



# **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

## **FACULTAD DE INGENIERÍA**

### **PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES EN INGENIERÍA**

#### **ESPECIALIDAD EN AHORRO Y USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA**

#### **DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO Y AHORRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE UNA FABRICA DE HIELO**

**TESINA**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**ESPECIALISTA EN AHORRO Y USO EFICIENTE DE LA ENERGIA  
ELÉCTRICA**

**PRESENTA:**

**JORGE ARTURO PÉREZ GIL**

**ASESOR: DR. GONZALO SANDOVAL RODRÍGUEZ**

**Ciudad de México, agosto de 2022**



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.

## Contenido

Introducción.....	5
Capítulo I. Marco contextual.....	6
1.1 Antecedentes.....	6
1.2 Planteamiento del problema.....	6
1.3 Justificación.....	6
1.4 Objetivos.....	7
1.5 Proceso metodológico.....	7
Capítulo II. Marco teórico.....	8
2.1 Diagnostico energético.....	8
2.2 Plan de medición.....	9
2.2.1 Equipo de medición requerido.....	9
2.2.2 Mediciones con monitor de calidad de la energía.....	10
2.3 Metodología del diagnóstico energético.....	11
2.3.1 Trabajo en campo.....	11
2.3.1.1 Paso 1. Recabar datos.....	11
2.3.1.2 Parámetros del motor de inducción.....	11
2.3.1.3 Parámetros del variador de frecuencia.....	12
2.3.1.4 Historial de consumo de energía.....	12
2.3.1.5 Paso 2. Realizar mediciones de parámetros eléctricos.....	12
2.3.2 Trabajos en gabinete.....	13
2.3.2.1 Paso 3. Calcular la corriente promedio demandada.....	13
2.3.2.2 Paso 4. Calcular el factor de carga en los variadores de frecuencia.....	13
2.3.2.3 Paso 5. Calcular las pérdidas en los variadores de frecuencia.....	14
2.3.2.4 Paso 6. Procedimiento de cálculo energético en motores eléctricos.....	15
2.3.2.5 Paso 6.1. Evaluar la potencia estándar demandada a partir de las mediciones eléctricas.....	15
2.3.2.6 Paso 6.2 Evaluar el factor de carga y la eficiencia del motor actual.....	16
2.3.2.7 Paso 6.3 Efectuar los ajustes a la eficiencia.....	17
2.3.2.8 Factor de ajuste por diferencia en tensión.....	17
2.3.2.9 Factor de ajuste por desbalanceo en tensión.....	18
2.3.2.10 Factor de ajuste por rebobinados.....	18
2.3.2.11 Factor de ajuste por antigüedad.....	19

2.3.2.12 Determinar la potencia real de salida del motor actual .....	19
2.3.2.13 Paso 6.4 Proponer nuevo motor de alta eficiencia .....	19
2.3.2.14 Paso 6.5 Determinar la eficiencia del nuevo motor .....	19
2.3.2.15 Paso 6.6 Efectuar los ajustes de la eficiencia .....	20
2.3.2.16 Paso 6.7 Calcular la potencia demandada en el nuevo motor .....	20
2.3.2.17 Paso 6.8 Cálculo del ahorro energético y económico .....	20
<b>Capítulo III. Análisis de la fábrica .....</b>	<b>22</b>
3.1 Límites físicos del sistema analizado .....	22
3.2 Proceso de fabricación de hielo .....	22
3.2.1 Tratamiento del agua .....	23
3.2.2 Llenado .....	24
3.2.3 Congelamiento .....	24
3.2.3.1 Compresión .....	24
3.2.3.2 Condensación .....	25
3.2.3.3 Válvula de expansión .....	25
3.2.3.4 Evaporación .....	26
3.2.4 Desmoldado .....	26
3.3 Análisis histórico de facturación eléctrica .....	26
3.4. Análisis de las cargas más significativas .....	30
3.5 Mediciones .....	32
3.5.1 Datos nominales de los motores eléctricos que fueron monitoreados .....	32
3.5.2 Programación de las mediciones .....	33
<b>Capítulo IV. Diagnostico energético .....</b>	<b>33</b>
4.1 Análisis del monitoreo .....	33
4.1.2 Motor E2A1 .....	33
4.1.3 VFD1-Motor C5A1 .....	34
4.1.4 VFD2-Motor C1A2 .....	35
4.2 Análisis de alternativas .....	36
4.2.1 Motor E2A1 .....	36
4.2.2 VFD1-Motor C5A1 .....	37
4.2.3 VFD2-Motor C1A2 .....	39
4.3 Análisis de rentabilidad .....	39
4.4 Políticas para estimular ahorros significativos .....	41

4.4.2 Medidas de política regulatoria .....	42
4.4.3 Medidas de política no regulatorias .....	43
4.5 Reparación versus reemplazo.....	43
Conclusiones o recomendaciones .....	44
Bibliografía.....	46
Anexos .....	47
Anexo 1. Fichas técnicas de motores y variadores .....	47
Anexo 2 Memoria de cálculo Método de la eficiencia ajustada .....	52
Anexo 3. Cálculo de Costo ponderado del kWh para la tarifa GDMTH.....	58

## **Introducción**

En esta tesina se llevó a cabo un diagnóstico energético en una fábrica de hielo. En el capítulo 1 se describe una reseña de la planta que incluye su historia y situación actual.

En el capítulo 2 se establecen los tipos de diagnóstico energético, se plantea la importancia de tener un plan de medición, los parámetros eléctricos a medir y el equipo de medición necesario. También se explican los métodos para conocer la eficiencia de los motores accionados tanto por arrancador como por variador de frecuencia.

En el capítulo 3 se describe como se realizó el trabajo en campo mediante una visita técnica y con el apoyo del personal operativo fue posible identificar los principales procesos de producción en horarios base, intermedia y punta, hacer un inventario de las cargas eléctricas de la planta y determinar los motores más significativos que consumen mayor energía eléctrica, se recabaron los datos de placa, parámetros de los motores y su sistema de accionamiento. Una vez teniéndolos identificados se implementó un plan de medición y se tomaron mediciones con un monitor de calidad de la energía, previamente se consultó con el personal de la fábrica si era posible ya que como son procesos críticos solo autorizaron realizar mediciones en algunos motores que no pusiera en riesgo la producción de la planta.

Adicionalmente se detalla cómo se recabaron datos de los recibos de la compañía suministradora para conocer el historial de facturación de un año ya que la fábrica se encuentra pagando un precio elevado y es de su interés conocer el gasto de electricidad. Posteriormente se realizó trabajo de gabinete para analizar la información recopilada tanto de los recibos de facturación, como consumos, demanda máxima y facturable.

En el capítulo 4 se realizó el diagnóstico energético a partir de los métodos investigados para evaluar la eficiencia de los motores eléctricos accionados con arrancador, así como de aquellos que son accionados con variadores de frecuencia para evaluarlos en conjunto, se analizaron y se realizaron cálculos con las mediciones obtenidas por el monitor de calidad de la energía, para conocer el comportamiento de los consumos, el factor de carga y la eficiencia de los motores y arrancadores, así como las pérdidas en los variadores de frecuencia, con los resultados obtenidos fue posible proponer medidas de ahorro y uso eficiente de la energía eléctrica.

Los resultados obtenidos se agruparon en una propuesta técnico-económica sobre el reemplazo de los motores menos eficientes, o variadores de frecuencia que tengan menos pérdidas de conducción y conmutación, tomando de referencia que la eficiencia de los motores cumpla con la norma internacional IEC 61800-9-2 [11].

## **Capítulo I. Marco contextual**

La fábrica de hielo pertenece a la industria de la cadena fría que es de gran importancia en México y en cualquier otra parte del mundo, y es consumidora de importantes cantidades de energía en forma de combustibles y electricidad para los procesos de refrigeración y congelación que involucran transferencias de calor y equipos que requieren de fuerza motriz.

### **1.1 Antecedentes**

La fábrica de hielo que se estudiará, se encuentra ubicada en el Municipio de Texcoco de Mora, Estado de México. La planta inició operaciones hace 15 años con el suministro de energía eléctrica con una acometida de 500 kVA, posteriormente debido al aumento de producción se contrató una nueva acometida la cual alimenta a un transformador de 300 kVA, y tiene conectada diversas cargas.

De acuerdo a los recibos de facturación, se sabe que debido a la pandemia desde el mes de septiembre del 2020 la planta disminuyó la producción, así como el consumo de energía eléctrica, recuperando su producción en el mes de abril del 2021, desde esa fecha la empresa ha presentado elevados consumos de energía siendo el mes de junio del 2021 el periodo con mayor importe de facturación.

Dado lo anterior para este tipo de industrias se recomienda realizar un diagnóstico energético con la finalidad de identificar oportunidades de ahorro de energía y reducir los cargos por energía y demanda que son las principales variables del monto de la facturación eléctrica.

A partir del diagnóstico energético se determinó que las cargas más significativas son los motores del proceso de compresión y evaporación para la producción de hielo.

### **1.2 Planteamiento del problema**

La planta tiene motores eléctricos de inducción que son accionados por arrancadores y por convertidores estáticos de frecuencia también llamados variadores de frecuencia los cuales controlan la velocidad de los motores. La eficiencia global del conjunto motor-variador de frecuencia depende no solamente del motor, también del control. El motor de inducción, cuando es alimentado por un convertidor de frecuencia PWM, tiene su eficiencia disminuida, en relación a un motor alimentado por tensión puramente senoidal, debido al aumento en las pérdidas por conmutación.

### **1.3 Justificación**

En la actualidad existen motores de alta eficiencia y variadores de frecuencia con menores pérdidas de energía eléctrica que permiten reducir el consumo de energía, se propone sustituir los motores analizados para hacer más eficientes los procesos de producción y se obtendrán beneficios económicos que se reflejarán en el monto de la facturación eléctrica.

Adicionalmente se obtendrán beneficios ambientales y sociales al reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> que se generan.

## **1.4 Objetivos**

### **Objetivo general.**

De acuerdo al análisis de las cargas más significativas los motores del proceso de compresión y evaporación son los mayores consumidores de energía eléctrica dentro de la planta.

Por lo anterior, el objetivo de este diagnóstico es determinar la eficiencia de los motores eléctricos y en conjunto con el variador de frecuencia del proceso de compresión y evaporación para proponer equipos que permitan un óptimo aprovechamiento y uso eficiente de la energía eléctrica en una empresa de fabricación de hielo.

### **Objetivos específicos.**

- Realizar un diagnóstico energético para evaluar el estado actual e identificar las oportunidades de ahorro de energía.
- Conocer los principales procesos de producción para identificar las cargas motrices más significativas.
- Identificar los principales métodos de cálculo de eficiencia en motores eléctricos, así como sus limitaciones para proponer mejoras y maximizar la eficiencia en los motores elegidos.
- Implementar políticas para concientizar el ahorro y uso eficiente de energía a través de sistemas de accionamiento de motores eléctricos.

## **1.5 Proceso metodológico**

Para cumplir los objetivos se realizarán las siguientes actividades:

1. Realizar el análisis de la facturación.
2. Realizar un levantamiento para obtener información del estado actual e inventario de los equipos eléctricos y térmicos.
3. Recopilar información del proceso productivo y la capacidad de flexibilidad.
4. Identificar las cargas más significativas para realizar el análisis de consumo de energía.
5. Configurar y conectar el monitor de calidad de la energía en la entrada de los principales motores de inducción de la fábrica.
6. Proponer una solución para disminuir las pérdidas y el consumo de energía eléctrica de los motores seleccionados.
7. Calcular el retorno de inversión, los beneficios económicos, ambientales y sociales.

## Capítulo II. Marco teórico

En este apartado se analizarán la literatura y los métodos encontrados para aplicarlos al problema de la eficiencia de los motores y variadores de frecuencia, partiendo de las bases teóricas que nos ayudarán a llevar a cabo esta tesina.

### 2.1 Diagnóstico energético

El diagnóstico energético (DE) es la herramienta mediante la cual se pueden identificar las medidas de ahorro de energía susceptibles a ser implementadas, así como cuantificar los ahorros a alcanzar y el monto de las inversiones necesarias para la implementación de dichas medidas, además de determinar su factibilidad técnica y rentabilidad financiera.[1]

Son tres los tipos de diagnóstico energético que se pueden realizar:

- a) Diagnóstico de nivel uno, o básico: se realiza mediante un reconocimiento visual del proceso industrial o instalación de que se trate, revisando el diseño original de los equipos consumidores de energía, para dar una idea de los potenciales de ahorro de energía que se pueden lograr por modificación en los hábitos de operación, corrección de desperdicios o por la incorporación de tecnologías eficientes. De este diagnóstico se pueden obtener buenas recomendaciones a nivel general. Por ejemplo, fugas de energía, mala operación de los equipos y/o instrumentos, equipos que pueden reemplazarse por otros más eficientes, como motores, compresores, aires acondicionados, luces, etc.
- b) Diagnóstico nivel dos, o fundamental: proporciona información sobre el consumo de energía tanto eléctrica como térmica por áreas funcionales o procesos específicos de operación, es decir, se detectan los subsistemas de mayor desperdicio energético. Este nivel provee datos acerca del ahorro de energía y, en consecuencia, de reducción de costos, a partir de su realización se obtiene una cartera de proyectos de aplicación, logrando de esta forma dirigir el camino de las metas para ahorro energético.
- c) Diagnóstico nivel tres: proporciona información precisa, de todos y cada uno de los puntos relevantes del diagrama del proceso industrial o cualquier instalación a evaluar, así como las pérdidas de energía de cada uno de los equipos involucrados. Este nivel está caracterizado por instrumentación extensiva, por la adquisición de datos y por los estudios de ingeniería involucrada, se aclara que muchas de las acciones propuestas para lograr ahorro de energía son producto de reingeniería de los procesos. Requiere la participación de especialistas.

## 2.2 Plan de medición

La medición de los parámetros eléctricos del sistema, es una actividad fundamental del DE. De una correcta medición de dichos parámetros, dependerá de que se obtengan o no, buenos resultados en el DE.[2]

Los parámetros eléctricos a medir como parte del DE son:

- Tensión entre fases
- Corriente por fase
- Factor de potencia trifásico
- Potencia activa trifásica

### 2.2.1 Equipo de medición requerido

El equipo requerido para medir parámetros eléctricos puede ser un multímetro/watímetro o un monitor de calidad de la energía. Ambos miden todos los parámetros requeridos.

La diferencia entre el multímetro/watímetro y monitor de calidad de la energía, es básicamente que el primero únicamente realiza la medición instantánea de los parámetros eléctricos, mientras que el segundo tiene la capacidad de hacer un monitoreo por un período de tiempo determinado del comportamiento de cada uno de los parámetros.

El multímetro/watímetro suele estar habilitado para medir una sola fase, por lo que, si se quieren los parámetros de las tres fases en un motor trifásico, habrá que medir fase por fase. En la figura 1 se ilustra un watímetro/multímetro



Figura 1. Multímetro/Watímetro. Fuente: PCE Instruments.

La mayoría de monitores de calidad de la energía están habilitados para medir las tres fases al mismo tiempo. En la figura 2 se muestra la imagen de un monitor de calidad de la energía.



Figura 2. Monitor de calidad de la energía. Fuente: HT instruments.

Los monitores de calidad de la energía suelen contar con 3 ó 4 pinzas para medir corriente. Los que cuentan con 4 pinzas como el de la figura 2, además de medir la corriente de cada una de las fases, miden también la corriente por el neutro, mientras que los de 3 pinzas únicamente miden la corriente de las tres fases.

Adicionalmente suelen medir la frecuencia de alimentación eléctrica, así como la energía consumida durante el período de monitoreo. Además, pueden medir la distorsión armónica total (THD por sus siglas en inglés), tanto en corriente como en voltaje.

La medición de corriente se debe hacer con pinzas de una capacidad tal que le permita hacer la medición de la corriente con buena precisión. Por esta razón es importante verificar en la hoja de datos de la pinza, cual es el rango de corrientes que ésta puede medir con una precisión razonablemente buena. Tanto el watímetro/multímetro como el monitor, además de las pinzas o donas para medir corriente, cuentan con puntas o caimanes para medir tensión. El watímetro/multímetro suele contar con 2 puntas para tensión, mientras que el monitor suele contar con 4.

Usualmente los equipos de medición están habilitados para medir valores de tensión de hasta 600 Volts, por lo que, si el equipo que se medirá es alimentado con una tensión superior a los 600 Volts, es necesario instalar transformadores de potencial (TP), para reducir el voltaje en el punto de medición por debajo de los 600 Volts. En este caso el valor medido deberá ser afectado por el factor de transformación de dichos transformadores. [2]

### **2.2.2 Mediciones con monitor de calidad de la energía**

Existen varias configuraciones de medición y adicionalmente suele ser necesario programar el equipo para monitorear los parámetros deseados. Por ello, antes de utilizar un monitor de calidad de la energía es indispensable leer y estudiar el manual de usuario.

La configuración de conexión del monitor más útil para medir los parámetros eléctricos requeridos por el DE, se ilustra en la figura 3. Con esta forma de medir, se podrán obtener al mismo tiempo los valores de la corriente, la potencia y el factor

de potencia en cada una de las fases, así como la tensión entre fases y la trifásica. La medición se realiza colocando una pinza de corriente en cada una de las fases si el monitor cuenta con 4 pinzas, la 4<sup>o</sup> se deberá conectar al neutro-. Las puntas de voltaje se conectan en cada fase y en el neutro.[2]

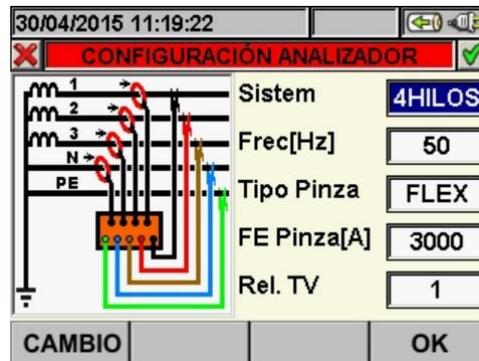


Figura.3 Configuración para medir con un monitor de calidad de la energía.

## 2.3 Metodología del diagnóstico energético

La metodología para el diagnóstico energético se compone por el trabajo de campo conformado por dos etapas, recabar datos de los equipos, recibos de facturación eléctrica y mediciones, así como el trabajo de gabinete que permite procesar la información recopilada para determinar qué área tiene mayor oportunidad de ahorro de energía

### 2.3.1 Trabajo en campo

El objetivo de los trabajos en campo es el de recabar toda la información necesaria para completar el diagnóstico energético. El trabajo consiste en recabar datos de placa de los equipos, así como datos de operación, mantenimiento e historial de consumo de energía por una parte y por la otra hacer mediciones de los parámetros eléctricos de operación. [2]

#### 2.3.1.1 Paso 1. Recabar datos.

Se debe realizar una visita al sitio donde se pretende hacer el diagnóstico energético. Una forma de recabar los datos es mediante un levantamiento de la placa de datos de los equipos eléctricos y térmicos, así como identificar los principales procesos de producción y hábitos de operación con la finalidad de realizar un inventario e identificar las cargas de mayor consumo.

#### 2.3.1.2 Parámetros del motor de inducción

Un motor de inducción es una máquina en la que el miembro por lo general el estator se conecta a la fuente de energía, y un devanado polifásico secundario o un devanado en jaula de ardilla en el otro miembro usualmente el rotor lleva corriente inducida. Sus principales parámetros son los siguientes:[3]

- Potencia mecánica nominal de salida:  $P_{MN}$
- Tipo de motor: TM
  - Abierto (motor que cuenta con aberturas para ventilación)
  - Cerrado (motor que no cuenta con aberturas para ventilación)
- Eficiencia nominal (si se encuentra disponible en la placa):  $\eta_N$
- Año de adquisición del motor: año
- Tensión nominal:  $V_N$
- Número de polos: NP

### 2.3.1.3 Parámetros del variador de frecuencia

En función de cada modelo y fabricante se puede tener menores o mayores prestaciones, pero los principales parámetros son los siguientes:

- Potencia nominal de salida:  $P_{NS}$
- Potencia nominal del variador:  $P_{NV}$
- Tensión nominal:  $V_N$
- Corriente de entrada del variador
- Pérdidas por conducción
- Pérdidas por conmutación

### 2.3.1.4 Historial de consumo de energía

Representa el gasto de electricidad en los periodos anteriores y es de utilidad para detectar las fechas de mayor utilización, así como conocer el comportamiento y tendencias de consumo. La información que se requiere para realizar el análisis del historial de consumo de energía es la siguiente:

- Tarifa contratada
- Consumo
- Demanda máxima y/o facturable
- Factor de carga
- Factor de potencia
- Importe de la factura mensual de los últimos 12 meses.

En caso de tarifa horaria, los consumos y demandas por horario de consumo.

### 2.3.1.5 Paso 2. Realizar mediciones de parámetros eléctricos

Se debe conectar y tomar mediciones con el monitor de calidad de la energía en la entrada del arrancador o del variador de frecuencia de los motores más significativos, con la finalidad de conocer el aprovechamiento de la energía eléctrica consumida. Los parámetros que serán de utilidad conocer mediante las mediciones son los siguientes:

- Potencia eléctrica promedio de operación en la entrada del arrancador o variador de frecuencia del motor:  $P_{EO}$  (kW)

- Tensión promedio entre fases en el arrancador o variador del motor:
  - Vab (Volts)
  - Vbc (Volts)
  - Vca (Volts)
- Corriente promedio demandada por fase en el arrancador o variador del motor:
  - Ia (A)
  - Ib (A)
  - Ic (A)

### 2.3.2 Trabajos en gabinete

Los trabajos de gabinete consisten en el procesamiento y análisis de toda la información recabada en campo, para identificar las áreas de oportunidad de ahorro y evaluar las medidas de ahorro a implementar para el aprovechamiento de dichas áreas de oportunidad. [2]

#### 2.3.2.1 Paso 3. Calcular la corriente promedio demandada

La corriente promedio demandada se obtiene mediante la suma de las corrientes promedio por fase medidas dividida entre el número de fases.

$$I_{prom} = \frac{(I_{aprom} + I_{bprom} + I_{cprom})}{3} \quad (3.1)$$

Donde:

$I_{prom}$  es la corriente promedio demandada

$I_{aprom}$  es la corriente promedio de la fase a medida

$I_{bprom}$  es la corriente promedio de la fase b medida

$I_{cprom}$  es la corriente promedio de la fase c medida

#### 2.3.2.2 Paso 4. Calcular el factor de carga 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) [4]:

$$\eta = \frac{P_M}{P_E} \quad (4.1)$$

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 [4]:

$$\eta_N = \frac{P_{MN}}{P_{EN}} \quad (4.2) \qquad \eta_O = \frac{P_{MO}}{P_{EO}} \quad (4.3)$$

El factor de carga eléctrico ( $FC_E$ ) se calcula como la potencia eléctrica de operación ( $P_{EO}$ ) sobre la potencia eléctrica nominal ( $P_{EN}$ ) [4]:

$$FC_E = \frac{P_{EO}}{P_{EN}} \quad (4.4)$$

La potencia eléctrica de operación es un dato que puede determinarse fácilmente vía mediciones. Elaborando un poco de álgebra se llegará a las siguientes expresiones [4]:

$$FC_M = \frac{\eta_O P_{EO}}{P_{MN} * 746} \quad (4.5)$$

$$FC_E = \frac{\eta_N P_{EO}}{P_{MN} * 746} \quad (4.6)$$

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 ( $P_{NE}$ )[4]:

$$FC_{EV} = \frac{P_{OE}}{P_{NV}} \quad (4.7)$$

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 [4]:

$$FC_{EV} = \frac{P_{OE}}{P_{NV}} = \frac{P_{OE}}{\frac{P_{NS}}{\eta_{NV}}} = \frac{P_{OE} * \eta_{NV}}{P_{NS}} \quad (4.8)$$

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.

### 2.3.2.3 Paso 5. Calcular las pérdidas en los variadores de frecuencia.

Las pérdidas por conmutación son las que ocurren durante el cerrado, la corriente directa aumenta antes de que el voltaje directo baje, y durante la abertura, el voltaje directo aumenta antes de que la corriente baje.

La existencia simultánea de voltajes y corrientes altos en el dispositivo causa pérdidas de potencia. Debido a su naturaleza repetitiva, representan una parte apreciable de las pérdidas, y con frecuencia son mayores que las pérdidas de conducción durante el estado cerrado.

Durante el proceso de cerrado y abertura, un dispositivo práctico de conmutación requiere un tiempo de demora ( $t_d$ ) un tiempo de subida ( $t_r$ ), tiempo de almacenamiento ( $t_s$ ) y tiempo de bajada ( $t_f$ ) finitos al aumentar la corriente de conmutación ( $i_{sw}$ ) por el dispositivo durante el cerrado, el voltaje ( $v_{sw}$ ) a través del mismo, baja. Al aumentar la corriente  $i_{sw}$  por el dispositivo durante el cerrado, el voltaje ( $v_{sw}$ ) a través del mismo, baja. Al bajar la corriente por el dispositivo durante

la abertura o apagado, aumenta el voltaje a través del mismo. Algunas formas características de onda son de voltaje  $v_{sw}$  y de corriente  $i_{sw}$  el tiempo de cerrado ( $t_{enc}$ ) de un dispositivo es la suma del tiempo de retardo y el tiempo de subida, mientras que el tiempo de abertura ( $t_{apag}$ ) de un dispositivo, es la suma del tiempo de almacenamiento y del tiempo de bajada. En contraste con un interruptor ideal sin pérdidas, un dispositivo práctico de interrupción disipa algo de energía al conducir y al conmutar. La caída de voltaje a través de un dispositivo conductor de potencia es, cuando menos, del orden de 1 V, pero con frecuencia pueden ser mayores, hasta de varios volts. [5]

La pérdida promedio de potencia en la conducción,  $P_{ENC}$ , se determina con:

$$P_{ENC} = \frac{1}{T_s} \int_0^{t_{ENC}} p dt \quad (5.1)$$

Donde:

$T_s$  es el periodo de conducción

$p$  es la pérdida instantánea de potencia, es decir, el producto de la caída de voltaje  $v_{sw}$  a través del interruptor y de la corriente conducida  $i_{sw}$ .

Las pérdidas de potencia aumentan durante el cerrado y la abertura del interruptor, debido a que, durante la transición de un estado de conducción a otro, el voltaje y la corriente tienen valores apreciables. La pérdida de potencia por conmutación que resulta  $P_{SW}$  durante los periodos de cerrado y abertura se determinan con [5]:

$$P_{SW} = f_s \left( \int_0^{t_r} p dt + \int_0^{t_s} p dt + \int_0^{t_f} p dt \right) \quad (5.2)$$

Donde:

$f_s$  es igual a  $\frac{1}{T_s}$  que es la frecuencia de conmutación:

$t_r$ ,  $t_s$  y  $t_f$  son los tiempos de subida, almacenamiento y bajada, respectivamente.

### **2.3.2.4 Paso 6. Procedimiento de cálculo energético en motores eléctricos <sup>1</sup>**

Este procedimiento tiene la finalidad de mostrar un procedimiento práctico de evaluación de motores eléctricos para evaluar la rentabilidad de su reemplazo por otro de alta eficiencia a través del método de factor de carga o eficiencia ajustada, considerando sus parámetros eléctricos [6].

#### **2.3.2.5 Paso 6.1. Evaluar la potencia estándar demandada a partir de las mediciones eléctricas.**

La potencia de entrada real se puede conocer midiendo en la entrada del arrancador del motor con un monitor de calidad de la energía, en caso que no sea posible utilizar

---

<sup>1</sup> FIDE. Ahorro de energía mediante la evaluación energética de motores eléctricos.

este equipo de medición, se puede determinar tomando mediciones de tensión, corriente y factor de potencia por medio de un multímetro/watímetro y sustituyendo los valores medidos en la siguiente ecuación:

$$Pot_{ent_{real}} = \frac{(\sqrt{3})(V_p)(I_p)(FP_p)}{1000} \dots [\text{kW}] \quad (6.1)$$

Donde:

$Pot_{ent_{real}}$  es la potencia de entrada real

$V_p$  es la tensión de línea promedio medida

$I_p$  es el corriente promedio medida

$FP_p$  es el factor de potencia promedio medido

### 2.3.2.6 Paso 6.2 Evaluar el factor de carga y la eficiencia del motor actual

Cuando un motor opera a una carga diferente a la nominal se produce una variación en la eficiencia. La mayor eficiencia de un motor, se obtiene en torno al 85% de factor de carga, en el caso de motores de alta eficiencia y al 75% para motores de eficiencia estándar.

$$\text{Si } FC_{real} = \frac{P_{sal_{real}}}{P_{sal_{nom}}} \quad (6.2)$$

Donde:

$FC_{real}$  es el factor de carga

$P_{sal_{real}}$  es la potencia de salida real

$P_{sal_{nom}}$  es la potencia de salida nominal

$$P_{sal_{real}} = \frac{(P_{EO})(\eta_o)}{0.746 \frac{\text{kW}}{\text{hp}}} \quad (6.3)$$

$P_{EO}$  es la potencia eléctrica de operación

$\eta_o$  es la eficiencia de operación

Por lo tanto:

$$FC_{real} = \left[ \frac{(\eta_N)(P_{ent_{real}})}{(P_{sal_{nom}})(0.746)} \right] \quad (6.4)$$

Donde:

$\eta_N$  es la eficiencia nominal

$P_{ent_{real}}$  es la potencia de entrada real

Cuando la eficiencia del motor no esté indicada en la placa, o no se dispone del catálogo del fabricante, se tomarán los datos de eficiencia del anexo 5.1, considerando 100% de carga.

Sustituyendo en la ecuación 6.1 se obtiene el factor de carga al cual está trabajando el motor actual.

Para determinar la eficiencia a el valor calculado del factor de carga, se procederá con una interpolación lineal entre el factor de carga inmediato inferior y el superior, de acuerdo a la ecuación 6.5 y la información del anexo 5.1.

$$\eta_{real} = \left( \frac{FC_{real} - FC_1}{FC_2 - FC_1} \right) (\eta_2 - \eta_1) + \eta_1 \quad (6.5)$$

Donde:

$\eta_{real}$  es la eficiencia real de operación.

$\eta_1$  es la eficiencia correspondiente a  $FC_1$ , dato de la curva o tabla del motor.

$\eta_2$  es la eficiencia correspondiente a  $FC_2$ , dato de la curva o tabla del motor.

$FC_{real}$  es el Factor de carga real

$FC_1$  es el Factor de carga inmediato inferior al real, como porcentaje de la carga nominal, es dato de la curva o tabla del motor.

$FC_2$  Factor de carga inmediato superior al real, como porcentaje de la carga nominal, es dato de la curva o tabla del motor.

### 2.3.2.7 Paso 6.3 Efectuar los ajustes a la eficiencia

El ajuste a la eficiencia del motor actual se realiza por medio de la ecuación 6.6

$$\eta_{real\ ajustada} = FA_{dv}(\eta_{real} + FA_{VV} - FA_{RE} - FA_{ANT}) \quad (6.6)$$

Donde:

$\eta_{real\ ajustada}$  es la eficiencia real ajustada

$FA_{dv}$  es el Factor de ajuste por desbalanceo de tensión.

$\eta_{real}$  es la eficiencia real

$FA_{VV}$  es el Factor de ajuste por diferencia en tensión

$FA_{RE}$  es el Factor de ajuste por rebobinados

$FA_{RE}$  es el Factor de ajuste por antigüedad

### 2.3.2.8 Factor de ajuste por diferencia en tensión

La diferencia en tensión se define como la relación de la tensión trifásica promedio de línea y la tensión indicada en placa, tal como se muestra en la ecuación 6.7.

$$VV = \left( \frac{V_P}{V_{nom}} - 1 \right) \quad (6.7)$$

Donde:

$VV$  es la diferencia de tensión.

$V_P$  es el voltaje RMS promedio de línea

$V_{nom}$  es el voltaje nominal.

Una vez determinada la diferencia en tensión se puede calcular el factor de ajuste por medio de la ecuación 6.8.

$$FA_{VV} = (VV)[0.07 - 1.334(VV)] - 0.0009 \quad (6.8)$$

Donde:

$FA_{VV}$  es el factor de ajuste por diferencia de tensión  
 $VV$  es la diferencia de tensión.

### 2.3.2.9 Factor de ajuste por desbalanceo en tensión.

El desbalanceo en tensión se define como la máxima desviación de la tensión de línea y el valor promedio del sistema, entre la tensión promedio, como se muestra en la ecuación 6.9.

$$DV = \left( \frac{\text{Max}\{(V_{max}-V) \text{ ó } (V-V_{min})\}}{V} \right) \quad (6.9)$$

Donde:

$DV$  es el Desbalanceo de tensión en decimal.

$V$  es el Voltaje RMS promedio de línea a línea.

$V_{max}$  es el Voltaje RMS máximo medido de línea a línea.

$V_{min}$  el Voltaje RMS mínimo medido de línea a línea.

Una vez determinado el desbalanceo en tensión, el factor de ajuste por desbalanceo en tensión, se puede calcular con la ecuación 6.10

$$FA_{dv} = 1 - (DV)[0.0113 + 0.0073(DV)] \quad (6.10)$$

Donde:

$FA_{dv}$  es el Factor de ajuste por desbalanceo de tensión

$DV$  es el Desbalanceo de tensión en decimal.

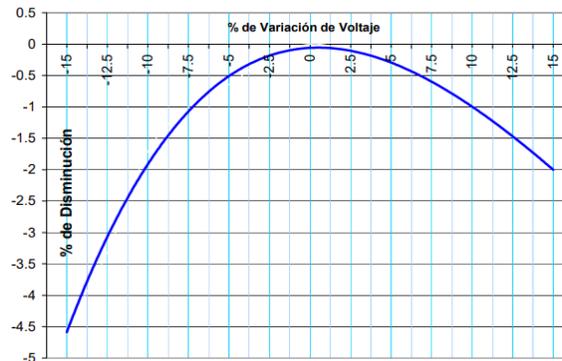


Figura 4. Gráfica % disminución vs variación de voltaje

### 2.3.2.10 Factor de ajuste por rebobinados

Todo motor que ha sido rebobinado, sufre deterioro en su eficiencia. Cuando se realiza en talleres sin las características necesarias o no cuenta con la calidad de los materiales, las pérdidas pueden ser 4.2% o más. En la tabla 1 se muestra la relación de pérdida unitaria de la eficiencia en función de la temperatura aplicada durante la reparación del motor.

Es importante destacar que la corrección a la eficiencia por rebobinados solo se deberá aplicar en una sola ocasión, independientemente del número de rebobinados.

Temperatura (°C)	Reducción de la eficiencia FAre
633	0.0053
683	0.0117
733 (soplete)	0.0250
Químico	0.0040

Tabla 1. Factor de ajuste por rebobinados

### 2.3.2.11 Factor de ajuste por antigüedad

De acuerdo a la metodología de evaluación de sistemas de bombeo de agua del BID, si el motor tiene ms de 10 años de antigüedad, deberá depreciarse un punto.[3]

### 2.3.2.12 Determinar la potencia real de salida del motor actual

$$Pot_{sal_{real}} = (\eta_{ajustada})(Pot_{ele}) \quad (6.11)$$

Donde:

$Pot_{mec}$  es la energía mecánica entregada al sistema motriz accionado por el motor actual y será la misma para el motor de alta eficiencia.

### 2.3.2.13 Paso 6.4 Proponer nuevo motor de alta eficiencia

Una vez conocida la potencia al freno se selecciona el motor de alta eficiencia para que trabaje cerca del 75% de carga.

$$Pot_{AE_{mec}} = \left[ \frac{Pot_{mec}}{0.75} \right] \quad (6.12)$$

Donde:

$Pot_{AE_{mec}}$  es la potencia mecánica del motor de alta eficiencia

Una vez determinada la potencia necesaria en el motor de alta eficiencia se debe calcular el factor de carga al cual trabajará a través de la siguiente relación:

$$FC_{AE} = \left[ \frac{Pot_{sal_{real}}}{Pot_{AE_{placa}}} \right] \quad (6.13)$$

Donde:

$FC_{AE}$  es el factor de carga del motor de alta eficiencia

$Pot_{AE_{placa}}$  es la potencia nominal del motor inmediato superior

### 2.3.2.14 Paso 6.5 Determinar la eficiencia del nuevo motor

Con base al factor de carga se determina la eficiencia del nuevo motor de acuerdo al catálogo del fabricante o bien del anexo 5.1.

Si no coinciden los valores del factor de carga con los datos del anexo 5.1, será necesario interpolar con la siguiente ecuación y los valores correspondientes.

$$\eta_{AE} = \left( \frac{FC_{AE} - FC_1}{FC_2 - FC_1} \right) (\eta_2 - \eta_1) + \eta_1 \quad (6.14)$$

Donde:

$\eta_{AE}$  es la eficiencia del nuevo motor de alta eficiencia

$FC_{AE}$  es el factor de carga del nuevo motor de alta eficiencia

### 2.3.2.15 Paso 6.6 Efectuar los ajustes de la eficiencia

La siguiente ecuación se deriva de la (6.6), con  $FA_{re} = 0$ , por ser un motor nuevo.

$$\eta_{AE \text{ ajustada}} = FA_{dv}(\eta_{AE} + FA_{VV}) \quad (6.15)$$

$FA_{VV}$  y  $FA_{dv}$  se tendrán que determinar con las ecuaciones 6.8 y 6.10 de acuerdo a los datos de placa del motor de alta eficiencia.

### 2.3.2.16 Paso 6.7 Calcular la potencia demandada en el nuevo motor

Con la eficiencia, la potencia de placa y el factor de carga al que trabajará el nuevo motor se calcula la potencia eléctrica que demandará.

$$Pot_{AEele} = \frac{(Pot_{AEmec})(FC_{AE})(0.746)}{\eta_{AE \text{ ajustada}}} \quad (6.16)$$

Donde:

$Pot_{AEele}$  es la potencia que demandara el nuevo motor de alta eficiencia.

$Pot_{AEmec}$  es la potencia mecánica del motor de alta eficiencia.

$FC_{AE}$  es el factor de carga del nuevo motor de alta eficiencia.

$\eta_{AE \text{ ajustada}}$  es la eficiencia ajustada del nuevo motor de alta eficiencia.

### 2.3.2.17 Paso 6.8 Cálculo del ahorro energético y económico

Para obtener el ahorro en potencia demandada, se resta el valor de la potencia que demandará el nuevo motor de alta eficiencia a la demanda del motor actual.

$$A_D = Pot_{ele} - Pot_{AEele} \quad (6.17)$$

Donde:

$A_D$  es el ahorro en potencia eléctrica que demandará el nuevo motor

$Pot_{ele}$  es la potencia eléctrica demandada del motor actual

$Pot_{AEele}$  es la potencia eléctrica que demandará el nuevo motor

Con el ahorro en demanda y las horas de operación al año, se calcula el ahorro en el consumo de energía al año (kWh/año).

$$A_C = (A_D)(\text{hora de operación al año}) \quad (6.18)$$

Donde:

$A_C$  es el ahorro en el consumo de energía al año (kWh/año).

Con el ahorro en consumo y demanda se calcula el ahorro económico anual

$$A_E = (12)(A_D)(Costo_D) + (A_C)(Costo_{C \text{ Ponderado}}) \quad (6.19)$$

Donde el  $Costo_D$  se obtiene de los datos de facturación o de la página electrónica de la C.F.E. [10]

En el anexo 5.2 se muestra cómo se calcula el  $Costo_{C \text{ Ponderado}}$ .

El Periodo de amortización o periodo simple de recuperación se calcula con la siguiente ecuación:

$$P.S.R. = \frac{\text{Inversión}}{A_E} \quad (6.20)$$

## Capítulo III. Análisis de la fábrica

### 3.1 Límites físicos del sistema analizado

El sistema de análisis queda delimitado por el área ocupada por dos de las tres naves industriales con ubicación conocida dentro del municipio de Texcoco en el Estado de México. El criterio para elegir los límites fue que en estas dos naves se concentran la mayor cantidad de consumo de energía eléctrica. Las zonas de la nave tienen un área de  $658 \text{ m}^2$  y  $328 \text{ m}^2$  respectivamente, dichas superficies se muestran dentro del margen color rojo en la figura.5



Figura 5. Vista aérea del área ocupada por la nave industrial donde se lleva a cabo el proceso de fabricación de hielo. Fuente: Google Maps.

### 3.2 Proceso de fabricación de hielo

El hielo es un producto ampliamente conocido y utilizado en muchos aspectos de nuestra vida, ya sea para uso gastronómico, conservación de alimentos o para la salud, el hielo se produce por la congelación del agua a una temperatura inferior a  $0^{\circ}\text{C}$ , pasando de ser un elemento líquido a convertirse en un cuerpo cristalino.

El proceso de producción de hielo, tiene como materia prima el agua, que sólo tiene que ser tratada, en el diagrama de flujo (figura 6), se muestran las principales etapas para el procesamiento de hielo, así como las entradas y salidas de materias primas e insumos durante el proceso de producción.

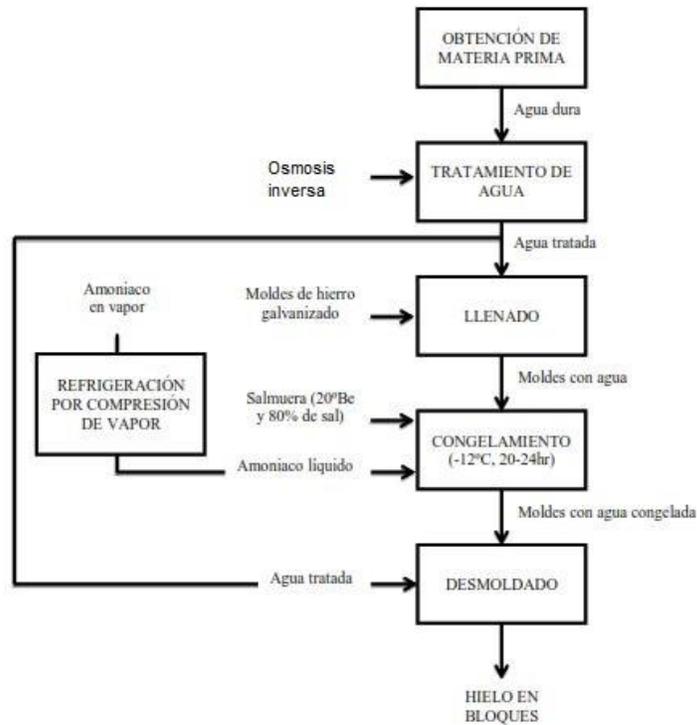


Figura 6. Diagrama de flujo del proceso de producción de hielo

### 3.2.1 Tratamiento del agua

El proceso de purificación de agua consiste en la filtración de intercambio iónico por resinas, rayos UV, biofiltración de diatomeas con carbón activo y el sistema de osmosis inversa.

Las máquinas asociadas utilizan energía eléctrica para motores. En total se ocupan 3 máquinas de ósmosis inversa cada una con un motor eléctrico de 1 HP.



Figura 7. Sistema para el tratamiento del agua.

### **3.2.2 Llenado**

Una grúa puente eleva una fila de moldes vacíos y los transporta a un tanque dosificador donde son llenados y luego trasladados hacia la poza de congelamiento donde son depositados, por un tiempo de 20 a 24 horas.

### **3.2.3 Congelamiento**

En esta etapa, los moldes con agua que fueron llenados en la etapa anterior son sujetados, elevados, transportados e inmersos en la poza para que se congelen a  $-12^{\circ}\text{C}$  por un periodo de 20 a 24 horas, siendo este el tiempo óptimo, de lo contrario si este tiempo disminuye se obtendría hielo quebradizo. Este congelamiento se realiza por la acción de amoníaco líquido circundante a través de serpentines adheridos a una de las paredes de las pozas.

La fabricación de hielo es mediante el ciclo de refrigeración por compresión de vapor, donde la sustancia de trabajo cambia de fase de líquido a vapor en el evaporador y vuelve a ser líquido en el condensador. El amoníaco ingresa a un sistema de refrigeración el cual consta de las siguientes etapas:

#### **3.2.3.1 Compresión.**

Esta etapa se realiza en un compresor, el cual recibe el refrigerante en estado gaseoso del evaporador ingresando por la válvula de servicio del lado de baja presión, en esta condición entra al cilindro en donde es comprimido por el pistón para luego salir por la válvula de servicio del lado de alta presión hacia el condensador. La temperatura del refrigerante también aumenta.

Las máquinas asociadas a este proceso utilizan energía eléctrica para motores. En total se ocupan 7 compresores cada uno con un motor eléctrico de las siguientes capacidades:

- 4 × 100 HP
- 1 × 20 HP
- 1 × 40 HP
- 1 × 75 HP
- 1 × 30 HP



Figura 8. Cuarto de compresores de amoniaco.

### 3.2.3.2 Condensación

El refrigerante en estado gaseoso y a temperatura elevada sale del compresor rumbo hacia el condensador, que se encuentra en la parte alta de la planta. El condensador posee un tanque de agua en la parte baja, la cual es impulsada por un motor, generando una especie de lluvia, que baña los serpentines, y con la ayuda de unos ventiladores los cuales proporcionan el aire frío, este amoniaco en vapor se convierte en líquido y sale por la tubería de descarga, dirigiéndose hacia el tanque receptor de líquido para que el proceso siga su funcionamiento.

Las máquinas asociadas a este proceso utilizan energía eléctrica para motores. En total se ocupa 1 condensadora con 4 motores de  $\frac{1}{4}$  de HP.



Figura 9. Condensadora y compresor.

### 3.2.3.3 Válvula de expansión

El amoníaco convertido en líquido pasa por la válvula de expansión con la finalidad de controlar su caudal para luego ingresar a los evaporadores. En el instante que el

amoníaco líquido pasa por esta válvula, se disponen de unos solenoides que se encargan de cerrar o abrir la válvula para así disminuir o aumentar el paso del refrigerante y su consecuente evaporación dentro de los evaporadores.

### **3.2.3.4 Evaporación**

En esta etapa el refrigerante va absorber el calor de los alrededores, la fase de vapor. Los evaporadores en forma de serpentín se encuentran en la poza de congelamiento y ayudan a que las toneladas de agua puedan convertirse en hielo mucho más rápido.

Las máquinas asociadas a este proceso utilizan energía eléctrica para motores. En total se ocupan 3 evaporadores cada una con un motor eléctrico de 40 HP.



Figura 10. Evaporadores C y B

### **3.2.4 Desmoldado**

En la producción de bloques de hielo se usa este proceso para que estos se liberen rápidamente del molde, mediante un sistema de descongelación denominado “baño maría”, es decir los bloques de hielo al estar a una temperatura de  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$  se exponen a temperatura ambiente, con la finalidad de que el bloque de hielo se desprenda del molde por sí solo y se extraiga por gravedad.

### **3.3 Análisis histórico de facturación eléctrica**

Para el análisis histórico de la facturación se realizó la revisión de los datos de los recibos que abarcan un periodo 9 meses, debido a que la fábrica no contaba con recibos anteriores, comprendido desde septiembre del año 2020 hasta el mes de junio del año 2021. Se corroboraron los datos de cargos fijos, variables, cargos por distribución y capacidad de la tarifa GDMTH para la División Valle de México Centro donde se ubica la fábrica.

Se observa en la tabla 1 y 2 que en algunos meses disminuyó el consumo y demanda, esto fue debido a la disminución de la producción por la pandemia, en los últimos meses del periodo analizado se muestra un aumento en el consumo y la demanda y por consiguiente una disminución del factor de potencia y menor

bonificación por dicho concepto, esto es debido a que la fábrica tiene 4 bancos de capacitores fijos ocasionando que cuando la planta tiene mayor consumo, la potencia reactiva inductiva demandada por los motores QL sea mayor a la potencia reactiva capacitiva generada por el banco de capacitores QC y por lo tanto demanda mayor potencia reactiva a la red.

La fábrica tiene implementada una medida de ahorro de energía la cual consiste en apagar la maquinaria de forma manual durante el horario punta de 20:00 a 22:00 horas, por tal motivo no hay cargos por capacidad para la acometida dos, sin embargo, para la acometida uno, se considera cargo por energía en horario punta y por capacidad asociado a dicho horario.

Se recomienda realizar otro estudio de facturación de los próximos 12 meses para conocer la producción habitual con la fábrica operando a plena carga, así como los consumos de energía y demanda para determinar si existen cambios significativos de cargos fijos, variables, cargos por distribución y capacidad que impacten el monto de facturación.

Mes	Dem. Máx. (kW)	Consumo total (kWh)	FP (%)	FC (%)	Cargo por distribución (\$)	Cargo por transmisión (\$)	Cargo por CENACE (\$)	Cargo por energía (\$)	Cargo por capacidad (\$)	Cargo por SCnMEM (\$)	Facturación básica (\$)	Facturación normal (\$)	Bonificación (fracción)	Bonificación (%)	Bonificación (\$)	Facturación neta (\$)	IVA (16%) (\$)	Facturación del periodo (\$)	Derecho de Alumbrado Público (\$)	Total (\$)
sep-20	188	77,060	97.91	52	11,180.36	12,938.38	616.48	86,528.24	9,433.12	431.54	121,736.85	121,736.85	0.0202	2.0	2,434.74	119,302.11	19,088	138,390.45	2,982.55	141,372.99
oct-20	147	65,385	99.07	48	9,201.92	10,978.14	523.09	74,099.29	9,435.15	366.16	105,212.48	105,212.48	0.0229	2.3	2,419.89	102,792.59	16,447	119,239.41	2,569.81	121,810.20
nov-20	146	59,606	98.56	47	8,682.62	10,007.84	476.85	65,478.56	13,343.04	333.79	98,931.43	98,931.43	0.0217	2.2	2,176.49	96,754.94	15,481	112,235.73	2,418.87	114,654.80
dic-20	138	58,182	99.04	46	8,206.86	9,768.76	465.46	64,557.20	9,425.58	325.82	93,358.41	93,358.41	0.0228	2.3	2,147.24	91,211.17	14,594	105,804.95	2,280.27	108,086.02
ene-21	46	19,444	100.00	35	2,896.62	3,377.42	163.33	21,933.88	9,535.49	112.77	38,646.50	38,646.50	0.0250	2.5	966.16	37,680.34	6,029	43,709.19	942.00	44,651.21
feb-21	78	29,558	100.00	39	4,911.66	5,134.22	248.28	33,427.56	9,599.00	171.44	54,119.15	54,119.15	0.0250	2.5	1,352.98	52,766.17	8,443	61,208.76	1,319.15	62,528.11
mar-21	275	116,259	91.38	50	17,316.75	20,194.19	976.58	128,687.92	12,275.86	674.30	180,752.59	180,752.59	0.0038	0.4	723.01	180,029.58	28,805	208,834.31	4,500.73	213,335.15
abr-21	296	103,638	92.82	54	17,606.32	19,904.30	962.55	137,398.97	10,395.52	664.62	187,559.27	187,559.27	0.0076	0.8	1,465.18	186,094.09	29,775	215,869.14	4,652.35	220,521.64
may-21	303	133,873	91.65	59	19,079.91	23,253.75	1,124.53	157,252.11	11,764.68	776.46	213,878.43	213,878.43	0.0045	0.5	1,069.39	212,809.04	34,049	246,858.48	5,320.22	252,179.34
jun-21	308	131,750	90.85	59	19,394.76	22,884.97	1,106.70	163,167.19	12,574.80	764.16	220,519.57	220,519.57	0.0023	0.2	441.04	220,078.53	35,213	255,291.10	5,501.96	260,793.39

Tabla 2. Análisis de la facturación eléctrica acometida 1

Mes	Dem. Máx. (kW)	Consumo total (kWh)	FP (%)	FC (%)	Cargo por distribución (\$)	Cargo por transmisión (\$)	Cargo por CENACE (\$)	Cargo por energía (\$)	Cargo por capacidad (\$)	Cargo por SCnMEM (\$)	Facturación básica (\$)	Facturación normal (\$)	Bonificación (fracción)	Bonificación (%)	Bonificación (\$)	2% Baja Tension	Facturación neta (\$)	IVA (16%) (\$)	Facturación del periodo (\$)	Derecho de Alumbrado Público (\$)	Total (\$)
sep-20	115	54,733	97.97	66	6,839.05	9,189.67	437.87	59,648.47	0.00	306.51	77,030.30	77,030.30	0.0203	2.0	1,571.42	1,540.61	76,999.49	12,320	89,319.41	1,924.98	91,244.58
oct-20	114	54,855	97.96	65	6,871.55	9,211.34	438.90	60,109.85	811.68	307.23	78,359.28	78,359.28	0.0203	2.0	1,598.53	1,567.19	78,327.94	12,532	90,860.41	1,958.19	92,819.18
nov-20	119	50,904	97.83	59	7,076.93	8,546.78	407.23	53,845.34	0.00	285.06	70,770.07	70,770.07	0.0200	2.0	1,443.71	1,415.40	70,741.76	11,319	82,060.44	1,768.54	83,829.16
dic-20	99	41,666	98.21	47	5,887.53	6,995.72	333.33	44,468.42	0.00	233.33	58,527.06	58,527.06	0.0209	2.1	1,253.65	1,170.54	58,443.95	9,351	67,794.98	1,461.09	69,256.23
ene-21	88	37,186	98.56	46	5,541.36	6,459.20	312.36	39,407.70	0.00	215.68	52,563.29	52,563.29	0.0217	2.2	1,179.52	1,051.27	52,435.04	8,390	60,824.65	1,310.87	62,135.74
feb-21	106	41,932	98.34	59	6,674.82	7,283.59	352.23	45,562.14	0.00	243.20	60,742.97	60,742.97	0.0212	2.1	1,301.11	1,214.86	60,656.72	9,705	70,361.80	1,516.41	71,878.94
mar-21	107	51,802	98.08	65	6,737.79	8,998.00	435.13	56,801.93	0.00	300.45	73,900.29	73,900.29	0.0206	2.1	1,582.94	1,478.01	73,795.36	11,807	85,602.62	1,844.88	87,448.43
abr-21	116	56,821	97.73	71	7,247.79	9,869.81	477.30	66,442.60	0.00	329.56	84,994.05	84,994.05	0.0198	2.0	1,733.88	1,699.88	84,960.05	13,594	98,553.66	2,124.00	100,678.08
may-21	117	58,709	97.80	67	7,367.49	10,197.76	493.16	67,235.17	0.00	340.51	86,261.08	86,261.08	0.0199	2.0	1,759.73	1,725.22	86,226.57	13,796	100,022.82	2,155.66	102,178.56
jun-21	113	58,773	97.76	72	7,115.61	10,208.87	493.69	71,667.55	0.00	340.88	90,453.59	90,453.59	0.0198	2.0	1,845.25	1,809.07	90,417.41	14,467	104,884.20	2,260.43	107,145.18

Tabla 3. Análisis de la facturación eléctrica acometida 2

En las Tablas 4 y 5 se muestra que el consumo promedio mensual es de 67319.17 y 42282.33 kWh y una demanda máxima de 214 y 112.66 kW para cada acometida respectivamente. Como se ha mencionado anteriormente el consumo en horario punta es despreciable debido a las medidas de ahorro de energía implementadas por la fábrica.

DATOS PROMEDIO DE FACTURACIÓN							
Demanda [kW]				Consumo [kWh]			
Base	Intermedia	Punta	Máxima	Base	Intermedia	Punta	Mensual
206.25	214	31.92	214	25039.33	41546.0833	733.75	67319.17

Tabla 4. Datos promedio de facturación de la acometida 1 en un periodo de 1 año.  
Fuente: Facturas eléctricas de la empresa.

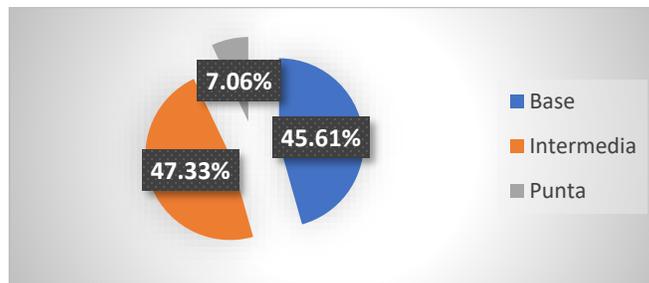


Figura 11. Distribución del consumo eléctrico por periodo de la acometida 1

DATOS PROMEDIO DE FACTURACIÓN							
Demanda [kW]				Consumo [kWh]			
Base	Intermedia	Punta	Máxima	Base	Intermedia	Punta	Mensual
111.8333	112.6667	0.916667	112.6667	17657.67	24624.08	0.583333	42282.33

Tabla 5. Datos promedio de facturación de la acometida 2 en un periodo de 1 año.  
Fuente: Facturas eléctricas de la empresa.

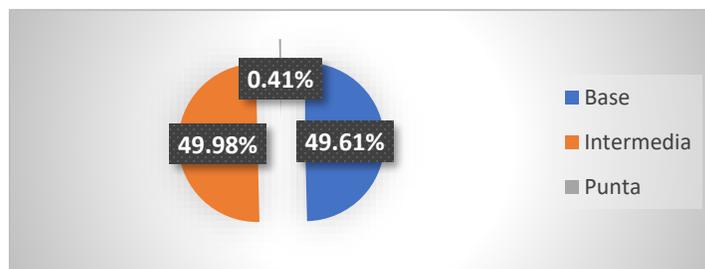


Figura 12. Distribución del consumo eléctrico por periodo de la acometida 2

### **3.4. Análisis de las cargas más significativas**

Se realizó una visita técnica la cual consistió en efectuar un inventario y levantamiento de las cargas más significativas de cada proceso, así como llevar a cabo una entrevista con el personal de mantenimiento para conocer los datos de operación y antigüedad de los motores eléctricos los cuales comentan que se cambiaron hace más de 8 años. La tabla 6 muestra el inventario de los motores más representativos y sus principales características nominales y de operación, también se observa que la mayoría son de alta eficiencia, sin embargo, debido al tiempo de antigüedad se debe de realizar la metodología adecuada para evaluar la eficiencia de los motores con y sin variador de frecuencia.

Como se ha mencionado previamente, el proceso de compresión es el principal que gasta más energía eléctrica. La planta tiene la mayoría de sus cargas concentradas en la acometida 1, sin embargo, debido a la baja producción, no operan a su máxima capacidad, rotando principalmente los 3 compresores de 100 HP que son las cargas más significativas. Durante la visita no fue posible tomar las mediciones en dichos motores de 100 HP debido a que el operador en turno no permitió realizarla debido a que solo se encontraba funcionando un compresor y es un proceso crítico. Para el motor del compresor de 75 HP tampoco fue posible tomar mediciones debido a que se encontraba desconectado por mantenimiento. De este proceso solo fue posible tomar mediciones en la entrada del variador de frecuencia que acciona al motor del compresor de 20 HP.

En la acometida 2 se tiene otro compresor de 100 HP funcionando de manera continua, en el cual si fue posible realizar las mediciones en la entrada del variador de frecuencia que acciona al motor del compresor de 100 HP.

El otro proceso que consume mayor energía eléctrica de la acometida 1 es el de evaporación, en el cual también fue posible realizar las mediciones en la entrada del arrancador que acciona al motor del evaporador de 40 HP.

ID	DATOS DE PLACA								DATOS DE OPERACIÓN			REBOBINADOS	COMENTARIOS
	MARCA	HP	KW	RPM	EFICIENCIA	FP	TENSION	FS	HR/DÍA		HR/AÑO		
									VERANO	INVIERNO			
C1A1	BALDOR	50	37.3	1775	94.5	0.85	208-230/460	1.15	-	-	8030	0	No se encuentra funcionando
C2A1	BALDOR	100	74.6	1785	95.4	0.85	230/460	-	22	22	8030	0	Solo se encuentra funcionando un compresor de los tres.
C3A1	BALDOR	100	74.6	1785	95.4	0.85	230/460	-	22	22	8030	0	
C4A1	BALDOR	100	74.6	1785	95.4	0.85	230/460	-	22	22	8030	0	
E1A1	BALDOR	40	29.84	1770	94.1	0.82	230/460	1.15	22	22	8030	0	
E2A1	BALDOR	40	29.84	1770	94.1	0.82	230/460	1.15	22	22	8030	0	
E3A1	BALDOR	40	29.84	1770	94.1	0.82	230/460	1.15	22	22	8030	0	
C5A1	UNICOM	20	14.92	1750	-	-	220	-	22	22	8030	0	Tiene variador de frecuencia
C6A1	BALDOR	40	29.84	1770	94.1	0.82	230/460	1.15	22	22	8030	0	
C7A1	BALDOR	75	55.95	1775	95	0.85	230-460	1.15	22	22	8030	0	
C8A1	IEM	30	22.38	1770	-	-	220/440	1.15	22	22	8030	0	
C9A1	BALDOR	15	11.19	-	-	0.8	230/460	-	-	-		0	Fuera de servicio
C1A2	WEG	100	74.6	1775	95.4	88	460	1.25	22	22	8030	0	Tiene variador de frecuencia

Tabla 6. Inventario de los motores más representativos.

### 3.5 Mediciones

Para determinar la eficiencia real con la que están trabajando los motores eléctricos se utilizó el método de potencia real de entrada para el motor que es accionado con arrancador, mientras que para el conjunto motor-variador de frecuencia se determinó el factor de carga y las pérdidas asociadas.

Como la metodología lo indica se necesita de un instrumento para medir la potencia a la entrada del arrancador o variador de frecuencia del motor, el instrumento utilizado fue un monitor de calidad de la energía. Con este aparato se midieron las siguientes variables eléctricas:

- Tensión de alimentación
- Potencia activa demandada

#### 3.5.1 Datos nominales de los motores eléctricos que fueron monitoreados

En la tabla 7 se presentan las características de los motores que fueron seleccionados para ser monitoreados y posteriormente analizados dependiendo de accionamiento por medio de arrancador o variador de frecuencia.

ID	DATOS DE PLACA								DATOS DE OPERACIÓN			
	MARCA	HP	KW	RPM	EFICIEN- CIA	FP	TENSION	CORRIENTE	HR/DÍA		HR/AÑO	REBOBINADO
									VERA- NO	INVIER- NO		
E2A1	BALDOR	40	29.84	1770	94.1	0.82	230	98	22	22	8030	0
CSA 1	UNICOM	20	14.92	1750	92.8		220	77	22	22	8030	0
C1A 2	WEG	100	74.6	1775	95.4	0.88	460	111	22	22	8030	0

Tabla 7. Datos nominales de los motores de interés. Fuente: Datos de placa de los equipos

### 3.5.2 Programación de las mediciones

El periodo mínimo de monitoreo fue de 30 minutos, esto con el fin de obtener los datos de una jornada completa de operación de las máquinas.

La fecha de la toma de las mediciones fue el sábado 12 de junio y se culminaron el mismo día con el objetivo determinar el comportamiento típico de uso de los motores.

En la Tabla 8 se muestra la programación de las mediciones, tanto de los días como de los horarios en que se realizaron.

PROGRAMACIÓN DE LAS MEDICIONES						
ID	MÁQUINA	FECHA		HORA		TIEMPO DE REGISTRO
		INICIO	TERMINO	INICIO	TERMINO	
E2A1	BALDOR	12-jun	12-jun	10:38	11:08	30 minutos
C5A1	UNICOM	12-jun	12-jun	11:36	12:06	30 minutos
C1A2	WEG	12-jun	12-jun	13:14	13:44	30 minutos

Tabla 8. Programación de las mediciones

## Capítulo IV. Diagnostico energético

En esta sección se realizaron los cálculos para determinar la eficiencia de los motores accionados por arrancador y por variadores de frecuencia. Los cálculos fueron realizados con los valores obtenidos por el monitor de calidad de la energía.

### 4.1 Análisis del monitoreo

Los cálculos de factor de carga y eficiencia se realizaron por el método de la potencia real de entrada con ajustes de eficiencia y por el método del conjunto motor-variador de frecuencia.

Es importante resaltar que para el análisis de los motores que son accionados por variador de frecuencia se realizaron las mediciones en la entrada del variador de frecuencia, ya que el monitor de calidad de la energía que fue utilizado no tiene la capacidad de medir señales PWM si fuera conectado a la salida del variador.

#### 4.1.2 Motor E2A1

El motor marca Baldor tiene una capacidad nominal de 29.84 kW, la velocidad del rotor es de 1,770 RPM, la tensión de alimentación es de 230 V la eficiencia es de 94.1 %.

De acuerdo a la información obtenida por el monitor de calidad de la energía se registró una demanda promedio de 26.1 kW y una tensión promedio de 231.59 V. Como resultado del cálculo por el método de la eficiencia ajustada, se tiene que esta máquina está trabajando con un factor de carga del 82.2% lo que ocasiona que la

eficiencia decremente 2.77%. Por otra parte, el ajuste por desbalance de tensión es despreciable (0.002%), lo que finalmente resulta en un decremento total de eficiencia de 4.27%, es decir, una eficiencia real ajustada de 89.7%. En el anexo 2 se muestra el cálculo.

#### 4.1.3 VFD1-Motor C5A1

El motor marca Unicom tiene una capacidad nominal de 14.92 kW, la velocidad del rotor es de 1,750 RPM, la tensión de alimentación es de 220 V, y debido a que no presenta un valor de eficiencia en la placa de datos, se utilizó el valor de 92.8% obtenido de las tablas de referencia sugeridas por el FIDE del anexo 1. El accionamiento del motor es por medio del variador de frecuencia modelo ACS880-01-087A Marca ABB de 22 kW. En la tabla 9 se puede conocer las pérdidas de conducción que dependen del porcentaje de corriente al que trabaja el motor y las pérdidas por conmutación (standby loss) de acuerdo a la norma IEC 61800-9-2 [11].

##### ACS880-01-087A-2

Standby Loss			33 W
Complete Drive Module Efficiency (61800-9-2)			
Operating Point Frequency / Current	Absolute Loss	Relative Loss	Efficiency
0 / 25 %	263 W	0.8 %	87.5 %
0 / 50 %	368 W	1.1 %	90.6 %
0 / 100 %	670 W	1.9 %	91.3 %
50 / 25 %	287 W	0.8 %	93.0 %
50 / 50 %	425 W	1.2 %	94.6 %
50 / 100 %	838 W	2.4 %	94.6 %
90 / 50 %	545 W	1.6 %	96.1 %
90 / 100 %	1142 W	3.3 %	95.9 %

Temperature Rating Maximum 40 °C

Tabla 9. Datos técnicos del variador de frecuencia 1 existente

De acuerdo a la información obtenida por el monitor de calidad de la energía conectado en la entrada del variador de frecuencia, se registró una demanda promedio de 10.13 kW, una tensión promedio de 230.15 V y una corriente promedio de 30.38 A.

Las pérdidas de conducción y conmutación son de 614.94 W y 33 W respectivamente. El valor de las pérdidas por conducción (absolute loss) se calculó interpolando el valor del porcentaje de la corriente promedio medida con los datos de la tabla 9. Con la información anterior se determinó la eficiencia y el factor de carga del conjunto motor-variador de frecuencia. En la tabla 10 se muestra el resultado de los cálculos obtenidos.

<b>DATOS DEL VDF 1 EXISTENTE ABB</b>		
PNS Potencia nominal de salida	22380	W
PNS Potencia nominal de salida	30	HP
PNV Potencia nominal del variador	23029.64	W
FCEV Factor de carga entrada del variador	0.43	p.u
Corriente de entrada variador	87	A
Pérdidas por conducción 56 % corriente	616.64	W
Pérdidas conmutación	33	W
Pérdidas totales	649.64	W
Eficiencia nominal del variador	0.972	%

Tabla 10. Resultados obtenidos del VDF 1 existente

Con los resultados obtenidos se determina que el variador esta sobredimensionado ya que opera al 43 % de la capacidad del variador.

#### 4.1.4 VFD2-Motor C1A2

El motor marca Weg tiene una capacidad nominal de 74.6 kW, la velocidad del rotor es de 1,775 RPM, la tensión de alimentación es de 460 V y la eficiencia es de 95.4%. El accionamiento del motor es por medio del variador de frecuencia modelo ACS880-01-145A Marca ABB de 75 kW. En la tabla 11 se puede conocer las pérdidas de conducción que dependen del porcentaje de corriente al que trabaja el motor y las pérdidas por conmutación (standby loss) de acuerdo a la norma IEC 61800-9-2 [11].

Standby Loss			42 W
Complete Drive Module Efficiency (61800-9-2)			
Operating Point Frequency / Current	Absolute Loss	Relative Loss	Efficiency
0 / 25 %	471 W	0.5 %	92.1 %
0 / 50 %	678 W	0.7 %	93.9 %
0 / 100 %	1228 W	1.2 %	94.4 %
50 / 25 %	523 W	0.5 %	95.6 %
50 / 50 %	776 W	0.8 %	96.6 %
50 / 100 %	1460 W	1.5 %	96.7 %
90 / 50 %	929 W	0.9 %	97.7 %
90 / 100 %	1962 W	2.0 %	97.5 %

Temperature Rating Maximum 40 °C

Tabla 11. Datos técnicos del variador de frecuencia 2 existente

De acuerdo a la información obtenida por el monitor de calidad de la energía conectado en la entrada del variador de frecuencia, se registró una demanda

promedio de 58.27 kW, una tensión promedio de 424.12 V, y una corriente promedio de 97.08 A.

Las pérdidas de conducción y conmutación son de 1693.42 W y de 42 W respectivamente. El valor de las pérdidas por conducción (absolute loss) se calculó interpolando el valor del porcentaje de la corriente promedio medida con los datos de la tabla 11. Con la información anterior se determinó la eficiencia y el factor de carga del conjunto motor-variador de frecuencia. En la tabla 12 se muestra el resultado de los cálculos obtenidos.

<b>DATOS DEL VDF 2 EXISTENTE ABB</b>		
PNS Potencia nominal de salida	75000	W
PNS Potencia nominal de salida	100	HP
PNV Potencia nominal del variador	76735.42	W
FCEV Factor de carga entrada del variador	0.75	p.u
Corriente de entrada variador	145	A
Pérdidas por conducción 87 % corriente	1693.42	W
Pérdidas conmutación	42	W
Pérdidas totales	1735.42	W
Eficiencia nominal del variador	0.977	%

Tabla 12. Resultados obtenidos del VDF 2 existente

Con los resultados obtenidos se determina que el variador está sobredimensionado ya que opera al 75 % de la capacidad del variador.

## 4.2 Análisis de alternativas

### 4.2.1 Motor E2A1

Después de evaluar el motor por el método de la eficiencia ajustada, se propone sustituir el motor de eficiencia estándar existente por uno de alta eficiencia de 40 o 50 HP.

<b>MOTOR 50 HP ALTA EFICIENCIA</b>				
<b>PERIODO SIMPLE DE RECUPERACIÓN</b>	4.78	AÑOS	<b>INVERSIÓN</b>	\$65,053.70
<b>MOTOR 40 HP ALTA EFICIENCIA</b>				
<b>PERIODO SIMPLE DE RECUPERACIÓN</b>	4.38	AÑOS	<b>INVERSIÓN</b>	\$60,444.50

Tabla 13. Periodo simple de recuperación para la propuesta de cambio de motor.

Para comparar los casos analizados, se puede utilizar el índice de rendimiento de inversión ( $\$/\text{kWh}_{\text{ahorrado}}$ ) que permite identificar con claridad el ahorro en función de la inversión:

$$\text{Para 50 hp} = \frac{\$65,053.70}{9591.56} = 6.78 \$/\text{kWh}_{\text{ahorrado}}$$

$$\text{Para 40 hp} = \frac{\$60,444.50}{9715.38} = 6.22 \$/\text{kWh}_{\text{ahorrado}}$$

CAPACIDAD MOTOR ACTUAL [HP]	kW MEDIDOS	CAPACIDAD MOTOR NUEVO [HP]	AHORRO			P.S.R.
			kW	kWh/año	\$año	
40	26.1	40	1.20	9715.38	\$ 13,771.36	4.39
		50	1.19	9591.56	\$ 13,595.85	4.78

Tabla 14. Ahorros y periodo simple de recuperación del nuevo motor

En el primer ejemplo, resulta más rentable el reemplazar el motor de 40 hp de eficiencia estándar original por el de 50 hp de alta eficiencia, aun cuando el motor de 40 hp de alta eficiencia permite un mayor ahorro de energía (40 hp: 4.63%, 50 hp: 4.57%), esto se debe al precio del motor y se corrobora por el índice de rendimiento de capital que para un motor de 40 hp es de \$6.22 de inversión por kWh ahorrado al año mientras que para el de 50 hp es de 6.78 \$/kWh.

#### 4.2.2 VFD1-Motor C5A1

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. Para el variador VFD1 de 22 kW, 30 HP se plantaron dos alternativas del fabricante Schneider.

Con el apoyo de la calculadora altivar efficiency calculator de Schneider [7] fue posible determinar el nivel de eficiencia energética del conjunto motor-variador de velocidad de acuerdo con la norma Ecodesign EN / IEC 61800-9-2 [11], representado por CDM (Modulo del convertidor completo), en el cual el rendimiento se determina según 8 puntos de funcionamiento teniendo en cuenta el par y la velocidad. En el anexo 5.1 se encuentra la ficha técnica de las pérdidas de los variadores obtenidos con la calculadora.

Con la propuesta del variador de Schneider de 30 HP se obtienen pérdidas totales de 592.64, obteniendo un nuevo factor de carga al 44%, y un ahorro anual de 457.71

kWh, esto es debido a que el tamaño del variador esta sobredimensionado con respecto al tamaño del motor. (Tabla 15).

<b>DATOS PROPUESTA 1 VDF 1 SCHNEIDER</b>		
PNS Potencia nominal de salida	22380	W
PNS Potencia nominal de salida	30	HP
PNV Potencia nominal del variador	22972.64	W
Eficiencia nominal del variador	0.97	%
Corriente de entrada variador	88	A
Pérdidas por conducción 56 % corriente	576.64	W
Pérdidas por conmutación	16	W
Pérdidas totales	592.64	W
Diferencia de pérdidas	57	W
Ahorro anual consumo un variador	457.71	kWh
FCEV Nuevo Factor de carga entrada del variador	0.44	p.u

Tabla 15. Resultados obtenidos para la propuesta 1 del VDF 1.

Con la propuesta del variador de Schneider de 20 HP se alcanza la máxima eficiencia obteniendo las pérdidas totales de 536.72, mejorando el factor de carga al 65%, y un ahorro anual de 906.74 kWh. (Tabla16)

<b>DATOS PROPUESTA 2 VDF 1 SCHNEIDER</b>		
PNS Potencia nominal de salida	14920	W
PNS Potencia nominal de salida	20	HP
PNV Potencia nominal del variador	15456.72	W
Eficiencia nominal del variador	0.96	%
Corriente de entrada variador	61	A
Pérdidas por conducción 56 % corriente	16	W
Pérdidas por conmutación	520.72	W
Pérdidas totales	536.72	W
Diferencia de pérdidas	112.92	W
Ahorro anual consumo un variador	906.74	kWh
FCEV Nuevo Factor de carga entrada del variador	0.65	p.u

Tabla 16. Resultados obtenidos para la propuesta 2 del VDF 1.

### 4.2.3 VFD2-Motor C1A2

Para el variador VFD2 de 75 kW, 100 HP se planteó también una alternativa del fabricante Schneider, proponiendo un variador de la misma capacidad 100 HP, pero más eficiente ya que se obtienen pérdidas totales de 1350.68, obteniendo un nuevo factor de carga al 76%, y un ahorro anual de 3089.46 kWh. (Tabla 17).

<b>DATOS PROPUESTA 1 VDF 2 SCHNEIDER</b>		
PNS Potencia nominal de salida	75000	W
PNS Potencia nominal de salida	100	HP
PNV Potencia nominal del variador	76350.68	W
Eficiencia nominal del variador	0.98	%
Corriente de entrada variador	88	A
Pérdidas por conducción 87% corriente	32	W
Pérdidas por conmutación	1318.68	W
Pérdidas totales	1350.68	W
Diferencia de pérdidas	384.74	W
Ahorro anual consumo un variador	3089.46	kWh
FCEV Nuevo Factor de carga entrada del variador	0.76	p.u

Tabla 17. Resultados obtenidos para la propuesta 1 del VDF 2.

De las opciones mostradas se observa que las pérdidas por conmutación del fabricante Schneider son menores y por este motivo se selecciona como propuesta de sustitución de los variadores ABB existentes.

### 4.3 Análisis de rentabilidad

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 GDMTH de la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E) [10] de 1.32 \$/kWh, con este dato se estimó que el costo de las pérdidas anuales en el variador 1 y 2 son de \$6,885.92 y \$18,394.76 en pesos mexicanos. Con la propuesta de los variadores Schneider esas pérdidas resultan en \$5,689.02 y \$14,316.67 para el variador 1 y 2 respectivamente en pesos mexicanos. (Tabla 18).

Pérdidas estado actual		Pérdidas con la propuesta de Schneider	
Pérdidas anuales kWh VDF 1	5216.61	Pérdidas anuales kWh VDF 1	4309.86
Pérdidas anuales kWh VDF 2	13935.42	Pérdidas anuales kWh VDF 1	10845.96
Costo de las pérdidas anuales VDF1	\$ 6,885.92	Costo de las pérdidas anuales VDF 1	\$5,689.02
Costo de las pérdidas anuales VDF2	\$ 18,394.76	Costo de las pérdidas anuales VDF 2	\$14,316.67

Tabla 18. Tabla de pérdidas.

La diferencia de las pérdidas de la propuesta con las pérdidas anuales actuales y considerando los costos de consumo y demanda, resulta en un ahorro económico en pesos mexicanos de \$1,637.67 y \$5,579.87 para los variadores 1 y 2 respectivamente. (Tabla 19 y 20).

Ahorros VFD 1	
Ahorro en demanda [kW]	0.11292
Ahorro anual en costo por demanda	\$440.77
Ahorro anual en consumo [kWh]	906.74
Ahorro anual en el costo por consumo	\$1,196.91
Ahorro económico	\$1,637.67
Inversión VFD1 MXN	\$26,948.01
Periodo simple de recuperación [años]	16.45

Tabla 19. Ahorros y P.S.R.

Ahorros VFD 2	
Ahorro en demanda [kW]	0.38474
Ahorro anual en costo por demanda kWh	\$1,501.78
Ahorro anual en consumo [kWh]	3089.46
Ahorro anual en el costo por consumo	\$4,078.09
Ahorro económico	\$5,579.87
Inversión VFD1 MXN	\$139,132.00
Periodo simple de recuperación [años]	24.93

Tabla 20. Ahorros y P.S.R.

#### **4.4 Políticas para estimular ahorros significativos**

De acuerdo a la publicación Políticas de Eficiencia Energética Oportunidades para Motores Eléctricos de la Agencia Internacional de Energía [12], se encuentra que el uso de los mejores motores disponibles generalmente ahorrará entre un 4 % y un 5 % de todo el consumo de energía del motor eléctrico. Vinculando estos motores con soluciones electromecánicas que tienen un costo optimizado para el usuario final generalmente ahorrarán otro 15% a 25%. El potencial existe para mejorar de forma rentable la eficiencia energética de los sistemas del motor en aproximadamente un 20 % a 30 %, lo que reduciría la demanda global total de electricidad en aproximadamente un 10%.

Las tres rutas principales para lograr estos ahorros son:

- Uso de motores de tamaño adecuado y eficiencia energética.
- Uso de controlador de frecuencia variable (VFD), cuando corresponda, para igualar la velocidad y el par del motor a los requisitos de carga mecánica del sistema.
- Optimización del sistema completo, incluido el motor, las tuberías y los conductos del tamaño correcto, engranajes y transmisiones eficientes, y equipos de uso final eficientes (ventiladores, bombas, compresores, tracción y sistemas de procesamiento y manejo industrial) para entregar el servicio de energía con mínimas pérdidas de energía.

Sin la intervención de políticas, muchas barreras hacen que sea difícil o imposible realizar estos ahorros en el entorno actual del mercado. En los mercados no regulados, los compradores tienden a invertir poco en opciones de mayor eficiencia y eligen sistemas de motor eléctrico con un costo inicial bajo. Esto ocurre para una variedad de razones, que incluyen:

- Falta de conciencia entre los compradores de motores sobre el potencial de ahorro de energía y costos ahorrados usando motores más eficientes.
- Estructuras organizativas de la empresa que gestionan su presupuesto de adquisición de equipos por separado de los presupuestos de operaciones y mantenimiento.
- El hecho de que los motores a menudo se integran en equipos producidos por el (OEM) Fabricante de Equipo Original antes de la venta a el usuario final.

##### **4.4.1 Paquete completo de políticas integradas**

Para ayudar a realizar el tremendo potencial para el ahorro de energía rentable en sistemas de accionamiento de motores eléctricos, los gobiernos deberían considerar, como primera medida, la adopción de normas mínimas de rendimiento energético (MEPS) para motores eléctricos, en línea con las mejores prácticas internacionales, sujeto al debido proceso de análisis de efectividad.

Estos estándares deben aplicarse a tantos tipos y tamaños de motores eléctricos como sea posible y no debe limitarse a motores de CA asíncronos de tamaño mediano que se venden por componentes separado. El nivel de estos estándares debe establecerse en no menos del costo mínimo del ciclo de vida, que generalmente está en IE3 o superior para motores de inducción de CA asíncronos de tamaño mediano. Aún más grande se pueden lograr ahorros de energía mediante el uso de VFD, que coinciden dinámicamente con la potencia de salida del sistema del motor a la potencia demandada por el tren de transmisión. Se pueden lograr más ahorros usando sistemas eficientes de transmisión y engranajes, y a través de un mejor dimensionamiento y gestión de sistemas de accionamiento de motores eléctricos.

#### **4.4.2 Medidas de política regulatoria**

1. Los MEPS deben introducirse en los países miembros de la AIE de acuerdo con las mejores prácticas internacionales para todas las clases principales de motores eléctricos. No deben configurarse a niveles inferiores a los motores asíncronos IE3. Estos requisitos deben aplicarse a los motores vendidos individualmente integrado en sistemas de accionamiento de motores eléctricos preempaquetados, y debe aplicarse a motores con un rango de potencia de salida tan amplio como sea posible (100 W a 1 000 kW).
2. Deben introducirse medidas reglamentarias, como MEPS y etiquetado energético, para los usos finales integrados de energía impulsada por motores entre 100 W y 1 000 kW, incluidos los ventiladores, bombas, bombas de circulación y compresores que se producen en volúmenes suficientemente grandes y con un consumo de energía significativo.
3. Los reguladores, los formuladores de políticas y las agencias de desarrollo de estándares deben garantizar que los procedimientos de prueba de rendimiento de energía sean desarrollados para todos los tipos de motores que usan cantidades significativas de electricidad y no estén cubiertos por los procedimientos de prueba existentes acordados internacionalmente.
4. Los reguladores, los formuladores de políticas y las agencias de desarrollo de estándares deben encargar el desarrollo y aplicación de procedimientos de prueba de desempeño energético para cubrir otros componentes esenciales de sistemas accionados para motores eléctricos, incluidas transmisiones, engranajes y dispositivos de control del sistema (por ejemplo, VFD). Además, se deben hacer esfuerzos para desarrollar procedimientos de prueba de rendimiento y directrices que se aplican a todo el sistema de motor eléctrico aplicaciones, como bombeo de agua para servicios públicos, ascensores, escaleras mecánicas, transportadores, etc.

5. Los reguladores podrán explorar la viabilidad de desarrollar un rendimiento energético mínimo estándares para ciertas clases de engranajes y transmisiones para desalentar (y luego prohibir) el uso de soluciones ineficientes como engranajes helicoidales y correas trapezoidales.

#### **4.4.3 Medidas de política no regulatorias**

6. Se deben desarrollar y poner en marcha programas de concientización a gran escala para informar a usuarios industriales y comerciales de electricidad de los importantes potenciales de ahorro posibles a través del uso de sistemas eficientes de accionamiento de motores eléctricos. Estos programas deben estar dirigidos a los responsables para la adquisición de motores eléctricos y sistemas de accionamiento de motores, incluidos los gerentes de operación y mantenimiento, gerentes de producción y de planta, y ejecutivos de la empresa y tomadores de decisiones responsables de la política general de la empresa sobre energía, carbono y reducción de costos.
7. Se deben desarrollar y aplicar esquemas de incentivos para alentar la adopción y el uso de las mejores prácticas del dimensionamiento del motor, la gestión y la integración, incluido el uso adecuado de VFD.
8. Los esfuerzos de creación de capacidad internacional deben expandirse sustancialmente para crear estructuras de apoyo, a una escala suficiente para apoyar las necesidades en curso en el dominio de sistemas eficientes de accionamiento para motores eléctricos.
9. El monitoreo del mercado global debe establecerse a intervalos definidos, para apoyar programas de regulación e incentivos con datos de transformación del mercado.

#### **4.5 Reparación versus reemplazo**

Los motores más grandes se reparan una, dos o incluso tres veces durante su vida útil. Según reparación y evaluaciones de bobinado, el motor promedio sale de un rebobinado con un 1% a 5% menos eficiencia, dependiendo de la práctica utilizada (EASA, 2006). Primero se debe analizar un motor viejo para identificar daños mecánicos (cojinetes y eje) o eléctricos (devanados del estator), y requiere una evaluación de costo-beneficio para cada reparación. Después de 40 000 o 100 000 horas de funcionamiento (según en el tamaño del motor, la velocidad, el uso y el mantenimiento), el mantenimiento más rutinario es la sustitución de rodamientos. Reemplazar los cojinetes desgastados, que representan la mayoría de las fallas del motor, generalmente no causan una pérdida de eficiencia cuando el motor reparado está bien instalado y alineado.

Si un motor tiene daños eléctricos (por sobrecarga, vibración, cortocircuitos eléctricos, sobrecalentamiento, aislamiento dañado, etc.), se debe establecer una rutina de rebobinado seria. Una mala práctica como quitar los devanados viejos del estator y quemar el material aislante viejo puede dañar las ranuras.

Los cables de reemplazo de diámetro correcto no siempre están disponibles y cuidados insuficientes provoca llenar las ranuras disponibles con la cantidad máxima de material de cobre. Existen ahora herramientas software para diseños de devanados trifásicos óptimos y fáciles de usar. Las empresas de reparación a menudo son pequeñas o medianas empresas con equipos de prueba de baja calidad que no realizan pruebas de forma rutinaria de entrada y salida para eficiencia energética de los motores. El conocimiento sobre la reparación de calidad es apenas disponible para el sector industrial y casi completamente no disponible en los países en desarrollo.

Por lo general, los bajos costos de mano de obra y los altos costos de materiales en los países en desarrollo los hacen más atractivos para reparar motores viejos que comprar motores caros y más eficientes.

Hoy en día, un motor viejo, con un historial de funcionamiento de 10 a 20 años, suele ser un motor ineficiente. Esto indica que incluso con un rebobinado y reparación de calidad, un motor ineficiente a menudo empeora.

Los costos de reparación de motores más pequeños (<10 kW) son más altos que los costos de reemplazo y, por lo tanto, prohibitivo. Los motores más grandes y especiales con características hechas a la medida se pueden reparar y eventualmente rebobinar con mucho cuidado. No existe una práctica estándar para medir la eficiencia antes y después un rebobinado, que mostraría claramente la pérdida de la calidad del rendimiento (en algunos casos, los motores ya no funcionan en el momento de la entrega). Países con MEPS para motores nuevos (p. ej., Nueva Zelanda) han considerado prohibir el rebobinado de motores por debajo de 50 kW para evitar un problema secundario e introducción obligatoria al mercado nuevos motores de mayor eficiencia.

## **Conclusiones o recomendaciones**

Se desarrollo un diagnóstico energético en las instalaciones y maquinaria de una fábrica de hielo. Se plantearon los límites físicos a solo dos de las tres naves industriales con las que cuenta la planta y analizaron las cargas de la acometida 1 y 2.

A partir del análisis de la planta y la información recabada, se conoció que los motores que intervienen en el proceso de compresión y evaporación representan el mayor consumo de energía. Por lo tanto, el diagnóstico energético se enfocó en identificar oportunidades de ahorro de energía en los motores, arrancadores y variadores de frecuencia de dicho proceso.

Para el motor EA21 resulta más rentable el reemplazar el motor de 40 hp de eficiencia estándar original por el de 50 hp de alta eficiencia, ya que, al realizar esta medida, el ahorro de energía anual será de 9591.5646 kWh. Su periodo simple de recuperación es de 4.78 años.

Se recomienda realizar el reemplazo del motor de 40 hp hasta que tengo un tiempo de vida mayor a 10 años o que requiera rebobinar, ya que como se revisó en las políticas, actualmente no es rentable a largo plazo rebobinar motores de capacidad menor a 50 kW, debido a que no se cuenta con la tecnología y empresas competentes para realizar dicha reparación.

En el caso del motor C5A1 se determinó que al sustituir el variador de frecuencia de 30 hp existente por uno de 20 hp se obtendría una máxima eficiencia y un ahorro de energía anual de 906.74 kWh con un periodo simple de recuperación de 16.45 años.

Para el ultimo motor C1A2 se determinó que, al sustituir el variador de frecuencia de 100 hp existente por uno de la misma capacidad, pero más eficiente se obtendría un ahorro de energía anual de 3089.46 kWh con un periodo simple de recuperación de 24.9 años.

Para el caso de los dos motores accionado con variador de frecuencia, se recomienda sustituir el variador de frecuencia hasta que presente falla o cumpla su tiempo de vida útil de 10 años.

Como recomendación general para todos los motores en conjunto con sus sistemas de accionamiento de la planta, se recomienda implementar un plan de mantenimiento preventivo para evitar que presenten fallas y esto ocasione que sean reparados ya que como se revisó, esto afecta su eficiencia.

La planta ya tiene implementada una medida de ahorro de energía que consiste en apagar las cargas en el horario punta de 20:00 a 22:00 horas, por tal motivo no hay cargos por capacidad para la acometida dos, se recomienda implementar dicha medida para las cargas de la acometida 1 para reducir el cargo por energía en horario punta y por capacidad.

Adicionalmente se sugiere concientizar al personal operativo con buenas prácticas que no representen costos adicionales como son apagado de iluminación cuando el personal no se encuentre en los sitios de trabajo, así como el aprovechamiento de la iluminación natural.

## Bibliografía

- [1] ISO 50002 (2014). Auditorías energéticas — Requisitos con orientación para su uso.
- [2] CONUEE/ GIZ (2014). Guía para realizar diagnósticos energéticos y evaluar medidas de ahorro en equipos de bombeo de agua de organismos operadores de agua potable. Recuperado el 2 de mayo de 2021 de: [https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/EstadosyMunicipios/Guia\\_para\\_realizar\\_diagnosticos\\_energeticos\\_y\\_evaluar\\_medidas\\_de\\_ahorro.pdf](https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/EstadosyMunicipios/Guia_para_realizar_diagnosticos_energeticos_y_evaluar_medidas_de_ahorro.pdf)
- [3] Urzua Rosas Iván (2020). Conceptos generales de energía eléctrica. PUEI UNAM.
- [4] Luis Armin Gutiérrez Osornio (2018). Tesina “Análisis de la eficiencia energética en el proceso de trefilado (conjunto variador de frecuencia-motor) en una fábrica metalmecánica”.
- [5] Muhammad H. Rashid. Electrónica de potencia circuitos, dispositivos y aplicaciones. Tercera Edición. Editorial Pearson
- [6] Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (2002). Procedimiento para la evaluación energética de motores eléctricos. Recuperado el 1 de mayo de 2021 de: <http://www.baldordistribuidora.com/procedimientomotores.pdf>
- [7] Schneider electric. Altivar Efficiency Calculator. Recuperado el 11 de diciembre de 2021 de: <https://altivar-efficiency-calculator.se.app/>
- [8] Baldor. Motores de eficiencia Premium-Super-E. Recuperado el 11 de diciembre de 2021 de: <https://www.baldordistribuidor.com.mx/wp-content/uploads/2020/07/MOTORES%20EFICIENCIA%20PREMIUM.pdf>
- [9] Sandoval Rodríguez Gonzalo (2021). Apuntes de la asignatura de Calidad de la energía.
- [10] Comisión Federal de Electricidad. Tarifa GDMTH. Recuperado el 12 de diciembre de 2021 de: <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRENegocio/Tarifas/GranDeMandaMTH.aspx>
- [11] International Electrotechnical Commission. IEC 61800-9-2:2017. Adjustable speed electrical power drive systems - Part 9-2: Ecodesign for power drive systems, motor starters, power electronics and their driven applications - Energy efficiency indicators for power drive systems and motor starters. Recuperado el 12 de diciembre de 2021 de: <https://webstore.iec.ch/publication/31527>

[12] International Energy Agency. Working paper. Energy-Efficiency Policy Oportunities for Electric Motor-Driven Systems. Recuperado el 16 de septiembre de 2022 de:

[https://iea.blob.core.windows.net/assets/d69b2a76-feb9-4a74-a921-2490a8fefcdf/EE\\_for\\_ElectricSystems.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/d69b2a76-feb9-4a74-a921-2490a8fefcdf/EE_for_ElectricSystems.pdf)

## Anexos

### Anexo 1. Fichas técnicas de motores y variadores



**AHORRO DE ENERGÍA MEDIANTE LA EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE MOTORES ELÉCTRICOS**

Pot (hp)	Tipo	Carcaza	Polos	rpm	Ef 0.25	Ef 0.50	Ef 0.75	Ef 1.0	
40	STD	abierto	2	3600	0.8883	0.9090	0.9111	0.8970	1,093.72
			4	1800	0.8939	0.9028	0.9109	0.9046	1,137.34
			6	1200	0.8718	0.9063	0.9122	0.9058	1,973.21
			8	900	0.8500	0.8975	0.9035	0.8935	2,410.85
		cerrado	2	3600	0.8450	0.8833	0.8945	0.8919	1,623.70
			4	1800	0.8770	0.9011	0.9119	0.9131	1,641.83
			6	1200	0.8523	0.8933	0.9021	0.8995	2,771.64
			8	900	0.8650	0.9036	0.9080	0.8986	3,556.28
	AE	abierto	2	3600	0.8879	0.9316	0.9363	0.9331	1,473.55
			4	1800	0.9110	0.9484	0.9500	0.9407	1,481.48
			6	1200	0.9083	0.9376	0.9434	0.9401	2,368.84
			8	900	0.8990	0.9270	0.9294	0.9221	2,957.70
		cerrado	2	3600	0.8854	0.9249	0.9338	0.9321	2,023.95
			4	1800	0.9147	0.9428	0.9462	0.9411	1,911.28
			6	1200	0.9050	0.9380	0.9430	0.9384	3,381.76
			8	900	0.8905	0.9273	0.9318	0.9228	4,347.79

Tabla 23. Eficiencia de motores de 40 HP estándar y de alta eficiencia [6].

**Motores TEFC Super-E® de Eficiencia Premium**



**Datos de Desempeño: Motor TEFC - Totalmente Cerrado, Enfriado por Ventilador; Base Rígida; 230/460 Voltios; Trifásico; 10 a 75 Hp**

Hp	kW	RPM	Carcasa	No. de Catálogo	Amperios 460V ①		Par a Pl. Carga Lb. Pte	% Eficiencia			% Factor Pot.			Cojinetes		Cód. Volt.	Dim. "C"	Diag. Con. No.
					Plena Carga	Rotor Bloq.		1/2	3/4	Plena Carga	1/2	3/4	Plena Carga	DE	ODE			
10	7.5	3500	215T	EM3711T	11.2	120	15	92.7	92.9	91.7	82	89	92	6307	6206	E1	19.02	CD0005
10	7.5	3500	215T	EM3771T	11.2	120	15	92.7	92.9	91.7	82	89	92	6307	6206	E1	18.45	CD0005
10	7.5	1760	215T	EM3714T	12.5	83.5	30	91.7	92.4	91.7	62	75	81	6307	6206	E1	19.77	CD0005
10	7.5	1760	215T	EM3774T	12.5	83.5	30	91.7	92.4	91.7	62	75	81	6307	6206	E1	18.45	CD0005
10	7.5	1180	256T	EM2332T	14.2	93	44.4	90.2	91.6	91.7	55	66	72	6309	6208	E1	23.16	CD0180
15	11.2	3525	254T	EM2394T	17.2	128	22.2	90.8	91.9	91.7	78	86	88	6309	6208	E1	23.16	CD0180
15	11.2	1765	254T	EM2333T	18.5	123	44.6	91.9	92.6	92.4	66	77	82	6309	6208	E1	23.16	CD0005
15	11.2	1180	286T	EM4100T	18.7	132	66.7	92.3	92.8	92.4	65	76	81	6311	6309	E1	27.76	CD0180
20	14.9	3540	256T	EM4106T	23	201	29.7	91.1	92.3	92.4	74	84	89	6309	6208	E1	23.16	CD0180
20	14.9	1765	256T	EM2334T	24	175	59	92.8	93.1	93.0	69	80	84	6309	6208	E1	23.16	CD0005
20	14.9	1175	286T	EM4102T	25	178	89	92.3	92.9	92.4	65	75	81	6311	6309	E1	27.76	CD0005
25	18.7	3530	284TS	EM4107T	28	236	37.2	93.0	93.5	93.0	82	89	91	6311	6309	E1	24.59	CD0180
25	18.7	1770	284T	EM4103T	30	188	74.2	92.4	93.6	93.6	72	81	84	6311	6309	E1	27.76	CD0005
25	18.7	1180	324T	EM4111T	32	248	111	91.9	92.9	93.0	61	73	79	6312	6309	F	30.39	CD0005
30	22.4	3520	286TS	EM4108T	33	281	44.7	93.2	93.5	93.0	83	89	92	6311	6208	E1	24.59	CD0180
30	22.4	1770	286T	EM4104T	36	246	89.0	93.8	94.4	94.1	66	75	83	6311	6309	E1	27.76	CD0005
30	22.4	1180	326T	EM4117T	38	285	134	92.4	93.2	93.0	61	72	79	6312	6311	E1	30.28	CD0005
40	30	3540	324TS	EM4109T	45	286	59.5	93.9	94.4	93.6	82	88	90	6312	6311	E1	28.78	CD0005
40	30	1775	324T	EM4110T	46	320	118	93.9	94.6	94.5	73	81	86	6312	6311	E1	30.28	CD0180
40	30	1185	364T	EM4308T	50.5	355	177	93.3	94.3	94.1	62	73	79	6313	6312	F	32.84	CD0005
50	37	3540	326TS	EM4114T	54	422	74	93.8	94.4	94.1	85	90	92	6312	6311	E1	28.90	CD0005
50	37	1775	326T	EM4115T	57	392	149	94.4	94.9	94.5	73	82	87	6312	6311	E1	30.28	CD0180
50	37	1185	366T	EM4312T	61	409	221	93.8	94.3	94.1	67	77	81	6313	6312	E1	32.84	CD0005
60	45	3565	364TS	EM4310T	67	580	88.5	92.6	94.0	94.1	78	86	90	6313	6312	E1	30.72	CD0180
60	45	1790	364T	EM4314T	69	447	177	94.7	95.2	95.0	74	82	86	6313	6312	E1	32.84	CD0180
60	45	1185	404T	EM4403T	72.5	455	265	94.0	94.7	94.5	69	78	83	6316	6313	F	38.06	CD0180

Tabla 24. Eficiencia de motores de alta eficiencia propuestos de 40 y 50 HP [8].



**Family:** Altivar Building ATV212  
**Drive type:** Cabinet mounting drive  
**Voltage range:** 3x 200-240VAC  
**Selected voltage:** 240 VAC  
**Overload:** Normal Duty  
**Power rating:** 15 kW / 20 HP  
**Motor settings:** 15 kW / 240 V / 46.91 A

**Nominal current:** 61 A  
**Nominal apparent power:** 25.4 kVA  
**Nominal frequency:** 50 Hz  
**Standby loss:** 16 W  
**Drive loss:** 888 W  
**Max Temperature:** 40 °C

Point	Relative speed	Relative torque	DRIVE			DRIVE + MOTOR		
			Relative loss	Absolute loss	Efficiency	Relative loss	Absolute loss	Efficiency
1	10	25	1.16 %	294 W	65.5 %	3.31 %	496 W	57.6 %
2	10	50	1.67 %	424 W	71.8 %	5.17 %	776 W	53.7 %
3	10	100	3.17 %	803 W	72.9 %	11.62 %	1743 W	46.3 %
4	50	25	1.06 %	268 W	91.3 %	4.47 %	671 W	83.4 %
5	50	50	1.57 %	399 W	93.1 %	6.35 %	952 W	82.5 %
6	50	100	3.02 %	766 W	93.4 %	13.13 %	1969 W	79.2 %
7	90	50	1.78 %	452 W	95.6 %	-	-	-
8	90	100	3.50 %	888 W	95.6 %	-	-	-
9	100	50	1.84 %	466 W	95.9 %	10.33 %	1549 W	85.3 %
10	100	100	3.64 %	922 W	95.9 %	17.76 %	2664 W	84.9 %

Tabla 25. Ficha técnica de pérdidas del variador de 20 HP obtenida de la calculadora Altivar Efficiency Calculator [7]

ATV212HD22M3X



+ IE2 motor



**Family:** Altivar Building ATV212  
**Drive type:** Cabinet mounting drive  
**Voltage range:** 3x 200-240VAC  
**Selected voltage:** 240 VAC  
**Overload:** Normal Duty  
**Power rating:** 22 kW / 30 HP  
**Motor settings:** 22 kW / 240 V / 68.08 A

**Nominal current:** 88 A  
**Nominal apparent power:** 36.6 kVA  
**Nominal frequency:** 50 Hz  
**Standby loss:** 16 W  
**Drive loss:** 989 W  
**Max Temperature:** 50 °C

Point	Relative speed	Relative torque	DRIVE			DRIVE + MOTOR		
			Relative loss	Absolute loss	Efficiency	Relative loss	Absolute loss	Efficiency
1	10	25	1.00 %	364 W	68.9 %	2.88 %	634 W	61.0 %
2	10	50	1.44 %	526 W	74.8 %	4.45 %	979 W	57.4 %
3	10	100	2.74 %	1001 W	75.6 %	10.32 %	2270 W	49.2 %
4	50	25	0.87 %	318 W	92.7 %	3.92 %	862 W	85.2 %
5	50	50	1.28 %	468 W	94.3 %	5.45 %	1198 W	84.6 %
6	50	100	2.46 %	899 W	94.5 %	11.46 %	2521 W	81.4 %
7	90	50	1.39 %	507 W	96.5 %	-	-	-
8	90	100	2.70 %	989 W	96.6 %	-	-	-
9	100	50	1.41 %	517 W	96.8 %	8.86 %	1949 W	87.1 %
10	100	100	2.77 %	1014 W	96.8 %	15.13 %	3329 W	86.9 %

Tabla 26. Ficha técnica de pérdidas del variador de 30 HP obtenida de la calculadora Altivar Efficiency Calculator [7].



**Family:** Altivar Machine ATV340  
**Drive type:** Wall mounting drive  
**Voltage range:** 3x 380-480VAC  
**Selected voltage:** 480 VAC  
**Overload:** Heavy Duty  
**Power rating:** 75 kW / 100 HP  
**Motor settings:** 75 kW / 480 V / 111.62 A

**Nominal current:** 145 A  
**Nominal apparent power:** 120.6 kVA  
**Nominal frequency:** 50 Hz  
**Standby loss:** 32 W  
**Drive loss:** 1462 W  
**Max Temperature:** 50 °C

Point	Relative speed	Relative torque	DRIVE			DRIVE + MOTOR		
			Relative loss	Absolute loss	Efficiency	Relative loss	Absolute loss	Efficiency
1	10	25	0.40 %	483 W	85.0 %	1.50 %	1122 W	73.7 %
2	10	50	0.58 %	703 W	88.2 %	2.02 %	1516 W	74.2 %
3	10	100	1.12 %	1351 W	88.5 %	4.89 %	3665 W	67.2 %
4	50	25	0.36 %	434 W	96.9 %	2.45 %	1834 W	89.6 %
5	50	50	0.54 %	645 W	97.6 %	3.06 %	2297 W	90.4 %
6	50	100	1.05 %	1260 W	97.6 %	6.09 %	4570 W	89.1 %
7	90	50	0.60 %	719 W	98.5 %	-	-	-
8	90	100	1.21 %	1462 W	98.5 %	-	-	-
9	100	50	0.61 %	740 W	98.6 %	5.69 %	4270 W	91.1 %
10	100	100	1.26 %	1522 W	98.6 %	9.60 %	7203 W	91.2 %

Tabla 27. Ficha técnica de pérdidas del variador de 100 HP obtenida de la calculadora Altivar Efficiency Calculator [7].

## Anexo 2 Memoria de cálculo Método de la eficiencia ajustada

DATOS DE PLACA MOTOR ACTUAL			
ID	E21A	TENSION NOMINAL Vnom [V]	230
MARCA	BALDOR	CORRIENTE NOMINAL Inom [A]	98
P SAL_NOM [HP]	40	TIPO DE CARCASA	CERRADA
VELOCIDAD [RPM]	1770	NIVEL DE PROTECCIÓN	IP65
ηN EFICIENCIA NOMINAL [%]	0.94	FACTOR DE SERVICIO	1.15

HISTORIAL	
ANTIGÜEDAD [AÑOS]	8
REEMBOBINADO SI/NO	NO
EXISTE UN PROGRAMA DE MANTENIMIENTO SI/NO	NO
HORAS DE OPERACIÓN/DIA	22
DIAS DE OPERACIÓN AÑO	365
HORAS DE OPERACIÓN/AÑO	8030

MEDICIONES				
TENSION DE LINEA PROM	VAB [V]	VBC[V]	VCB[V]	PROM VP [V]
	230.93	232.17	231.68	231.5933
CORRIENTE DE LINEA PROM	IA[A]	IB[A]	IC[A]	I PROM [A]
	88.31	87.63	90.4	88.78
POTENCIA ENT_REAL PROM	[KW]	[W]		
	26.1	26100		

1. CÁLCULO FACTOR DE CARGA Y EFICIENCIA DEL MOTOR					
P ENT_REAL [kW]	26.1				
FC REAL [%]	0.8221	FC 1	0.75	FC 2	1
η REAL [%]	0.9122	η1	0.9119	η2	0.9131
$FC_{real} = \left[ \frac{(\eta_N)(P_{ent\_real})}{(P_{sal\_nom})(0.746)} \right]$		$\eta_{real} = \left( \frac{FC_{real} - FC_1}{FC_2 - FC_1} \right) (\eta_2 - \eta_1) + \eta_1$			
2. DETERMINAR LOS AJUSTES DE EFICIENCIA					

FACTOR DE AJUSTE POR DIFERENCIA DE TENSIÓN				
DIFERENCIA DE TENSIÓN VV	0.00693	=	0.6927	%
DEACUERDO A CURVA % DISMINUCIÓN VS %VARIACIÓN DE VOLTAJE				
FADV	-	0.5	=	0.005 %
$VV = \left( \frac{V_p}{V_{nom}} - 1 \right)$ $FA_{VV} = (VV)[0.07 - 1.334(VV)] - 0.0009$				
FAVV=	-0.0004790			
	-0.04790			%
FACTOR DE AJUSTE POR DESBALANCE DE TENSIÓN				
DV	0.002483	Ó	0.002864	DV MAX
	MENOR DIF		MAYOR DIF	FADV
				0.9999998
$DV = \left( \frac{\text{Max}\{(V_{max} - V) \text{ ó } (V - V_{min})\}}{V} \right)$		$FA_{dv} = 1 - (DV)[0.0113 + 0.0073(DV)]$		
FACTOR DE AJUSTE POR REBOBINADOS			FARE	0
FACTOR DE AJUSTE POR ANTIGÜEDAD			FAANT	0.01
EFICIENCIA AJUSTADA CON LA QUE ESTA TRABAJANDO EL MOTOR ACTUAL				
$\eta_{real\ ajustada} = FA_{dv}(\eta_{real} + FA_{VV} - FA_{RE} - FA_{ANT})$				
η REAL AJUSTADA	0.8972		89.7246	%
	5	=		
DECREMENTO TOTAL EFICIENCIA	0.0427		4.2753	%
	5			
3. DETERMINAR LA POTENCIA REAL DE SALIDA DEL MOTOR				
P SAL_REAL	23.4181	kW	=	31.3915 HP
$Pot_{sal\_real} = (\eta_{ajustada})(Pot_{ele})$				
4. PROPONER UN NUEVO MOTOR DE ALTA EFICIENCIA				

POT AE MEC	31.2241 kW	=	41.8554 HP
$Pot_{AE_{mec}} = \left[ \frac{Pot_{mec}}{0.75} \right]$		Se dimensiona un nuevo motor de alta eficiencia de 50 HP	

DATOS DE PLACA NUEVO MOTOR ALTA EFICIENCIA			
ID	E21A	TENSION NOMINAL Vnom [V]	230
MARCA	BALDOR	CORRIENTE NOMINAL Inom [A]	114
P SAL_NOM [HP]	50	TIPO DE CARCASA	CERRADA
VELOCIDAD [RPM]	1775	NIVEL DE PROTECCIÓN	IP65
ηN EFICIENCIA NOMINAL [%]	0.945	FACTOR DE SERVICIO	1.15

5. CÁLCULO FACTOR DE CARGA Y EFICIENCIA DEL NUEVO MOTOR					
P ENT_REAL [kW]		26.1			
FC AE [%]	0.6278	FC 1	0.5	FC 2	0.75
η AE [%]	0.9452	η1	0.944	η2	0.949
$FC_{AE} = \left[ \frac{Pot_{sal\_real}}{Pot_{AE\ placa}} \right]$		$\eta_{AE} = \left( \frac{FC_{AE} - FC_1}{FC_2 - FC_1} \right) (\eta_2 - \eta_1) + \eta_1$			
6. DETERMINAR LOS AJUSTES DE EFICIENCIA					
FACTOR DE AJUSTE POR REBOBINADOS		FARE			0
FACTOR DE AJUSTE POR ANTIGÜEDAD		FAANT			0
FACTOR DE AJUSTE POR DIFERENCIA DE TENSÓN					
VV DIFERENCIA DE TENSÓN		0.00693	=	0.6927	%
FADV		-0.5	=	-0.005	%
FAVV		-0.000479	=	-0.0479	%
FACTOR DE AJUSTE POR DESBALANCE DE TENSÓN					
DV MAX	0.29	FADV		0.9999998	
EFICIENCIA AJUSTADA CON LA QUE TRABAJARA EL MOTOR PROPUESTO					
$\eta_{AE\ ajustada} = FA_{dv} (\eta_{AE} + FA_{VV})$					
η AE ajustada		0.94028	=	94.0278	%
7. DETERMINAR LA POTENCIA DEMANDADA DEL NUEVO MOTOR					

POT AE_ELEC	24.9055	kW	=	33.3854	HP
$Pot_{AEele} = \frac{(Pot_{AEmsc})(FC_{AE})(0.746)}{\eta_{AEajustada}}$					
<b>8. CÁLCULO DEL AHORRO ENERGÉTICO Y ECÓNOMICO</b>					
<b>CÁLCULO DEL AHORRO EN POTENCIA (DEMANDADA)</b>					
AD	1.1944	kW	$A_D = Pot_{ele} - Pot_{AEele}$		
AHORRO	4.5764	%			
<b>CÁLCULO DEL AHORRO EN ENERGÍA (CONSUMO)</b>					
AC	9591.5646	kWh/año	$A_C = (A_D)(hora\ de\ operacion\ al\ año)$		
<b>COSTO PONDERADO</b>		1.3286 \$/kWh			
$Costo_C\ Ponderado = (Fracción\ base)\left(\frac{\$}{kW_{base}}\right) + (Fracción\ intermedia)\left(\frac{\$}{kW_{intermedia}}\right) + (Fracción\ punta)\left(\frac{\$}{kW_{punta}}\right)$					
<b>CÁLCULO DEL AHORRO ECONÓMICO</b>					
$A_E = (12)(A_D)(Costo_D) + (A_C)(Costo_C\ Ponderado)$					
			AE	\$ 13,595.85	\$/año
<b>PERIODO SIMPLE DE RECUPERACIÓN P.S.R.</b>		4.78	AÑOS	INVERSIÓN	\$65,053.70
$P.S.R. = \frac{Inversión}{A_E}$					

Con el fin hacer un análisis más profundo se desarrollará el mismo procedimiento ahora con el motor de 40 hp de alta eficiencia.

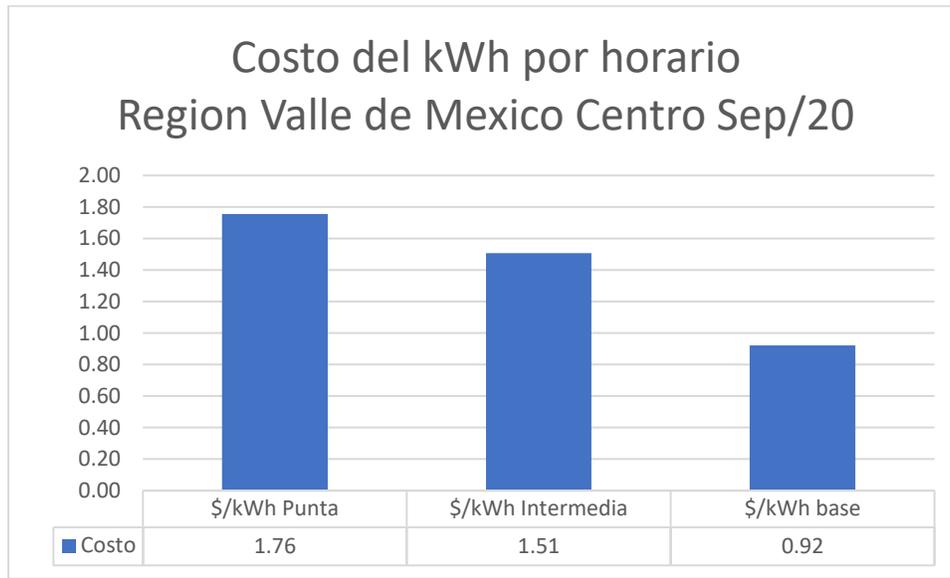
DATOS DE PLACA NUEVO MOTOR ALTA EFICIENCIA			
ID	E21A	TENSION NOMINAL Vnom [V]	230
MARCA	BALDOR	CORRIENTE NOMINAL Inom [A]	92
P SAL_NOM [HP]	40	TIPO DE CARCASA	CERRADA
VELOCIDAD [RPM]	1775	NIVEL DE PROTECCIÓN	IP65
ηN EFICIENCIA NOMINAL [%]	0.945	FACTOR DE SERVICIO	1.15

4. CÁLCULO FACTOR DE CARGA Y EFICIENCIA DEL NUEVO MOTOR					
P ENT_REAL [kW]		26.1			
FC AE [%]	0.7847	FC 1	0.75	FC 2	1
η AE [%]	0.9458	η1	0.946	η2	0.945
$FC_{AE} = \left[ \frac{Pot_{sal\_real}}{Pot_{AE\ placa}} \right] \quad \eta_{AE} = \left( \frac{FC_{AE} - FC_1}{FC_2 - FC_1} \right) (\eta_2 - \eta_1) + \eta_1$					
5. DETERMINAR LOS AJUSTES DE EFICIENCIA DEL MOTOR PROPUESTO					
FACTOR DE AJUSTE POR REBOBINADOS		FARE			0
FACTOR DE AJUSTE POR ANTIGÜEDAD		FAANT			0
FACTOR DE AJUSTE POR DIFERENCIA DE TENSIÓN					
VV DIFERENCIA DE TENSIÓN	0.00693	=		0.6927	%
FADV	-0.5	=		-0.005	%
FAVV	-0.000479	=		-0.0479	%
FACTOR DE AJUSTE POR DESBALANCE DE TENSIÓN					
DV MAX	0.29	FADV		0.9999998	
EFICIENCIA AJUSTADA CON LA QUE TRABAJARÁ EL MOTOR PROPUESTO					
$\eta_{AE\ ajustada} = FA_{dv} (\eta_{AE} + FA_{VV})$					
η AE ajustada	0.94086	=		94.0860	%
6. DETERMINAR LA POTENCIA DEMANDADA DEL NUEVO MOTOR					
POT AE_ELEC	24.8901	kW	=	33.3647	HP
$Pot_{AEele} = \frac{(Pot_{AEmec})(FC_{AE})(0.746)}{\eta_{AEajustada}}$					
7. CÁLCULO DEL AHORRO ENERGETICO Y ECÓNOMICO					
CÁLCULO DEL AHORRO EN POTENCIA (DEMANDADA)					
AD	1.2098	kW			
AHORRO	4.6355	%			
$A_D = Pot_{ele} - Pot_{AEele}$					

<b>CÁLCULO DEL AHORRO EN ENERGÍA (CONSUMO)</b>				
AC	9715.3866	kWh/año	$A_C = (A_D)(hora\ de\ operacion\ al\ año)$	
<b>COSTO PONDERADO</b>		1.3286	\$/kWh	
$Costo_{C\ Ponderado} = (Fracción_{base}) \left( \frac{\$}{kW_{base}} \right) + (Fracción_{intermedia}) \left( \frac{\$}{kW_{intermedia}} \right) + (Fracción_{punta}) \left( \frac{\$}{kW_{punta}} \right)$				
<b>CÁLCULO DEL AHORRO ECONÓMICO</b>				
$A_E = (12)(A_D)(Costo_D) + (A_C)(Costo_{C\ Ponderado})$				
		AE	\$ 13,771.36	\$/año
<b>PERIODO SIMPLE DE RECUPERACIÓN</b>	4.3891	AÑOS	INVERSIÓN	\$60,444.50
$P.S.R. = \frac{Inversión}{A_E}$				

### Anexo 3. Cálculo de Costo ponderado del kWh para la tarifa GDMTH

El costo ponderado del kWh es practico para el cálculo de facturación en tarifas horarias, debido a que conocer la proyección exacta de la facturación de una empresa sería un procedimiento muy largo y poco práctico puesto que es costo del kWh real depende del uso horario, de la región geográfica de consumo, de las horas en punta, intermedia y base, además el costo para cada horario, etc. [6]



A continuación, se presenta el procedimiento para determinar el costo ponderado del kWh en tarifa GDMTH para la región Valle de México Centro.

Se cuentan los domingos y los días festivos (D-F), los sábados (S) y los días hábiles de lunes a viernes (L-V) del año para cada horario.

PERIODO	DÍAS DURANTE 2021				Total
	L-V	S	D-F	Subtotal	
Verano	149	30	31	210	365
Invierno	106	22	27	155	

DÍAS DURANTE 2021				
L-V	S	D-F	Subtotal	Total
149	30	31	210	365
106	22	27	155	

Se necesita saber cuántas horas corresponden al horario base, intermedia y punta, para periodo de verano e invierno respectivamente.

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

El número de días de cada periodo se multiplica por el número de horas al día de cada horario, para determinar cuántas horas al día de cada horario, para determinar cuántas horas del año corresponden a horario punta, intermedia y base, como se muestra a continuación:

	Horario	Día	Horas al día	Días	Horas por periodo
<b>BASE</b>	Verano	L-V	6	149	894
		S	7	30	210
		D-F	19	31	589
	Verano	L-V	6	106	636
		S	8	22	176
		D-F	18	27	486
				Total Base	2991

	Horario	Día	Horas al día	Días	Horas por periodo
INTERMEDIO	Verano	L-V	16	149	2384
		S	17	30	510
		D-F	5	31	155
	Invierno	L-V	14	106	1484
		S	14	22	308
		D-F	6	27	162
				Total Intermedio	5003

	Horario	Día	Horas al día	Días	Horas por periodo
PUNTA	Verano	L-V	2	149	298
		S	0	30	0
		D-F	0	31	0
	Invierno	L-V	4	106	424
		S	2	22	44
		D-F	0	27	0
				Total punta	766

Se determina la fracción de horas base, intermedia y punta que existen en el año, tomando en consideración 8760 horas para el año 2020.

$$\text{Fracción horario base} = \frac{2991}{8760} = 0.3414$$

$$\text{Fracción horario intermedia} = \frac{5003}{8760} = 0.5711$$

$$\text{Fracción horario punta} = \frac{766}{8760} = .0874$$

Consultando la página de C.F.E se obtiene el costo de la electricidad para el mes deseado y la región como se muestra a continuación:

CUOTAS SEPTIEMBRE 2020		
\$/kWh Punta	\$/kWh Intermedia	\$/kWh base
1.7552	1.5065	0.9218

Y el costo ponderado del kWh se obtiene de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Costo}_{C \text{ Ponderado}} &= (\text{Fracción}_{\text{base}}) \left( \frac{\$}{\text{kWh}_{\text{base}}} \right) + (\text{Fracción}_{\text{intermedia}}) \left( \frac{\$}{\text{kWh}_{\text{intermedia}}} \right) \\ &+ (\text{Fracción}_{\text{punta}}) \left( \frac{\$}{\text{kWh}_{\text{punta}}} \right) \end{aligned}$$

Sustituyendo los valores anteriores se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Costo}_{C \text{ Ponderado}} &= (0.3414)(0.9218) + (0.5711)(1.5065) + (0.0874)(1.7552) \\ &= 1.3286 \frac{\$}{\text{kWh}} \end{aligned}$$