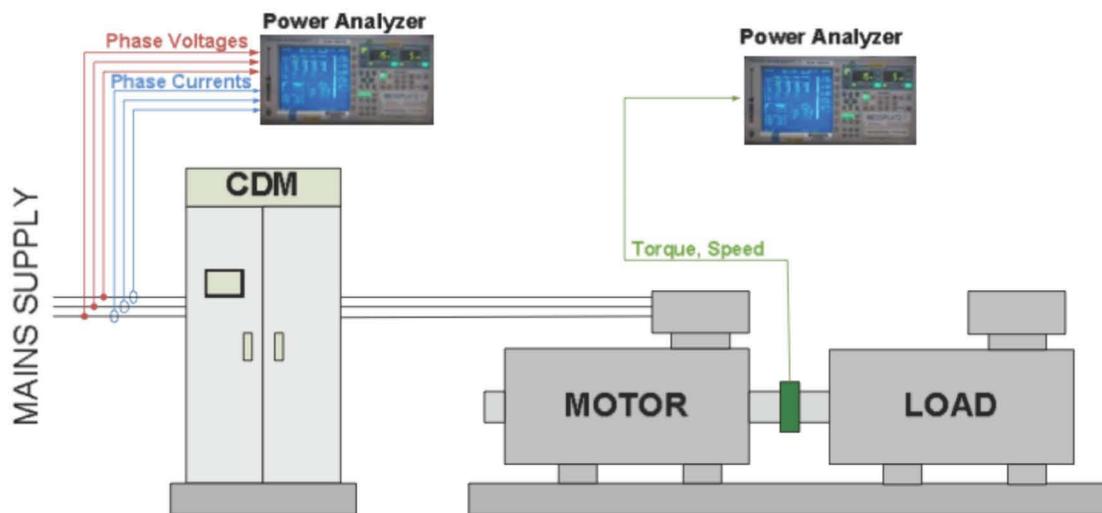
**Imagen 8. Configuración de medición calorimétrica para determinar las pérdidas de CDM**



Fuente: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) [5]

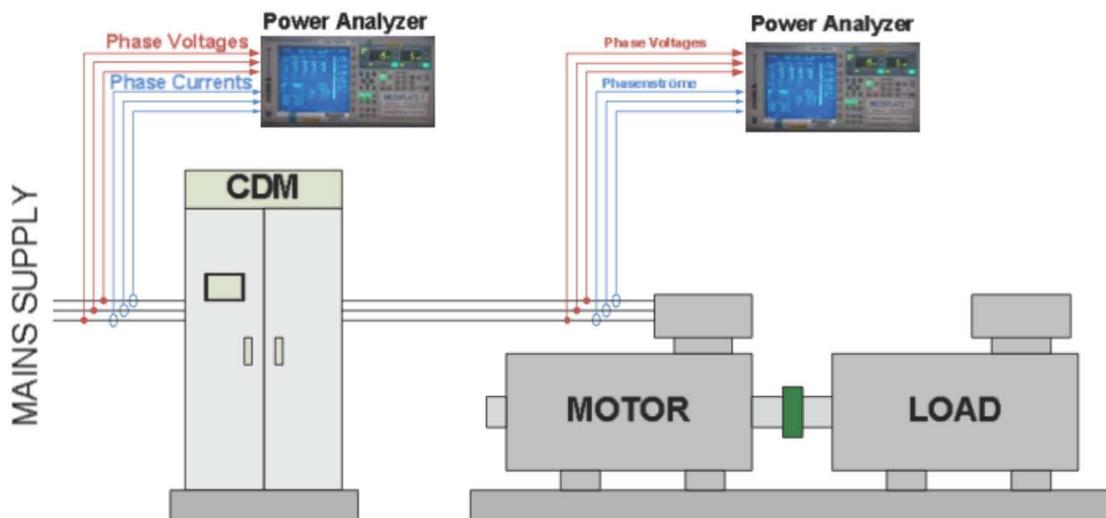
3. Para medir las pérdidas de potencia utilizando el método de entrada-salida, se debe medir la potencia a la entrada y la salida del CDM/PDS como se indica en la Imagen 10, los cálculos son con base en la diferencia de potencia. Para calcular las pérdidas del PDS, se debe medir la potencia eléctrica en la entrada del convertidor así como la potencia mecánica en el eje del motor como lo indica la Imagen 9.

Imagen 9. Método input –output para determinar las pérdidas del CDM



Fuente: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) [5]

Imagen 10. Método input –output para determinar las pérdidas del PDS



Fuente: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) [5]

## 2.2 Factor de carga y pérdidas en los variadores de frecuencia.

Para un motor eléctrico se tiene que la eficiencia es la relación de la potencia mecánica (salida) a la potencia eléctrica (entrada)[15]:

$$\eta = \frac{P_M}{P_E}$$

Pero en el motor se pueden tener dos eficiencias, la nominal, que es la que tiene el motor si opera a sus valores nominales (carga y voltaje), y la de operación, que es la que tiene el motor bajo condiciones reales de operación en sitio[15]:

$$\eta_N = \frac{P_{MN}}{P_{EN}} \quad \eta_O = \frac{P_{MO}}{P_{EO}}$$

El factor de carga eléctrico ( $FC_E$ ) se calcula como la potencia eléctrica de operación ( $P_{EO}$ ) sobre la potencia eléctrica nominal ( $P_{EN}$ ) [15]:

$$FC_E = \frac{P_{EO}}{P_{EN}}$$

La potencia eléctrica de operación es un dato que puede determinarse fácilmente vía mediciones [15]. Elaborando un poco de álgebra se llegará a las siguientes expresiones:

$$FC_M = \frac{\eta_O P_{EO}}{P_{MN} * 746} \quad FC_E = \frac{\eta_N P_{EO}}{P_{MN} * 746}$$

Se observa la relación que tiene el factor de carga eléctrico  $FC_E$  (usando la potencia medida a la entrada) con la eficiencia nominal del equipo, así mismo el factor de carga mecánico se relaciona con la eficiencia de operación; bajo este razonamiento y extrapolándolo a los variadores de frecuencia se tiene que el factor de carga a la entrada del variador ( $FC_{EV}$ ) se puede obtener mediante la potencia de operación a la entrada al variador ( $P_{OE}$ ) entre la potencia nominal a la entrada del variador ( $P_{NE}$ ):

$$FC_{EV} = \frac{P_{OE}}{P_{NV}}$$

Como se conoce la potencia de operación a la entrada entonces se busca quitar la  $P_{NE}$  del factor de carga, entonces la eficiencia nominal del variador es la potencia nominal a la salida entre potencia nominal a la entrada ( $\eta_{NV} = \frac{P_{NS}}{P_{NE}}$ )

Entonces, sustituyendo en  $FC_{EV}$  se tiene:

$$FC_{EV} = \frac{P_{OE}}{P_{NV}} = \frac{P_{OE}}{\frac{P_{NS}}{\eta_{NV}}} = \frac{P_{OE} * \eta_{NV}}{P_{NS}}$$

Entonces de la expresión anterior se concluye que para el cálculo del factor de carga a la entrada del variador la eficiencia que se debe de utilizar es la nominal.

Teniendo en cuenta lo anterior, a continuación se aborda una breve descripción de la operación de los variadores de frecuencia.

El control de velocidad es la mejor manera de acoplar un sistema motriz a las condiciones variables de los procesos involucrados. El variador de frecuencia es un control para el motor de inducción tipo jaula de ardilla, y realiza el control mediante la modulación por ancho de pulso (PWM por su siglas en inglés); este tipo de variadores son actualmente los más empleados para la alimentación de motores de baja tensión en las aplicaciones industriales que requieren variación de velocidad [6].

La gran mayoría de VFD, para baja y media tensión de alimentación utiliza transistores bipolares de puerta aislada (IGBT) interruptores con señales de modulación de ancho de pulso y frecuencia de conmutación de hasta 20 kHz; estos variadores generalmente tienen un alto nivel de eficiencia energética, el rendimiento promedio de un variador de frecuencia va de 92% a un 98% [2], cuya variación depende directamente de la potencia de éste (a mayor potencia mejor rendimiento).

Para identificar la eficiencia a diferentes factores carga de los VFD PWM, existen recursos basados en mediciones reportadas por algunos fabricantes, sin embargo, para el presente trabajo se recurrió a la Tabla 6 extraída de [1], la cual presenta valores de eficiencia para variadores de diversas capacidades que suministran energía a los motores conectados a carga variable o de par constante.

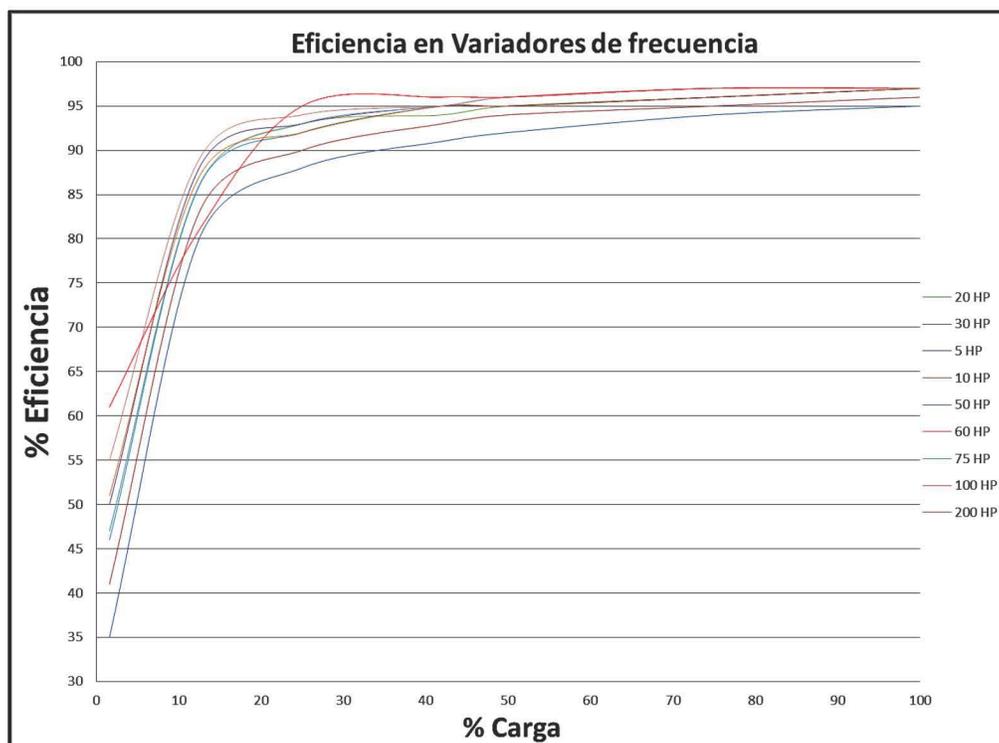
Tabla 6. Eficiencia de diferentes VDF

Rangos de capacidad en HP	% Eficiencia						
	% Factor de Carga						
	1.6	12.5	25	42	50	75	100
5	35	80	88	91	92	94	95
10	41	83	90	93	94	95	96
20	47	86	93	94	95	96	97
30	50	88	93	95	95	96	97
50	46	86	92	95	95	96	97
60	51	87	92	95	95	96	97
75	47	86	93	95	96	97	97
100	55	89	94	95	96	97	97
200	61	81	95	96	96	97	97

Fuente: U.S Department of *Energy* [1]

El gráfico 8 muestra que la eficiencia de los variadores se reduce a bajo factor de carga y cuanto mayor es la capacidad de los variadores es más eficiente.

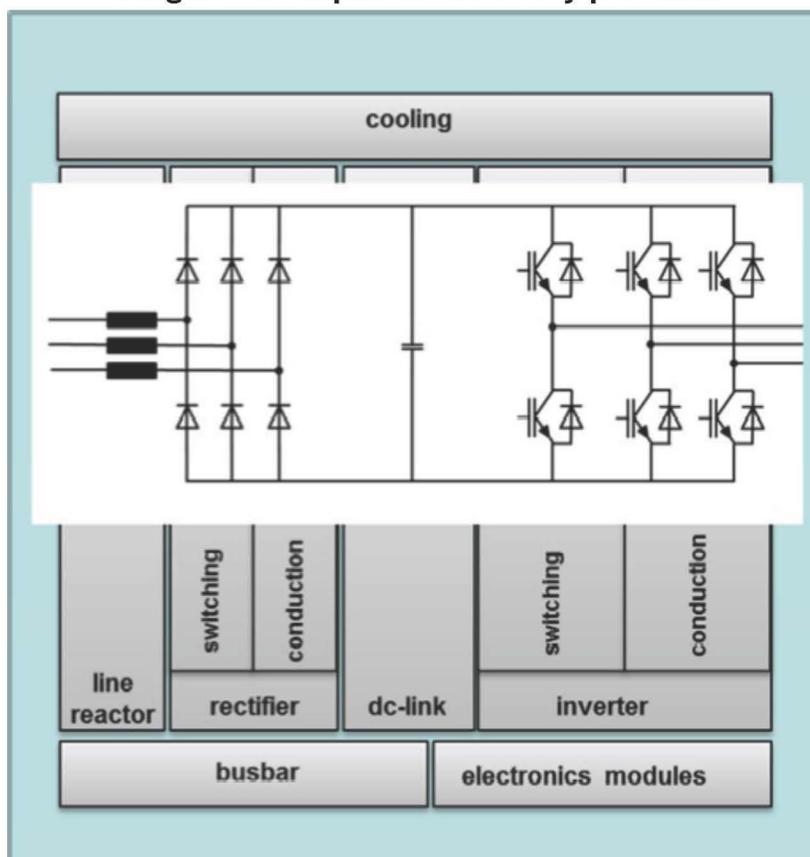
Gráfico 8



Fuente: Fuente: U.S Department of *Energy* [1]

Las pérdidas en los variadores son: pérdidas en la etapa inversora, dependientes de la frecuencia de conmutación y pérdidas en la rectificación de la corriente de línea, así como pérdidas constantes en el circuito de control interno (microcontrolador, fuente de alimentación interna, pantalla, teclado, bus de comunicación digital y analógico, entradas y salidas...) y el sistema de refrigeración [2] [5]. La Imagen 11 muestra las etapas en un inversor y las pérdidas mencionadas.

**Imagen 11. Etapas de un VDF y pérdidas**



Fuente: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) [5]

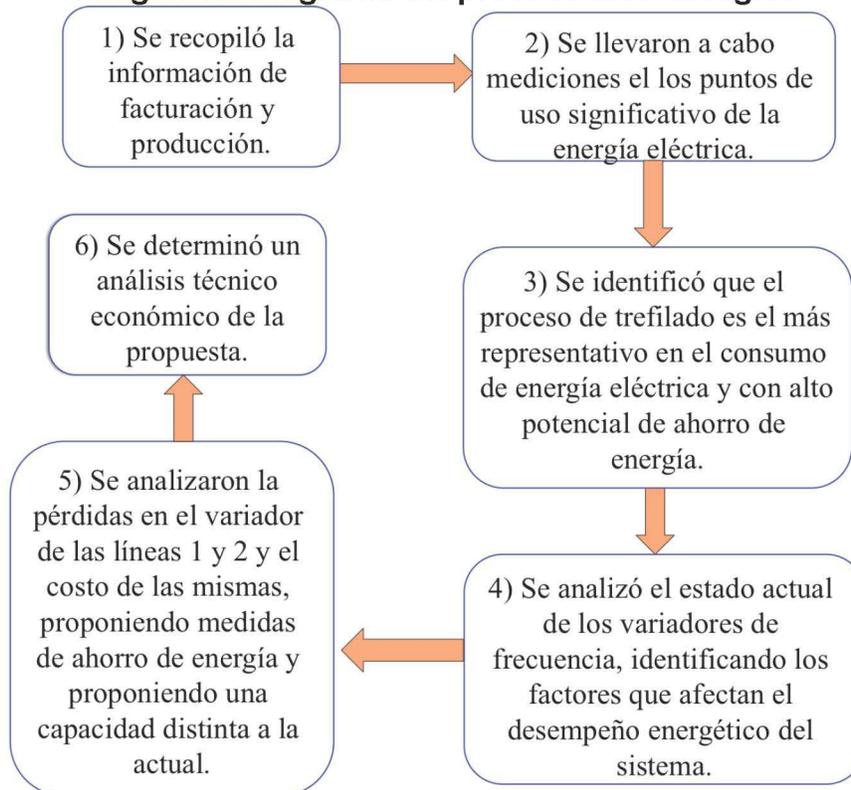
Las pérdidas mencionadas se manifiestan en calor y algunos fabricantes como YASKAWA documentan estas pérdidas en las fichas técnicas, es ahí donde se puede observar que a mayores capacidades de variadores de frecuencia mayores pérdidas por calor. (Ver ficha técnica en el ANEXO 1)

## Capítulo III. Metodología de análisis y resultados

### 3.1 Proceso metodológico

Con la información recopilada, las observaciones vistas en el sitio, se analizó la información derivada de las mediciones; se logró estructurar en una serie de pasos los elementos que permitieron analizar la situación actual e identificar propuestas que permitieran mejorar el desempeño del sistema más representativo de la fábrica. Lo anterior se muestra en la Imagen 12 y se describe a detalle los pasos que se siguieron.

**Imagen 12. Diagrama del proceso metodológico**



Fuente: Elaboración propia

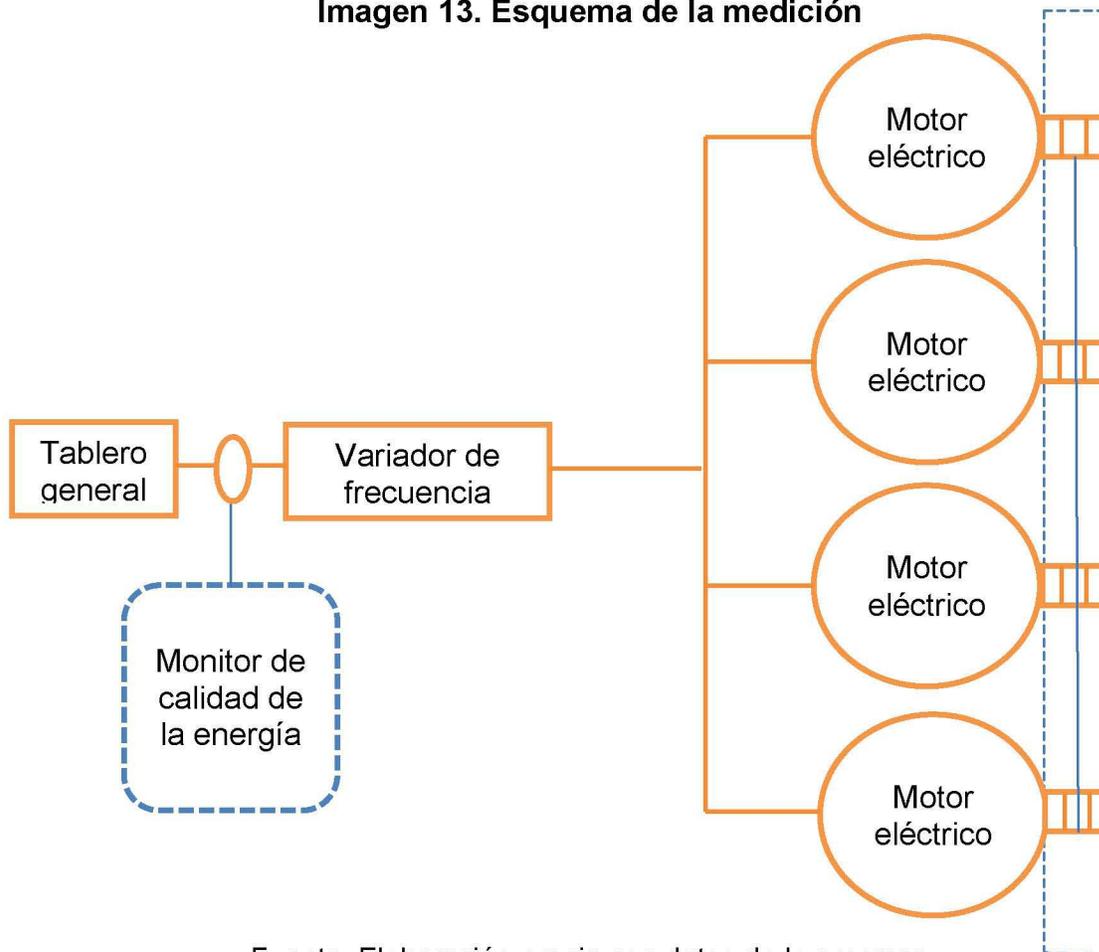
- 1) En esta primera etapa se solicitó a la empresa las facturaciones eléctricas y gas LP, así como datos de producción de doce meses anteriores.
- 2) Se acudió a la empresa a realizar un diagnóstico energético, en el cual se analizó el uso de la energía en los procesos de producción para ubicar puntos de medición; así mismo se observó las condiciones en las que operan los equipos (horas de uso, paros, estado físico condiciones ambientales).

- 3) Después de recabar la información del diagnóstico energético se detectaron cuáles eran los puntos de mayor consumo de energía; en el caso de la energía eléctrica se detectó que el proceso de trefilado es el de mayor carga instalada y consumo eléctrico, así mismo se identificó que tiene alto potencial de ahorro de energía eléctrica.
- 4) Dado que el sistema de trefilado opera con variadores de frecuencia que controlan al grupo de motores de cada línea, y al no tener el conocimiento de la metodología adecuada para evaluar el conjunto variador-motor; se utilizaron las mediciones realizadas para analizar el estado actual de los variadores de frecuencia, identificando factores que afectan el desempeño energético del sistema.
- 5) Con la identificación los puntos que afectan el desempeño del sistema y derivado del análisis se obtuvo que las líneas más representativas del proceso de trefilado (por su capacidad y consumo) son las líneas 1 y 2, de las cuales se analizaron las pérdidas de cada variador respectivamente; proponiendo así medidas de ahorro de energía y la elaboración de una propuesta de cambio a una capacidad adecuada de dichos equipos.
- 6) Finalmente, una vez identificando la capacidad adecuada de los variadores se realizó un análisis técnico-económico de los equipos propuestos.

## 3.2 Mediciones

Debido al alcance del diagnóstico energético elaborado se realizaron mediciones de los parámetros eléctricos en el tablero general de los circuitos de las líneas de trefilado, dichas mediciones se realizaron en un periodo de tiempo de 10 minutos por línea y adicionalmente se inspeccionaron las condiciones físicas de los motores eléctricos como limpieza en el espacio que rodea el motor y el mismo motor, temperatura en la carcasa, conexión de conductores eléctricos, canalizaciones eléctricas datos de placa, así como información sobre la operación proporcionada por los trabajadores que operan las líneas del proceso de trefilado. El esquema de medición que se efectuó se aprecia en la Imagen 13.

**Imagen 13. Esquema de la medición**



Fuente: Elaboración propia con datos de la empresa

### 3.3 Resultados de la evaluación del factor de carga y pérdidas en el variador de frecuencia.

Con las mediciones realizadas se identificó que las líneas de trefilado 1 y 2, por su capacidad instalada y por el consumo registrado, presentan un mayor potencial en medidas de ahorro y uso eficiente de la energía, por lo que se sometieron a un análisis para determinar el factor de carga de los variadores de frecuencia que controlan dichas líneas con el objetivo de evaluar si están sobre-dimensionados y así evaluar las pérdidas que el fabricante indica.

El factor de carga del variador queda expresado de la siguiente forma:

$$F.C \text{ a la entrada del variador de frecuencia} = \frac{P_{medición} [kW]}{P_{nominal} [KW]}$$

Dónde:

$P_{medición} [kW]$  : Es la potencia promedio de la medición realizada a la entrada del variador de frecuencia.

$P_{nominal} [kW]$  : Es la potencia nominal del variador de frecuencia.

Con la información de la ficha técnica se obtuvieron las pérdidas que presentan los modelos de los variadores de la línea 1 y 2 del proceso de trefilado, cabe mencionar que el variador de la línea 1 y 2 es de la misma capacidad y mismo modelo; dichas pérdidas ascienden a 3.393 kW, como se muestra en la Tabla 7.

**Imagen 14. Modelo CIMR-F7U4132.  
Variador de frecuencia de las líneas 1 y 2 (respectivamente)**



Fuente: <https://www.yaskawa.com> Documento TM.F7.01

**Tabla 7. Pérdidas del modelo CIMR-F7U4132**

**F7 Model Number, Enclosure, Heat Loss, and Weight**

Input Voltage 3-Phase	F7 Model Number	Enclosure Style	Weight lb (kg)	Heat Loss (watts)		
				Heatsink	Internal	Total
480 Vac	CIMR-F7U40P4	NEMA Type 1 (IP20)	6.6 (3.0)	14	39	53
	CIMR-F7U40P7	NEMA Type 1 (IP20)		17	41	58
	CIMR-F7U41P5	NEMA Type 1 (IP20)		36	48	84
	CIMR-F7U42P2	NEMA Type 1 (IP20)	8.8 (4.0)	59	56	115
	CIMR-F7U43P7	NEMA Type 1 (IP20)		80	68	148
	CIMR-F7U44P0	NEMA Type 1 (IP20)		90	70	160
	CIMR-F7U45P5	NEMA Type 1 (IP20)		127	81	208
	CIMR-F7U47P5	NEMA Type 1 (IP20)	13.2 (6.0)	193	114	307
	CIMR-F7U4011	NEMA Type 1 (IP20)		232	158	390
	CIMR-F7U4015	NEMA Type 1 (IP20)	22 (10)	296	169	465
	CIMR-F7U4018	NEMA Type 1 (IP20)		389	201	590
	CIMR-F7U4022	NEMA Type 1 (IP20)		420	233	653
	CIMR-F7U4030	NEMA Type 1 (IP20)	53 (24)	691	298	989
	CIMR-F7U4037	NEMA Type 1 (IP20)		801	332	1133
	CIMR-F7U4045	NEMA Type 1 (IP20)	88 (40)	901	386	1287
	CIMR-F7U4055	NEMA Type 1 (IP20)		1204	478	1682
	CIMR-F7U4075	Open Chassis (IP00)		194 (88)	1285	562
	CIMR-F7U4090	Open Chassis (IP00)	196 (89)	1614	673	2287
	CIMR-F7U4110	Open Chassis (IP00)	224 (102)	1889	847	2736
	CIMR-F7U4132	Open Chassis (IP00)	265 (120)	2388	1005	3393
CIMR-F7U4160	Open Chassis (IP00)	352 (160)	2791	1144	3935	
CIMR-F7U4185	Open Chassis (IP00)	572 (259)	2636	1328	3964	
CIMR-F7U4220	Open Chassis (IP00)	616 (279)	3797	1712	5509	
CIMR-F7U4300	Open Chassis (IP00)	891 (404)	5838	2482	8320	

Fuente: <https://www.yaskawa.com> Documento TM.F7.01

Con la información lograda se calcula el factor de carga obtenido en los variadores de la línea 1 y línea 2 (las líneas más representativas del proceso) y las pérdidas del modelo del variador de las respectivas líneas que para ambos casos es de 3.93 kW; nótese que la potencia promedio de entrada no es la misma para cada línea, esto debido a que cada uno controla diferentes capacidades de motores (Tabla 8 y Tabla 9).

**Tabla 8. Resultados obtenidos del VFD de la línea 1**

Variador de frecuencia Trefilado 1 Modelo CIMR-F7U4132		
Potencia promedio de entrada	109.213	kW
Capacidad del VFD	200	kW
Capacidad en HP	200	HP
Factor de carga del VFD	0.55	p.u
frecuencia de operación	45	Hz
capacidad de sobre carga en 60 s	300	kW
Máx potencia registrada	113.563	kW
Pérdidas	3.393	kW

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 9. Resultados obtenidos del VFD de la línea 2**

Fuente: Elaboración propia

<b>Variador de frecuencia Trefilado 2 Modelo CIMR-F7U4132</b>		
<b>Potencia promedio de entrada</b>	107.541	kW
<b>capacidad del VFD</b>	200	kW
<b>capacidad en HP</b>	200	HP
<b>Factor de carga del VFD</b>	0.54	p.u
<b>frecuencia de operación</b>	45	Hz
<b>capacidad de sobre carga en 60 s</b>	300	kW
<b>Máx potencia registrada</b>	112.31	kW
<b>Pérdidas</b>	3.393	kW

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados obtenidos se da cuenta que los variadores de las líneas 1 y 2 del proceso de trefilado están sobredimensionados, para el caso del variador de la línea 1 se opera al 58% de la capacidad del variador y para el variador de la línea 2 se opera al 68% de la capacidad.

Con la ficha técnica del modelo de los variadores se obtuvieron las pérdidas que el dispositivo presenta y se observa que a mayor capacidad de los variadores se presentan mayores pérdidas, en total la línea 1 más la línea 2 presentan 6.786 [kW] de pérdidas, es importante señalar que son pérdidas asociadas al calentamiento de los semiconductores y éstas pueden incrementar si no se cuenta con una adecuada ventilación alrededor del equipo.

## Capítulo IV. Análisis de alternativas

El análisis se realizó considerando un dimensionamiento adecuado a las condiciones de operación basado en las mediciones realizadas y en las observaciones del diagnóstico energético, teniendo como capacidad del variador 140 [kVA], 150 [HP] a 440-480 [V]. Las alternativas planteadas se realizaron considerando tres fabricantes: Yaskawa, ABB y SIEMENS.

Con la propuesta de YASKAWA se obtienen pérdidas de 2.287 kW, mejorando el factor de carga para ambas líneas al 80% y un ahorro de 13,802.88 kWh/año (Tabla 10)

**Tabla 10. Propuesta del variador YASKAWA.**

PROPUESTA YASKAWA		
<b>Variador de frecuencia Trefilado 1 y 2 Modelo CIMR-F7U4090</b>		
Capacidad del VFD	140	kW
Capacidad en HP	150	HP
Capacidad de sobre carga en 60 s	210	kW
Pérdidas para un variador	2.287	kW
Total de pérdidas (VFD línea 1 y VFD línea 2)	4.574	kW
Diferencia de pérdidas de variador actual con el propuesto	1.106	kW
Ahorro anual en consumo de un variador	6901.44	kWh
Ahorro anual en consumo de los dos variadores (línea 1 y 2)	13802.88	kWh
Nuevo factor de carga para L1	0.8	p.u
Nuevo factor de carga para L2	0.8	p.u

Fuente: Elaboración propia con datos de YASKAWA

Con la propuesta de ABB se obtienen 2.31 kW por cada variador y el factor de carga para cada una de las líneas es de 99 % para la línea 1 y para la línea 2 es de 98% y se estima un ahorro de 13,515.84 kWh/año para las dos líneas (Tabla 11), esto es más que la propuesta anterior .

**Tabla 11. Propuesta del variador ABB.**

PROPUESTA ABB		
<b>Variador de frecuencia Trefilado 1 y 2 Modelo ACS880-01-180A-5</b>		
Capacidad del VFD	110	kW
Equivalencia en HP	150	HP
Capacidad de sobre carga en 60 s	165	kW
Pérdidas para un variador	2.31	kW
Diferencia de pérdidas de variador actual con el propuesto	1.083	kW
Ahorro anual en consumo de un variador	6757.92	kWh
Ahorro anual en consumo de los dos variadores (línea 1 y 2)	13515.84	kWh
Nuevo factor de carga L1	0.99	p.u
Nuevo factor de carga L2	0.98	p.u

Fuente: Elaboración propia con datos de ABB

Con la opción de la marca SIEMENS se obtienen pérdidas de 2.43 kW, esta cifra es mayor a las otras opciones , sin embargo se mejoraría el factor de carga al 99% en la línea 1 y 98% en la línea 2 (Tabla 12).

**Tabla 12. Propuesta del variador SIEMENS**

PROPUESTA SIEMENS		
<b>Variador de frecuencia Trefilado 1 y 2 Modelo 6SL3224-0BE38-8UA0</b>		
Capacidad del VFD	110	kW
Equivalencia en HP	150	HP
Capacidad de sobre carga en 60 s	149.6	kW
Pérdidas para un variador	2.43	kW
Diferencia de pérdidas de variador actual con el propuesto	0.963	kW
Ahorro anual en consumo de un variador	6009.12	kWh
Ahorro anual en consumo de los dos variadores (línea 1 y 2)	12018.24	kWh
Nuevo factor de carga L1	0.99	p.u
Nuevo factor de carga L2	0.98	p.u

Fuente: Elaboración propia con datos de Siemens

De las opciones mostradas se observa que las pérdidas por conmutación obtenidas para los tres fabricantes son muy similares, sin embargo, el criterio de selección de la propuesta se eligió por complementos que ofrece ABB respecto a los otros, dichos complementos son:

-Freno regenerativo: La energía de frenado se regenera y se devuelve al convertidor para su posterior distribución a la red de suministro, en vez de perderse en forma de calor. Esto supone un uso más eficiente de energía si se compara con el frenado mecánico y por resistencia que presentan las otras dos opciones.

-Gestión de armónicos: el convertidor produce un nivel de armónicos excepcionalmente bajo, sin necesidad de filtros externos ni transformadores multipulso. Gracias a la eficaz gestión de armónicos, el convertidor alcanza un factor de potencia unitario. La unidad de alimentación activa del convertidor puede reforzar la tensión de salida, lo que garantiza una tensión completa en el motor incluso si la tensión de alimentación está por debajo del valor nominal.

-Funcionalidades de servicio integradas para recopilar datos de servicio.

Con la aplicación Drivebase de ABB, el usuario puede vincular fácilmente el convertidor con el servicio de asistencia de ABB. Si se produce un fallo en el convertidor, se genera un código QR en el panel de control asistente del convertidor. El usuario puede escanear ese código con un dispositivo móvil, que le dará acceso al sitio web de servicio de ABB. Éste envía rápidamente información crítica acerca del error y recomendaciones para solucionar el problema, en vez de tener que recorrer las páginas de un manual. La información anterior se puede consultar en [7].

## 4.2. Análisis de rentabilidad (análisis económico)

El análisis se elaboró con la información obtenida de los recibos de energía eléctrica de la empresa obteniendo un costo ponderado de la energía eléctrica del servicio contratado de acuerdo a la tarifa HM de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) de 1.93 \$/kWh<sup>2</sup>, con este dato se estimó que el costo de las pérdidas anuales en el variador de la línea 1 y de la línea 2 de trefilado, es de \$81,725.16 pesos mexicanos. Con la propuesta del variador ABB esas pérdidas resultan en \$55,639.58 pesos mexicanos (Tabla 13).

**Tabla 13. Tabla de pérdidas**

Pérdidas estado actual			Pérdidas con la propuesta de ABB		
<b>Pérdidas anuales kWh VFD Línea 1</b>	21,172.32	kWh	<b>Pérdidas anuales kWh VFD Línea 1</b>	14,414.40	kWh
<b>Pérdidas anuales kWh VFD Línea 1 y 2</b>	42,344.64	kWh	<b>Pérdidas anuales kWh VFD Línea 1 y 2</b>	28,828.80	kWh
<b>Costo de las pérdidas anuales de VFD línea 1</b>	\$40,862.58	MNX	<b>Costo de las pérdidas anuales de VFD línea 1</b>	\$27,819.79	MNX
<b>Costo de las pérdidas anuales de VFD línea 1 y 2</b>	\$81,725.16	MNX	<b>Costo de las pérdidas anuales de VFD línea 1 y 2</b>	\$55,639.58	MNX

Fuente: Elaboración propia

La diferencia de las pérdidas anuales actuales con las pérdidas de la propuesta y considerando los costos de consumo y demanda, resulta en un ahorro económico de \$31,751.83 pesos mexicanos (Tabla 14).

<sup>2</sup> Costo obtenido mediante la expresión consultado en [14]:

$$\$/kwh \text{ ponderado} = (\text{Fracción base}) (\$/kWh \text{ base}) + (\text{Fracción intermedio}) (\$/kWh \text{ intermedio}) + (\text{Fracción punta}) (\$/kWh \text{ punta})$$

Donde se utiliza la fracción de horas y el costo que corresponde al periodo base, intermedio y punta respectivamente para el año 2017, de acuerdo a la tarifa HM de CFE, aplicable al mes de marzo del mismo año en la región central.

**Tabla 14. Tabla de ahorros**

Ahorros		
<b>Ahorro en demanda para un variador</b>	1.083	kW
<b>Ahorro en demanda para los dos variadores</b>	2.166	kW
<b>Ahorro anual en costo por demanda para un variador<sup>3</sup></b>	\$2,833.128	MNX
<b>Ahorro anual en costo por demanda para dos variadores<sup>2</sup></b>	\$5,666.256	MNX
<b>Ahorro anual en consumo para un variador</b>	6,757.92	kWh
<b>Ahorro anual en consumo para los dos variadores (línea 1 y 2)</b>	13,515.84	kWh
<b>Ahorro anual en costo por consumo para un variador<sup>4</sup></b>	\$13,042.79	MNX
<b>Ahorro anual en costo por consumo para los dos variadores</b>	\$26,085.57	MNX
<b>Ahorro económico para un variador</b>	\$15,875.91	MNX
<b>Ahorro económico anual para los dos variadores</b>	\$31,751.83	MNX

Fuente: Elaboración propia

Consultando el precio del variador propuesto para las líneas 1 y 2 modelo ABB ACS880-01-180A-5 [8] con los ahorros calculados en pesos mexicanos, se obtuvo el periodo simple de recuperación de la inversión. Teniendo como información lo siguientes valores:

$$Inversión\ por\ variador = \$ 162,029.15\ pesos\ mexicanos$$

$$Ahorro\ para\ un\ variador = \$ 15,875.91\ pesos\ mexicanos$$

$$Periodo\ simple\ de\ recuperación = Inversión/ahorro = 10.2\ años$$

Con este resultado no conviene realizar la inversión ya que la vida útil promedio del variador de frecuencia es de 10 años [4], lo correspondiente sería esperar a que alguno de los variadores se estropeará y así llevar a cabo la inversión.

<sup>3</sup> Utilizando el costo por demanda obtenido de los datos de facturación de CFE.

<sup>4</sup> Utilizando el costo ponderado calculado.

## Capítulo V. Conclusiones

Se determinó que el análisis del presente trabajo queda abierto a que se efectúe una medición de forma precisa como lo indica la norma IEC 61800-9-2, ya que el alcance que tuvo el diagnóstico energético en la empresa no permitió llevar a cabo una segunda medición.

Se determinó que los variadores en las líneas de trefilado 1 y 2 están sobredimensionados y es recomendable que opere con un variador a la capacidad correcta ya que las pérdidas a la capacidad adecuada son menores respecto a la capacidad que se tiene actualmente.

Con el análisis elaborado se determinó que los ahorros calculados en energía anualmente, por concepto del cambio de variadores es de 13,515.84 kWh que corresponden a \$26,085.57 pesos mexicanos y el ahorro anual por demanda es de 2.66 kW que equivalen a \$5,666.256 pesos mexicanos; sin embargo se recomienda no cambiar el variador actual en las líneas de trefilado 1 y 2 respectivamente, hasta que sea necesario su reemplazo por falla, ya que si se cambian de inmediato el periodo de recuperación sería de 10.2 años y el tiempo de vida promedio de los variadores de frecuencia son 10 años .

La empresa debe implementar buenas prácticas como es el mantenimiento preventivo a variadores y motores, y la selección adecuada de sus equipos en el proceso de trefilado.

Se recomienda que la empresa reemplace los motores que tienen más de dos rebobinados y los que sean de una eficiencia más baja a la de grado Eficiencia Premium, de igual manera se sugiere el uso de motores aptos para variadores de frecuencia (también llamado “grado variador de velocidad”).

## Referencias

[1] U.S Department of *Energy*.2012.*Adjustable speed drive Part-Load Efficiency*. Motor Sytems Tip Sheet #11.Washington D.C United States. Disponible en: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/motor\\_tip\\_sheet11.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/motor_tip_sheet11.pdf)

[2] Institute of Electrical and Electronics Engineers.2012. *Energy efficiency electric premium motor driven systems*. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion.Quebec Canadá.

[3] Hanigovszki,N.2017. *A new international standard for energy efficiency – IEC61800-9*. Danfoss Drives. Disponible en: <http://www.focusondrives.com/a-new-international-standard-for-energy-efficiency-iec61800-9/>

[4] ABB *¿Cómo se determina la eficiencia de un motor eléctrico y un variador?* Disponible en: <https://new.abb.com/drives/es/eficiencia-energetica/determina-eficiencia-motor-y-variador>

[5] Institute of Electrical and Electronics Engineers.2012. *The European Standard EN 50598-2: Efficiency Classes of Converters and Drive Systems*

[6] Comisión Nacional de Energía Eléctrica. Curso – taller “Promotores de ahorro y eficiencia de energía eléctrica” [en línea]. Guatemala: Marzo del 2010. [Fecha de consulta: 27 de noviembre del 2016]. Módulo IV: Ahorro de energía eléctrica mediante motores de inducción de alta eficiencia. Disponible en: [http://www.cnee.gob.gt/EficienciaEnergetica/FIDE/004%20M%C3%B3dulo%20IV%20\(AEE%20MotMoto%20de%20Inducci%C3%B3n\).pdf](http://www.cnee.gob.gt/EficienciaEnergetica/FIDE/004%20M%C3%B3dulo%20IV%20(AEE%20MotMoto%20de%20Inducci%C3%B3n).pdf)

[7] ABB 2018. Las nuevas funciones de los convertidores ACS880 aumentan los beneficios para el usuario. [Fecha de consulta: 18 de julio 2018] Disponible en: <https://new.abb.com/drives/es/noticias-y-casos-de-exito/beneficios-nuevas-funciones-ac880>

[8] GALCO 2018.Precio de variador de frecuencia. [Fecha de consulta 18 de julio 2018] <https://www.galco.com/buy/ABB/ACS880-01-180A-5>

[9] WEG 2016. Motores de inducción alimentados por convertidores de frecuencia WEG [Fecha de consulta: 18 de julio 2018] Disponible en:

<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motores-de-induccion-alimentados-por-convertidores-de-frecuencia-pwm-50029372-articulo-tecnico-espanol.pdf>

[10] Electro Industria 2008. Algunos criterios de selección de Convertidores de Frecuencia. [Consultado 19 de julio 2018] Disponible en:  
<http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1013>

[11] Schneider-Electric 2018. ¿Qué tipo de aislamiento debe tener un motor para ser compatible con variadores? ¿Un motor clase F qué picos de tensión admite? [Consultado el 18 de julio 2018] Disponible en:  
<https://www.schneider-electric.es/es/faqs/FA133165/>

[12] Mayor Duque, Andrés Mauricio. 2014. *Método de Medición de la Eficiencia en un Motor de Inducción Alimentado por Variador de Velocidad* [Consultado el 11 de julio 2018] Disponible en:  
<http://bdigital.unal.edu.co/49335/1/14638037.2015.pdf>

[13] IEA 2015. Energy efficiency roadmap for electric motors and motor system [Consultado el 11 de julio 2018] Disponible en:  
[https://www.motorsystems.org/files/otherfiles/0000/0184/4e\\_roadmap\\_for\\_motors\\_and\\_vfd\\_oct2015.pdf](https://www.motorsystems.org/files/otherfiles/0000/0184/4e_roadmap_for_motors_and_vfd_oct2015.pdf)

[14] FIDE. Ahorro de energía mediante la evaluación de motores eléctricos. Procedimiento para la evaluación energética de motores eléctricos. [Consultado el 10 de julio 2018] Disponible en:  
<http://www.baldordistribuidora.com/procedimientomotores.pdf>

[15] Sandoval Rodríguez, Gonzalo. 2017. *Apuntes de la clase de metrología*. Facultad de Ingeniería UNAM, Ciudad de México, México.

[16] Rey Martinez Francisco Javier, Velasco Gomez Eloy, Rey Hernández Javier María. 2018. *Eficiencia energética de los edificios. Sistema de gestión energética ISO 50001. Auditorías energéticas*. Madrid España .Ed Paraninfo.

## Anexo 1 ficha técnica del variador actual modelo CIMR-F7U4132.

Model Number CIMR-F7U		4030	4037	4045	4055	4075	4090	4110	4132	4160	4185	4220	4300	
Output ratings	Rated output capacity (kVA)	46.0	57.0	69.0	85.0	110.0	140.0	160.0	200.0	230.0	280.0	315.0	450.0	
	Horsepower* <sup>2</sup>	40	50	60	75	100	125/150	-	200	250	300	350	500	
	Rated output current (A)	60.0	75.0	91.0	112.0	150.0	180.0	216.0	260.0	304.0	370.0	414.0	590.0	
	Overload capacity* <sup>3</sup> (% of rated output current for 60 sec.)	150											150* <sup>3</sup>	150* <sup>3</sup>
	Current limit (% of rated output current)	150											150* <sup>3</sup>	150* <sup>3</sup>
	Carrier frequency* <sup>4</sup>								2kHz					
	Maximum output frequency								300.0Hz					
	Rated output capacity (kVA)	51.0	59.0	73.0	95.0	120.0	140.0	180.0	200.0	230.0	315.0	390.0	510.0	
	Horsepower* <sup>2</sup>	40/50	60	75	100	125	150	200	-	250	300/350	400/450	500+	
	Rated output current (A)	67.2	77.0	96.0	125.0	156.0	180.0	240.0	260.0	304.0	414.0	515.0	675.0	
Normal Duty* <sup>1</sup>	Overload capacity* <sup>3</sup> (% of rated output current for 60 sec.)	107	117	114	108	115	120	108	120	120	107	118	120	
	Current limit (% of rated output current)	120												
	Carrier frequency (kHz)* <sup>5</sup>	8	8	8	5	5	8	5	5	5	2	2	2	
	Maximum output frequency								400.0Hz					
	Maximum output voltage	3-phase, 380, 400, 415, 440, 460 or 480Vac (Proportional to input voltage)												
* <sup>1</sup> The difference between Heavy Duty ratings and the Normal Duty ratings for the Drive are the rated input and output current, overload capacity, carrier frequency, current limit, and maximum output frequency. Parameter C6-01 must be set to value of "0" for Heavy Duty ratings and "2" for Normal Duty ratings. Factory default is Heavy Duty (C6-01=0).														
* <sup>2</sup> Horsepower ratings are based on 230V or 460V NEC Table 430.150. The maximum applicable motor output is given for a standard 4-pole motor. When selecting the actual motor and Drive, be sure that the Drive's rated output current is appropriate for the motor's rated current.														
* <sup>3</sup> Model 2110 has an overload rating of 138% of rated output current for 60 seconds and a current limit rating of 138%. Models 4220 and 4300 have an overload rating of 150% of rated output current for 45 seconds and a current limit rating of 150%.														
* <sup>4</sup> When setting the carrier frequency above the factory default, the Drive must be derated.														
* <sup>5</sup> Heavy Duty ratings for models 2110, 4220 and 4300 are effective in software version VSF103021 and higher.														

Fuente: <https://www.yaskawa.com> Documento TM.F7.01

## Anexo 2 ficha técnica del variador propuesto YASKAWA Modelo CIMR-F7 U4090.

Model Number CIMR-F7U		4030	4037	4045	4055	4075	4090	4110	4132	4160	4185	4220	4300		
Output ratings	Rated output capacity (kVA)	46.0	57.0	69.0	85.0	110.0	140.0	160.0	200.0	230.0	280.0	315.0	450.0		
	Horsepower* <sup>2</sup>	40	50	60	75	100	125/150	-	200	250	300	350	500		
	Rated output current (A)	60.0	75.0	91.0	112.0	150.0	180.0	216.0	260.0	304.0	370.0	414.0	590.0		
	Overload capacity* <sup>3</sup> (% of rated output current for 60 sec.)							150						150* <sup>3</sup>	150* <sup>3</sup>
	Current limit (% of rated output current)							150						150* <sup>3</sup>	150* <sup>3</sup>
	Carrier frequency* <sup>4</sup>								2kHz						
	Maximum output frequency								400.0Hz						
	Rated output capacity (kVA)	51.0	59.0	73.0	95.0	120.0	140.0	180.0	200.0	230.0	315.0	390.0	510.0		
	Horsepower* <sup>2</sup>	40/50	60	75	100	125	150	200	-	250	300/350	400/450	500+		
	Rated output current (A)	67.2	77.0	96.0	125.0	156.0	180.0	240.0	260.0	304.0	414.0	515.0	675.0		
Overload capacity* <sup>3</sup> (% of rated output current for 60 sec.)	107	117	114	108	115	120	108	120	120	107	118	120			
Current limit (% of rated output current)								120							
Carrier frequency (kHz)* <sup>5</sup>	8	8	8	5	5	8	5	5	5	2	2	2			
Maximum output frequency	400.0Hz														
Maximum output voltage	3-phase, 380, 400, 415, 440, 460 or 480Vac (Proportional to input voltage)														
<p>*1 The difference between Heavy Duty ratings and the Normal Duty ratings for the Drive are the rated input and output current, overload capacity, carrier frequency, current limit, and maximum output frequency. Parameter C6-01 must be set to value of "0" for Heavy Duty ratings and "2" for Normal Duty ratings. Factory default is Heavy Duty (C6-01=0).</p> <p>*2 Horsepower ratings are based on 230V or 460V NEC Table 430.150. The maximum applicable motor output is given for a standard 4-pole motor. When selecting the actual motor and Drive, be sure that the Drive's rated output current is appropriate for the motor's rated current.</p> <p>*3 Model 2110 has an overload rating of 138% of rated output current for 60 seconds and a current limit rating of 138%. Models 4220 and 4300 have an overload rating of 150% of rated output current for 45 seconds and a current limit rating of 150%.</p> <p>*4 When setting the carrier frequency above the factory default, the Drive must be derated.</p> <p>*5 Heavy Duty ratings for models 2110, 4220 and 4300 are effective in software version VSF103021 and higher.</p>															

Fuente: <https://www.yaskawa.com> Documento: TM.F7.01

## Anexo 3 ficha técnica del variador propuesto ABB ACS880-01-180A-5

$U_N = 500 \text{ V}$  (range 380 to 500 V). The power ratings are valid at nominal voltage 480 V (0.75 to 350 Hp).

Nominal ratings						Noise level	Heat dissipation	Air flow	Type designation	Frame size
Light-duty use (10% overload for 1 min)			Heavy-duty use (50% overload for 1 min)							
$I_{Ld}$	$P_{Ld}$		$I_{2Hd}$	$P_{Hd}$						
A	Hp	kW	A	Hp	kW	dB(A)	W	cfm		
2.1	1	0.75	1.7	0.75	0.55	46	30	26	ACS880-01-02A1-5	R1
3	1.5	1.1	2.1	1	0.75	46	40	26	ACS880-01-03A0-5	R1
3.4	2	1.5	3	1.5	1.1	46	52	26	ACS880-01-03A4-5	R1
4.8	3	2.2	3.4	2	1.5	46	73	26	ACS880-01-04A8-5	R1
7.6	5	4	5.2	3	3	46	122	26	ACS880-01-07A6-5	R1
11	7.5	5.5	7.6	5	4	46	172	26	ACS880-01-11A0-5	R1
14	10	7.5	11	7.5	5.5	51	232	52	ACS880-01-014A-5	R2
21	15	11	14	10	7.5	51	337	52	ACS880-01-021A-5	R2
27	20	15	21	15	11	57	457	79	ACS880-01-027A-5	R3
34	25	18.5	27	20	15	57	562	79	ACS880-01-034A-5	R3
40	30	22	34	25	18.5	62	667	79	ACS880-01-040A-5	R4
52	40	30	40	30	22	62	907	165	ACS880-01-052A-5	R4
65	50	37	52	40	30	62	1117	165	ACS880-01-065A-5	R5
77	60	45	65	50	37	62	1120	165	ACS880-01-077A-5	R5
96	75	55	77	60	45	67	1295	256	ACS880-01-096A-5	R6
124	100	75	96	75	55	67	1440	256	ACS880-01-124A-5	R6
156	125	90	124	100	75	67	1940	265	ACS880-01-156A-5	R7
180	150	110	156	125	90	67	2310	265	ACS880-01-180A-5	R7
240	200	132	180	150	110	65	3300	324	ACS880-01-240A-5 <sup>4</sup>	R8
302	250	187.5	260	200	132	68	4200	677	ACS880-01-302A-5 <sup>3</sup>	R9
361	300	200	302	250	188	68	4800	677	ACS880-01-361A-5 <sup>6</sup>	R9
414 <sup>1)</sup>	350	250	361 <sup>2)</sup>	300	200	68	6000	677	ACS880-01-414A-5 <sup>5</sup>	R9

Fuente: [https://library.e.abb.com/public/3d37392c24534d28b001fc8c0cd85646/3AUA0000139403\\_REVL.pdf?x-sign=uwzqc9Rm/JUDoCeXOkKkpDGIIxysr/IBrbVmAtFkDOjSXj8NoAunjS3QhcGzgLs](https://library.e.abb.com/public/3d37392c24534d28b001fc8c0cd85646/3AUA0000139403_REVL.pdf?x-sign=uwzqc9Rm/JUDoCeXOkKkpDGIIxysr/IBrbVmAtFkDOjSXj8NoAunjS3QhcGzgLs)

## Anexo 4 ficha técnica del variador propuesto SIEMENS Modelo 6SL3224-0BE38-8UA0

Tabla de selección									
Potencia asignada <sup>1)</sup>		Intensidad de salida asignada <sup>2)</sup> I <sub>n</sub>	Potencia basada en intensidad con carga básica <sup>3)</sup>		Intensidad con carga básica <sup>3)</sup> I <sub>H</sub>	Tamaño	SINAMICS G120 Power Module PM240 sin filtro de red integrado	SINAMICS G120 Power Module PM240 con filtro de red integrado de clase A	
kW	hp		kW	hp			A	Referencia	Referencia
3 AC 380 ... 480 V									
0,37	0,50	1,3	0,37	0,50	1,3	FSA	6SL3224-0BE13-7UA0	–	
0,55	0,75	1,7	0,55	0,75	1,7	FSA	6SL3224-0BE15-5UA0	–	
0,75	1,0	2,2	0,75	1,0	2,2	FSA	6SL3224-0BE17-5UA0	–	
1,1	1,5	3,1	1,1	1,5	3,1	FSA	6SL3224-0BE21-1UA0	–	
1,5	2,0	4,1	1,5	2,0	4,1	FSA	6SL3224-0BE21-5UA0	–	
2,2	3,0	5,9	2,2	3,0	5,9	FSB	6SL3224-0BE22-2UA0	6SL3224-0BE22-2AA0	
3,0	4,0	7,7	3,0	4,0	7,7	FSB	6SL3224-0BE23-0UA0	6SL3224-0BE23-0AA0	
4,0	5,0	10,2	4,0	5,0	10,2	FSB	6SL3224-0BE24-0UA0	6SL3224-0BE24-0AA0	
7,5	10	18	5,5	7,5	13,2	FSC	6SL3224-0BE25-5UA0	6SL3224-0BE25-5AA0	
11,0	15	25	7,5	10	19	FSC	6SL3224-0BE27-5UA0	6SL3224-0BE27-5AA0	
15,0	20	32	11,0	15	26	FSC	6SL3224-0BE31-1UA0	6SL3224-0BE31-1AA0	
18,5	25	38	15,0	20	32	FSD	6SL3224-0BE31-5UA0	6SL3224-0BE31-5AA0	
22	30	45	18,5	25	38	FSD	6SL3224-0BE31-8UA0	6SL3224-0BE31-8AA0	
30	40	60	22	30	45	FSD	6SL3224-0BE32-2UA0	6SL3224-0BE32-2AA0	
37	50	75	30	40	60	FSE	6SL3224-0BE33-0UA0	6SL3224-0BE33-0AA0	
45	60	90	37	50	75	FSE	6SL3224-0BE33-7UA0	6SL3224-0BE33-7AA0	
55	75	110	45	60	90	FSF	6SL3224-0BE34-5UA0	6SL3224-0BE34-5AA0	
75	100	145	55	75	110	FSF	6SL3224-0BE35-5UA0	6SL3224-0BE35-5AA0	
90	125	178	75	100	145	FSF	6SL3224-0BE37-5UA0	6SL3224-0BE37-5AA0	
110	150	205	90	125	178	FSF	6SL3224-0BE38-8UA0	–	
132	200	250	110	150	205	FSF	6SL3224-0BE41-1UA0	–	
160	250	302	132	200	250	FSGX	6SL3224-0XE41-3UA0	–	
200	300	370	160	250	302	FSGX	6SL3224-0XE41-6UA0	–	
250	400	477	200	300	370	FSGX	6SL3224-0XE42-0UA0	–	

1) Potencia asignada de acuerdo con la intensidad de salida asignada I<sub>n</sub>. La intensidad de salida asignada I<sub>n</sub> se basa en el ciclo de carga para sobrecarga leve (light overload LO).  
2) La intensidad de salida asignada I<sub>n</sub> se basa en el ciclo de carga para sobrecarga leve (light overload LO). Estos valores de intensidad son válidos para 400 V y figuran en la placa de características del Power Module.  
3) La intensidad con carga básica I<sub>H</sub> se basa en el ciclo de carga para sobrecarga alta (high overload HO).

Fuente: [http://siemensmexico.com.mx/descargables/Variadores\\_de\\_Velocidad.pdf](http://siemensmexico.com.mx/descargables/Variadores_de_Velocidad.pdf)

## Anexo 5. Aspectos básicos para evaluar la eficiencia energética de un sistema Variador de frecuencia-Motor

Los aspectos que se consideran en este anexo derivan de la investigación y de la lección aprendida en el presente trabajo de tesina. El principal aspecto a considerar es el uso de la norma IEC61800-9-2 “Indicadores de eficiencia energética para accionamientos eléctricos de potencia y arrancadores de motores”, la cual pone en práctica las pautas definidas en la Parte 1(IEC 61800-9-1:2017“Requisitos generales para establecer normas de eficiencia energética para accionamientos eléctricos de potencia utilizando la aproximación de producto extendido (EPA) y el modelo semianalítico (SAM)”); además de Definir los procedimientos y los puntos de funcionamiento que se deben utilizar para determinar las pérdidas de los variadores de frecuencia y sistemas de accionamiento (conjunto variador-motor), así como las clases de eficiencia energética para tensiones inferiores a 1 kV y potencia nominal de hasta 1 MW [5]. El siguiente esquema muestra la propuesta para evaluar el conjunto VFD-Motor que se encuentre en operación.

Imagen 15. Esquema propuesto para la evaluación del sistema VFD-Motor



Fuente: Elaboración propia

## **-Revisión de los aspectos medioambientales**

Al igual que los motores eléctricos convencionales, los variadores de velocidad tienen un sistema de refrigeración que depende de la ventilación. De esta manera, las condiciones de altura sobre el nivel del mar y temperatura ambiente afectarán positiva o negativamente la refrigeración del variador [10].

Usualmente deberá hacerse una disminución de potencia efectiva del equipo si se sobrepasan las condiciones de norma (1000 msnm y 40°C). También se tienen otros aspectos asociados como son las características propias del aire ambiente. Dentro de éstas podemos mencionar [10]:

- Polvo magnético
- Polvo conductivo
- Humedad
- Área clasificada

Se recomienda verificar que los variadores de velocidad se encuentren instalados dentro de tableros o gabinetes que deben cumplir con algunas características mínimas establecidas por el fabricante. Para que el equipo tenga un funcionamiento libre (en lo posible) de errores, las recomendaciones del fabricante deben seguirse detalladamente según el manual de usuario.

A menos del 50% de la velocidad nominal, el motor estándar reduce su capacidad de refrigeración por disminuir el caudal de aire: si la carga asociada es estrictamente de torque constante, se hará necesario dar al motor un medio de ventilación independiente. A menos del 10%, el torque producido por el conjunto VFD-motor se ve reducido en variadores convencionales. Algunos fabricantes ofrecen control vectorial, mediante el cual el dispositivo determina (por cálculo o por medición directa) el torque necesario para la carga[10].

## **-Revisión de aspectos en la instalación eléctrica**

Los factores predominantes para la incidencia de picos de tensión en las terminales del motor alimentado por convertidor son el *rise time* (*tiempo de respuesta*) y el largo del cable. El cable puede ser considerado una línea de transmisión, es decir, impedancias distribuidas en secciones de inductancias, capacitancias conectadas en serie-paralelo. A cada pulso, el convertidor entrega energía al cable cargando estas inductancias y capacitancias[9].

La señal llega al motor a través del cable y es parcialmente reflejado, ocasionando sobretensión, pues la impedancia de alta frecuencia en la entrada del motor es mayor que la impedancia del cable. Las longitudes largas de conductores alimentadores generalmente incrementan el valor del *overshoot* (sobre carga) en los terminales del motor. De acuerdo con el *NEMA Application Guide for AC ASD Systems*, con los IGBTs los *overshoots* empiezan a aparecer a partir de 3 m de longitud del cable, pudiendo llegar a 2 veces el valor de la tensión de la fuente para una longitud de cable de hasta 15 m. Este comportamiento varía en función del patrón de pulsos PWM, del *rise time* y del propio tipo de cable. Los filtros de salida  $dV/dt$  son la solución más rentable para garantizar la protección del motor y reducir el impacto de las sobrecargas sobre los variadores de velocidad. Estos filtros reducen los valores de  $dV/dt$  y minimizan así el efecto de las sobretensiones y capacitancias entre fases. Si más de un motor es conectado al mismo convertidor, puede ocurrir *overshoot* debido a la reflexión entre motores. Esta situación es tan peor cuanto mayor es el largo del cable entre el convertidor y el punto común de conexión de los motores [9].

Con lo descrito anteriormente se recomienda evaluar la longitud de los conductores, así como revisar el estado en que se encuentran las conexiones de los conductores a los equipos, las protecciones eléctricas, el aislamiento del conductor (o conductores), las canalizaciones y en general verificar el buen estado de los elementos que conforman la instalación eléctrica del sistema VFD-Motor.

### **-Revisión de las condiciones de diseño**

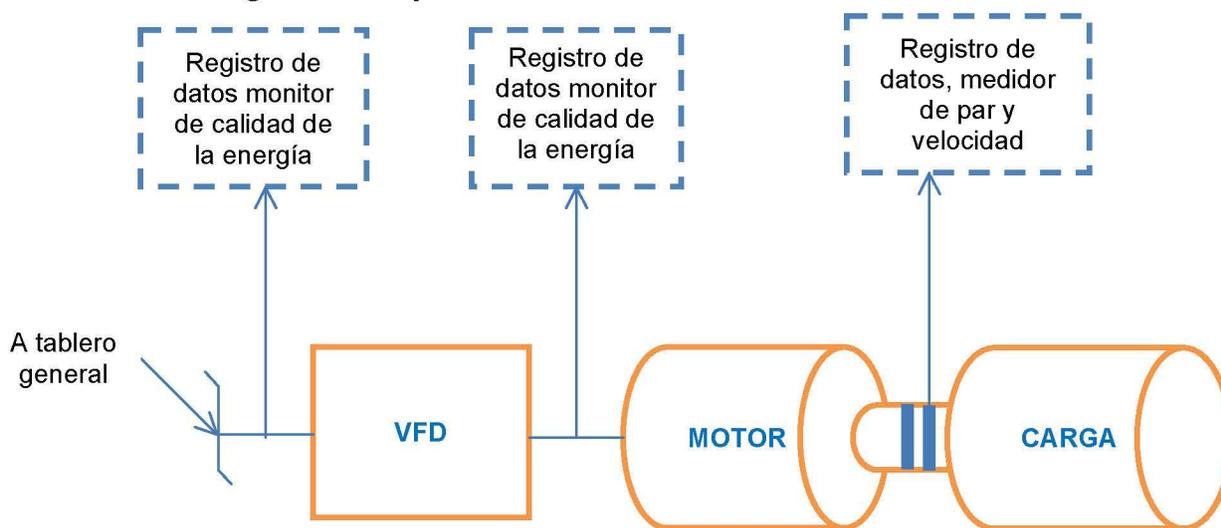
- Sobredimensionamiento del variador: Como se demostró en el presente trabajo, las pérdidas por conmutación en los variadores de frecuencia pueden representar pérdidas de energía debido al sobredimensionamiento del variador, por lo que se recomienda evaluar la capacidad del variador e inclusive del motor o motores que controla el variador.
- Tipo de motor: Es común encontrar problemas derivados del uso de motores convencionales con variadores de frecuencia y esto tiene que ver con las características de diseño de los motores que son inferiores a la eficiencia Premium. La auto ventilación es claramente insuficiente para el régimen permanente a bajas revoluciones, al menos si se quiere mantener el par nominal, lo que nos obliga a instalar ventilación forzada exterior o bien a sobredimensionar el motor. En la práctica el factor térmico suele ser el que limita la potencia de utilización del motor. Mientras los motores de inducción convencionales son los más adecuados para aplicaciones a

velocidad fija mediante conexión directa a red, los motores óptimos para su uso con variador de frecuencia son los motores asíncronos vectoriales. Normalmente con variadores de velocidad se suelen utilizar motores con tipo de aislamiento térmico clase F, aunque en última instancia, el fabricante del motor es el que debe asegurar en las especificaciones que es apto para su uso con variadores de velocidad [11]. Por lo anterior se recomienda verificar que el motor o grupo de motores que controla el variador sea apto para ser controlador por variadores y que la eficiencia mínima requerida sea eficiencia premium (IE3) [13].

### -Mediciones y clasificación conforme a la IEC 61800-9-2

La metodología propuesta para la medición de eficiencia del motor alimentado por variador se basa en la medición directa de eficiencia, considerando la relación entre la potencia mecánica de salida y eléctrica de entrada. La potencia mecánica de salida se determina a partir de la medición de par mecánico en el eje y la medición simultánea de velocidad de rotación del motor de inducción. La potencia eléctrica de entrada se calcula a partir de las medidas de potencia activa de entrada al motor de inducción. Los datos registrados de par mecánico y velocidad de giro del motor, señales de tensión y corriente en la entrada del variador de velocidad y del motor se procesan para el cálculo de la potencia de entrada y salida (ver esquema). A partir de estos se obtienen las curvas eficiencia del motor de inducción bajo prueba. La potencia de salida desarrollada por el par mecánico del motor es proporcional a la velocidad angular del eje [12].

**Imagen 16. Esquema de medición del sistema VFD-motor**



Fuente: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) [5]

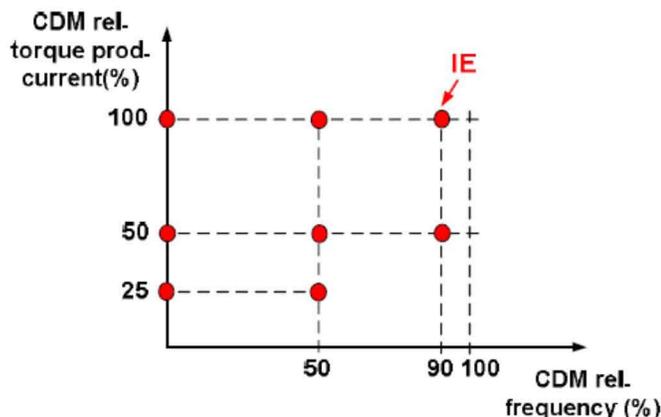
Para el cálculo de la eficiencia se relaciona la potencia mecánica de salida ( $P_m$ ) entre la potencia de entrada del motor ( $P_e$ ).

El comportamiento de la eficiencia del conjunto variador-motor está marcado por el comportamiento de la eficiencia del motor de inducción. La eficiencia del variador de velocidad no es constante y disminuye cuando la potencia entregada es inferior a la potencia nominal del mismo. La disminución en la eficiencia del variador de velocidad cuando opera a valores inferiores al nominal afecta considerablemente la eficiencia del conjunto variador-motor [12].

La norma define las clases de rendimiento para los variadores de frecuencia y el sistema completo (variador-motor) de la siguiente manera: IE0 (pérdidas altas), IE1 (pérdidas acorde a los valores de referencia), y IE2 (pérdidas significativamente por debajo de los valores de referencia). Siguiendo el mismo patrón, el rendimiento del sistema se califica como IES0, IES1 e IES2, para determinar en qué clasificación se ubica el variador o el sistema completo, la norma indica que se debe comparar el sistema que se quiere analizar respecto a una referencia, ya sea con el variador de referencia (CDM de referencia) o es sistema completo de referencia (PDS de referencia). El convertidor de referencia que proporciona las pérdidas de referencia se utiliza para la evaluación comparativa de los convertidores electrónicos de potencia de diferentes fabricantes [5].

La norma establece 8 puntos de frecuencia donde deben ser evaluadas las pérdidas del variador (ver imagen 17). La frecuencia del armónico fundamental en la salida del inversor se representa como un porcentaje de la frecuencia nominal y la corriente se representa como un porcentaje de la corriente nominal que produce el par. La corriente que produce ese par no define con precisión la corriente de salida para la cual se debe probar el variador. Por esta razón, se define un motor de prueba hipotético, que puede considerarse como una carga de prueba. Para esta carga de prueba, las corrientes y los factores de desplazamiento para los cuales el convertidor tiene que ser probado ya están definidos, dependiendo de su potencia nominal [5].

**Imagen 17. Puntos operativos para determinar la pérdida de potencia relativa para el MDL (la clase de eficiencia CDM está determinada por las pérdidas en el punto de operación superior derecho (90,100))**

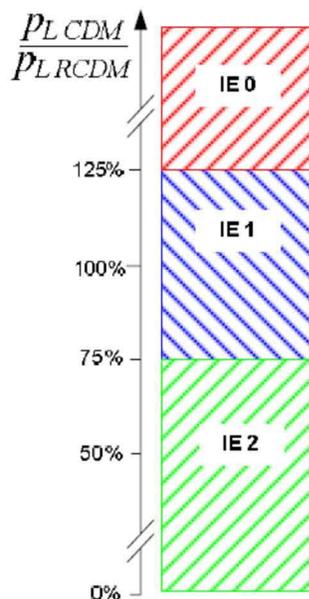


Fuente: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) [5].

Las pérdidas del variador en cada uno de los ocho puntos de operación definidos están relacionadas con la potencia del mismo para calcular sus pérdidas de potencia relativas. La clase IE del variador está determinada por sus pérdidas relativas en el punto (90,100), lo que significa el 90 % de la frecuencia nominal y el 100 % de su corriente nominal. Las pérdidas relativas en este punto se compara con las pérdidas relativas del variador de referencia, y la clase IE se determina aplicando los umbrales representados en la imagen 18. Las pérdidas relativas en los otros siete puntos de funcionamiento no juegan ningún papel para la clase IE, pero también deben especificarse en la documentación del producto.

**Imagen 18. Clases de eficiencia (IE) de un variador determinado por la relación de pérdidas del variador a prueba entre las pérdidas de del variador de referencia**

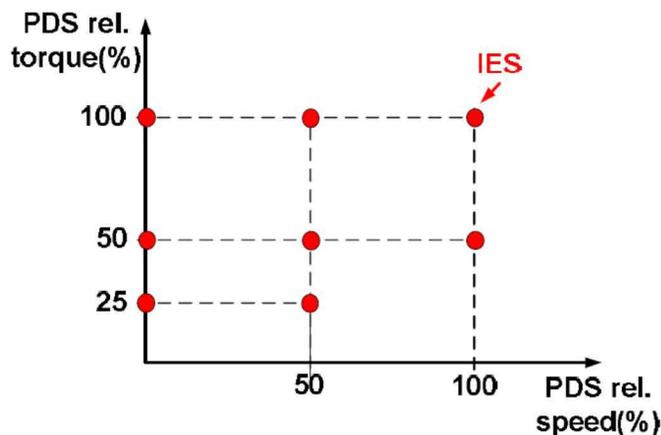
Fuente: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)[5]



Fuente: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) [5].

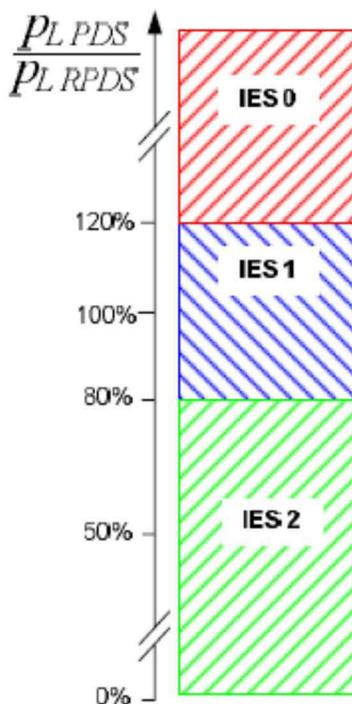
La clase IES de un PDS está determinada por la comparación de sus pérdidas relativas con las pérdidas relativas de la referencia PDS en el punto de operación (100,100), lo que significa 100% de la velocidad nominal y el 100% de par nominal, y la aplicación de los umbrales representados en la Imagen 19. Las pérdidas relativas del PDS se refiere a la potencia de salida del motor. La clase de eficiencia mejor definida es IES 2, que se logra si un PDS tiene menos del 80% de pérdidas del PDS de referencia.

**Imagen 19. Puntos operativos para determinar la pérdida de potencia relativa para el PDS (la clase de eficiencia PDS (IES) está determinada por las pérdidas en el punto de operación superior derecho (100,100))**



Fuente: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) [5]

**Imagen 20. Clases de eficiencia (IES) para el PDS en función de la relación entre las pérdidas del PDS y las pérdidas del PDS de referencia**



Fuente: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)[5]