



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudio de Postgrado
Maestría en Artes en Energía y Ambiente

**AHORRO ENERGÉTICO MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DEL USO DE VARIADORES
DE FRECUENCIA, EN EL TRATAMIENTO DE JUGO DE CAÑA DE AZÚCAR,
INGENIO LA UNIÓN**

Luis Enrique González Pivaral

Asesorado por el Ing. Byron de Jesús López Maldonado

Guatemala, septiembre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**AHORRO ENERGÉTICO MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DEL USO DE
VARIADORES DE FRECUENCIA, EN EL TRATAMIENTO DE JUGO DE
CAÑA DE AZÚCAR, INGENIO LA UNIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LUIS ENRIQUE GONZÁLEZ PIVARAL

ASESORADO POR EL ING. BYRON DE JESÚS LÓPEZ MALDONADO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ARTES EN ENERGÍA Y AMBIENTE

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Ángel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

DECANO	Mtro. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Mtro. Murphy Olympos Paiz Recinos
EXAMINADORA	Mtra. Ismelda Isabel López Tohom
EXAMINADOR	Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
SECRETARIA	Mtra. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

AHORRO ENERGÉTICO MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DEL USO DE VARIABLES DE FRECUENCIA, EN EL TRATAMIENTO DE JUGO DE CAÑA DE AZÚCAR, INGENIO LA UNIÓN

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, con fecha 19 de noviembre de 2016.

Luis Enrique González Pivaral

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por las bendiciones derramadas y por su misericordia. Porque todo absolutamente todo se lo debo a él.
- Mi abuelita** Por aún aguantarme todo, ser mi segunda madre y apoyarme siempre.
- Mis padres** Porque después de todo lo recorrido estos logros son de ellos, por siempre estar ahí.
- Mis hermanas** Por su apoyo y sacrificio, porque también es de ellas este logro.

AGRADECIMIENTOS A:

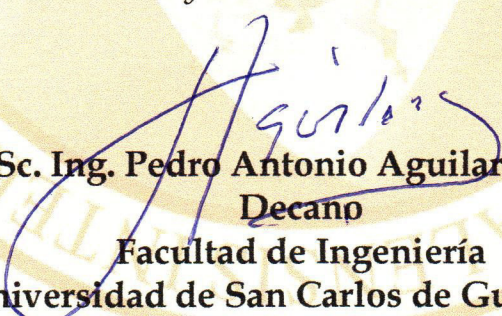
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios superiores. Por el conocimiento adquirido y experiencias vividas.
Ingenio La Unión, S.A.	Por abrirme las puertas para desarrollarme como profesional y por el apoyo recibido.
Ing. Estiven Recinos, Ing. Sergio Rodríguez y Ing. Marvin Vásquez	Por el apoyo brindado en la carrera que concluyó con éxito.
Personal de Ingenio La Unión, S.A.	Por la amistad, experiencia y apoyo brindado día con día.
Señora Agueda de Pérez	Por su apoyo y consejos.
Edy Aguilar y Sergio Cabrera	Por el apoyo, por su amistad, por el gran equipo que formamos.
A mis amigos	Por apoyarme a seguir adelante.

Ref.APT-2018-026

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Postgrado, al Trabajo de Graduación de la Maestría en Artes en Energía y Ambiente titulado: **"AHORRO ENERGÉTICO MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DEL USO DE VARIADORES DE FRECUENCIA, EN EL TRATAMIENTO DE JUGO DE CAÑA DE AZÚCAR, INGENIO LA UNIÓN"** presentado por el Ingeniero en Electrónica Luis Enrique González Pivaral, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

"Id y Enseñad a Todos"


MSc. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



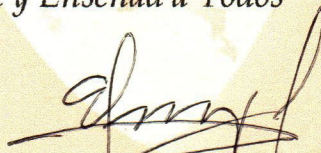
Guatemala, septiembre de 2018.

Cc: archivo/L.Z.L.A.

El Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y dar el visto bueno del revisor y la aprobación del área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado **"AHORRO ENERGÉTICO MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DEL USO DE VARIADORES DE FRECUENCIA, EN EL TRATAMIENTO DE JUGO DE CAÑA DE AZÚCAR, INGENIO LA UNIÓN"** presentado por el Ingeniero en Electrónica Luis Enrique González Pivaral, correspondiente al programa de Maestría en Artes en Energía y Ambiente; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"



M.A. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, septiembre de 2018.

Cc archivo/L.Z.L.A.

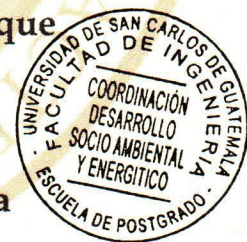
Ref.APT-2018-026

Como Coordinador de la Maestría en Artes en Energía y Ambiente doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado **"AHORRO ENERGÉTICO MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DEL USO DE VARIADORES DE FRECUENCIA, EN EL TRATAMIENTO DE JUGO DE CAÑA DE AZÚCAR, INGENIO LA UNIÓN"** presentado por el Ingeniero en Electrónica **Luis Enrique González Pivaral**.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Maestro Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador(a) de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, septiembre de 2018.

Cc: archivo/L.Z.L.A.

Ref.APT-2018-026

En mi calidad como Asesor del Ingeniero en Electrónica **Luis Enrique González Pivaral** doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado **"AHORRO ENERGÉTICO MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DEL USO DE VARIADORES DE FRECUENCIA, EN EL TRATAMIENTO DE JUGO DE CAÑA DE AZÚCAR, INGENIO LA UNIÓN"** quien se encuentra en el programa de Maestría en Artes en Energía y Ambiente en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"



Maestro. Ing. Byron de Jesús López Maldonado
Asesor(a)
Maestro en Energía y Ambiente

Guatemala, septiembre de 2018.

Cc: archivo/L.Z.L.A.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	I
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XIII
OBJETIVOS	XV
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1. Eficiencia energética	1
1.1.1. Fuentes de energía	2
1.1.1.1. Fuentes renovables	2
1.1.1.2. Fuentes no renovables	2
1.1.2. Consumo de energía eléctrica	3
1.1.3. Impacto medio ambiental	4
1.2. Proceso de producción de azúcar	5
1.2.1. Patio de caña	5
1.2.2. Preparación de caña	6
1.2.3. Molienda	6
1.2.4. Clarificación y filtración	6
1.2.5. Evaporación	7
1.2.6. Cristalización	8
1.2.7. Centrifugación	8
1.2.8. Secado y almacenamiento	8

1.3.	Motores de inducción de corriente alterna.....	8
1.3.1.	Control de velocidad variando el número de polos.....	11
1.3.2.	Control de velocidad por cambio de frecuencia	12
1.3.3.	Eficiencia de los motores y aplicación	12
1.4.	Variadores de frecuencia	17
1.4.1.	Relación volts/Hz.....	17
1.4.2.	Principios de operación	19
1.4.2.1.	Rectificador.....	19
1.4.2.2.	Inversor	20
1.4.2.3.	Inversor PWM.....	21
1.4.3.	Interacción entre variador de frecuencia, red y motor	22
1.4.3.1.	Armónicas.....	22
1.4.3.2.	Temperatura del motor	23
1.4.3.3.	Aislante del motor	24
1.4.4.	Eficiencia del sistema variador de velocidad y motor	25
1.4.5.	Ventajas y desventajas de utilizar variadores de velocidad	26
2.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	29
2.1.	Distribución de equipos utilizado en clarificación.....	30
2.2.	Generación y consumo de energía.....	37
2.3.	Datos y selección de equipos para pruebas	38
2.4.	Toma de datos	41
2.5.	Herramientas estadísticas	45

3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	49
3.1.	Reducción del consumo de energía, mediante el variador de velocidad	49
3.2.	Consumo de energía de los motores eléctricos	51
3.3.	Viabilidad técnica para la implementación de variadores de velocidad	54
3.4.	Ahorro y período de amortización	56
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	59
4.1.	Consumo de energía utilizando variadores de velocidad	59
4.2.	Consumo de energía de motores instalados	60
4.3.	Viabilidad técnica de motores instalados	61
4.4.	Inversión, ahorro y período de amortización	62
	CONCLUSIONES	65
	RECOMENDACIONES	67
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Motor de inducción de jaula	9
2.	Relación V/Hz	18
3.	Partes de un variador de velocidad	19
4.	Rectificador por tiristores.....	19
5.	Inversor	20
6.	Inversor PWM, forma de onda.....	21
7.	Diagrama unifilar A.....	32
8.	Diagrama unifilar B.....	33
9.	Diagrama unifilar C	34
10.	Diagrama unifilar D	35
11.	Diagrama unifilar E.....	36
12.	Consumo promedio de corriente	49
13.	Consumo de corriente – control por variador.....	50
14.	Consumo de energía - variador vs. válvula	51
15.	Capacidad de motores	52
16.	Consumo de energía de motores	53
17.	Generación, venta y consumo de energía	54
18.	Filtro LC entre variador y motor	55

TABLAS

I.	Consumo de energía eléctrica en GWH	4
II.	Distribución típica de pérdidas en motores.....	14

III.	Eficiencia de motores FULL-LOAD	15
IV.	Datos de placa del motor	30
V.	Generación, venta y consumo de energía	37
VI.	Consumo de energía con base a datos de placa	38
VII.	Datos de motor sin variador	41
VIII.	Comparación de datos.....	42
IX.	Consumo y ahorro de energía	44
X.	Costo – ahorro de energía (motor a prueba).....	57
XI.	Inversión inicial	57

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperios
HP	Caballos de potencia
PLC	Controlador lógico programable
CA	Corriente alterna
CD	Corriente directa
I	Corriente eléctrica
σ	Desviación estándar
ϵ	Diferencial de potencial
η	Eficiencia del motor
Fp	Factor de potencia
Φ	Flujo de campo magnético
f	Frecuencia
GWH	Gigawatt hora
Hz	Hertz
KW	Kilowatt
KWH	Kilowatt hora
MWH	Megawatt hora
m	Metro
PWM	Modulación por ancho de fase
p	Número de polos magnéticos establecidos en el Bobinado del estator
P	Potencia eléctrica
RPM	Revoluciones por minuto

t	Tiempo
CT	Transformador de corriente
n	Velocidad de giro del campo magnético en RPM
V	Voltios/voltaje
W	Weber (dimensional flujo magnético)

GLOSARIO

Amperímetro	Instrumento para medir la intensidad de una corriente eléctrica.
Bobina	Componente eléctrico formador por un hilo conductor aislado y enrollado repetidamente en forma variable.
Campo magnético	Magnitud vectorial que representa la intensidad de un fuerza magnética.
Corriente eléctrica	Flujo de carga eléctrica por unidad de tiempo que recorre un material.
Desarrollo sostenible	Satisfacer las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras, para satisfacer sus propias necesidades.
Diferencia de potencial	Fuerza electromotriz ejercida sobre cargas eléctricas (tensión o voltaje).
Diodos	Componente electrónico que permite la circulación de corriente, a través de el en un solo sentido.
Eficiencia de motor	Es la relación entre la potencia mecánica de salida y la potencia eléctrica de entrada.

Factor de potencia	Relación entre la potencia real de trabajo y la potencia total consumida por una carga.
Freno regenerativo	Sistema que permite reducir la velocidad de un motor transformando parte de su energía cinética en energía eléctrica.
Motor de inducción	Motor de corriente alterna en la que la corriente eléctrica del rotor necesaria para producir torque es inducida por inducción electromagnética del campo magnético en la bobina del estator.
Motor eléctrico	Dispositivo que convierte la energía eléctrica en energía mecánica, por medio de acción de campos magnéticos generados en sus bobinas.
Periodo de amortización	Tiempo en el cual se recupera la inversión de un proyecto.
Torque	Fuerza que producen los cuerpos en rotación, mide la capacidad del motor para producir un trabajo.
Variador de velocidad	Equipos que permiten variar la velocidad de un motor de inducción, mediante el ajuste de la frecuencia de alimentación.
Voltímetro	Instrumento para medir el voltaje o diferencial de potencial en dos puntos de un circuito.

RESUMEN

La fabricación de azúcar consta de una serie de procesos en los cuales existe una diversidad de equipos que consumen energía eléctrica. El área de tratamiento de jugo de la fábrica, representa un consumo significativo de energía debido en mayor parte a los motores eléctricos instalados. A pesar de ser un gran consumo de energía, se desconoce cuál es el consumo real de estos motores, esto representa para la empresa pérdidas potenciales e ineficiencia de los procesos.

El alto consumo por motores se debe básicamente a que los mismos trabajan al 100 % de su capacidad, al tipo de arranque que utilizan y también a que algunos han sido reparados y su rendimiento ha disminuido. Por lo tanto, implementar variadores de velocidad mejora el consumo de energía de los motores, porque utilizan únicamente la energía necesaria según lo demanden los procesos.

Para determinar el consumo que representan los motores instalados se realizó una serie de pruebas en motores con y sin variador. Los resultados se compararon y se obtuvo un ahorro de un 43 % de energía al utilizar motores con variador. Esto representa para la empresa un ahorro USD 21,168.00 durante un período de zafra. Tanto la inversión como el gasto que representa utilizar variadores de velocidad, depende de la capacidad de los motores, así como también de la instalación. Los datos demuestran que esta tecnología es una buena estrategia para disminuir el consumo de energía del área, el costo de mantenimiento al no utilizar válvula de control, aumenta la eficiencia de la fábrica y disminuye la contaminación ambiental.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La producción de azúcar en Ingenio La Unión, implica una serie de procesos, los cuales deben de operar de manera automática y en óptimas condiciones, para producir un producto de buena calidad, minimizando tiempo y optimizando materias primas. Esto implica ser eficientes en el uso de fuentes de energía eléctrica y de vapor, de modo que el rendimiento se maximice.

En estos distintos procesos de producción, existe una diversidad de equipos que consumen energía eléctrica. Tal es el caso de los motores eléctricos que están instalados en el área de tratamiento de jugo y que representan un consumo significativo de energía. Sin embargo, se desconoce cuál es el consumo real de estos motores, por lo que determinar el gasto que representa para la empresa no es posible.

Este alto consumo energético que no se tiene registrado, se debe a que existen varios motores que han sido reparados, lo cual hace que su eficiencia disminuya. Otra razón es que se les exige trabajar al 100 %, cuando en realidad no es necesario. Este funcionamiento se traduce en un gasto económico para la empresa, el cual se desconoce debido a la falta de un estudio respecto a implementar alternativas para minimizar los consumos energéticos. Lo anterior hace plantear la siguiente pregunta principal:

¿Cuáles serían los consumos eléctricos si se implementaran variadores de frecuencia en los motores eléctricos del área de tratamiento de jugo del ingenio?

Para complementar esta pregunta es necesario responder las siguientes preguntas auxiliares:

1. ¿Cuánto es el consumo energético que representan los motores instalados en el área de tratamiento de jugo?
2. ¿Cuál es la viabilidad técnica para implementación de variadores de frecuencia a los motores existentes en el área de tratamiento de jugo?
3. ¿Cuál sería el ahorro que representa para empresa la implementación de variadores de frecuencia y su período de amortización?

OBJETIVOS

General

Reducir el consumo energético en los motores eléctricos del área de tratamiento de jugo del ingenio, si se utilizarán variadores de frecuencia como controladores de los mismos.

Específicos

1. Determinar el consumo de energía que representan los motores instalados en el área de tratamiento de jugo de caña de azúcar de Ingenio La Unión.
2. Evaluar la viabilidad técnica de implementar variadores de velocidad a los motores existentes en el área de tratamiento de jugo.
3. Determinar el ahorro que representa para la empresa la utilización de variadores de velocidad y su período de amortización.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

La presente investigación es de tipo cuantitativo descriptivo y se desarrolló en un ingenio azucarero, específicamente en el área de tratamiento de jugo. El enfoque en este proceso se debe a que el mismo cuenta con varios motores eléctricos, funcionando en aplicación de bombeo dentro de un lazo de control. A diferencia del resto de áreas donde son pocos los motores que necesitan regular alguna variable. Además algunos equipos instalados en esta área han sufrido reparaciones, lo que puede representar un bajo rendimiento.

Para el desarrollo se tomaron mediciones de las variables importantes y luego se compararon. De esta manera se estableció la factibilidad de implementación de variadores de frecuencia, así como también las pérdidas y ganancias que esto implica, con el fin de reducir el consumo energético de la empresa.

Primeramente, se revisó la literatura como base para un mejor entendimiento y ampliación del tema de ahorro energético utilizando variadores de frecuencia. También se revisó la base de datos de los motores eléctricos declarados por el taller de electricidad y se listaron los parámetros y características de los mismos.

De igual forma se revisaron los registros del consumo de energía eléctrica y de la producción de energía durante la zafra en la cual se llevó a cabo la toma de datos. Esto con el fin de tener una base de comparación con los resultados obtenidos.

Utilizando la base de datos obtenida, se determinó el consumo energético de cada motor sin variador (datos de placa). Posterior, se seleccionaron los equipos con variador y sin variador más convenientes para realizar las mediciones. Esto se basó en la capacidad del motor y tiempo de funcionamiento.

Después de identificar los equipos para las pruebas, se realizaron las mediciones de las siguientes variables: voltaje, corriente y consumo de energía. Las dos primeras fueron monitoreadas con amperímetros y voltímetros marca Fluke. El consumo de energía del área de clarificación se determinó por medio de ION 6200 CT's 1000/5 AMP.

Con los resultados obtenidos, se calculó la energía consumida por cada motor. También se determinó la relación existente entre el consumo de motores sin variador y con variador. Este dato se utilizó para estimar el consumo que tendría el área si todos los motores utilizarán variadores de velocidad. Con los totales obtenidos, se determinó el consumo que representan los motores (con y sin variador) con respecto a la energía consumida por la fábrica.

Por último, se determinó la viabilidad técnica de los motores instalados, considerando la implementación de filtros para evitar picos de voltajes, ventilación forzada y cable especial para minimizar los efectos de onda reflejada e inducción de corrientes en la alimentación al motor.

Además, se obtuvo el valor económico que representa utilizar variador de frecuencia en los motores de prueba durante el tiempo que dura la zafra. Con este dato e información de los proveedores, se calculó el período de amortización de dicha inversión. Además, se determinó cuál sería el ahorro si se implementarán variadores de frecuencia en el resto de los motores del área.

INTRODUCCIÓN

La optimización del consumo de energía hoy en día resulta ser uno de los objetivos principales de muchas de las industrias como las azucareras. A pesar de que parte de la energía que consumen, la generan a través de biomasa, existen procesos donde el consumo excede la necesidad del mismo.

En particular, los motores eléctricos son unos de los equipos que más consumen energía, la forma eficiente de trabajar depende del control que se utilice así como también del historial del mismo. El consumo de energía que estos equipos representan, el cual se desconoce, genera un impacto, tanto en la producción de energía como en la baja eficiencia del proceso.

Los variadores de velocidad son equipos eléctrico-electrónicos que permiten controlar la velocidad de un motor haciendo variar su frecuencia de alimentación. Dichos equipos se presentan como una solución para la optimización de procesos, desarrollo de control en sistemas de bombeo y además reducen en gran parte el consumo de energía al utilizar únicamente la necesaria, según lo exija la aplicación.

El estudio consiste en un levantamiento de datos de los motores instalados en el área determinada. Posterior se realizan pruebas en motores que utilizan variador y en motores que no, donde se determina cuál es el consumo de energía que representa. Se analizan los datos obtenidos y se determina el ahorro e inversión que representan la utilización de variadores.

La investigación menciona los principios básicos de funcionamiento de motores de inducción y variadores de frecuencia. Donde propone a estos últimos como la solución respecto al ahorro energético y mejora en el control de proceso, aspectos que son fundamentales en las industrias azucareras que cogenerated energía.

En el capítulo 1, se presenta el marco teórico relacionado a temas de eficiencia y ahorro energético, motores de inducción y variadores de frecuencia. En el capítulo 2, se desarrollan las pruebas establecidas y se obtiene los datos necesarios que demuestran el ahorro de energía que representa utilizar variadores de velocidad.

En el capítulo 3 se expone el resultado del análisis de datos, se determina el consumo real y el consumo si se utilizarán en totalidad variadores de velocidad. También se determina el ahorro e inversión que el proyecto representa. Por último, en el capítulo 4 se discuten los resultados obtenidos indicando las consideraciones necesarias a tomar, así como también los beneficios que implica utilizar variadores de velocidad.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Eficiencia energética

La eficiencia energética es el hecho de minimizar la cantidad de energía necesaria para satisfacer una demanda sin afectar la calidad del producto o servicio que se desee. Supone el cambio de equipos por otros que, con las mismas funciones consuma menos electricidad. A diferencia del ahorro energético que se refiere al cambio de hábitos en el consumo de la energía (Instituto Tecnológico de Canarias, S.A., 2008).

La eficiencia energética junto con el ahorro energético, son la forma más sencilla y eficaz para reducir las emisiones contaminantes de CO₂ y de otros gases de efecto invernadero, lo que los convierte en elementos de estrategia en el desarrollo sostenible (Instituto Tecnológico de Canarias, S.A., 2008).

Existen varias medidas que se pueden tomar para ahorrar energía, una de las formas de buscar la eficiencia energética es utilizando o desarrollando el uso de energía renovables. Esta tipo de energías pintan un panorama de no contaminación autodenominándose energía verdes. Dado todo lo contrario con la energía generada de fuentes no renovables como le es el petróleo y gas natural, entre otros.

El objetivo de todo este tema es reducir la contaminación al ambiente con la reducción del consumo de energía de cualquier tipo de fuente. A continuación, se listan y describen los tipos de energía que existen y en cuales se subdividen.

1.1.1. Fuentes de energía

Existen dos tipos de fuentes de energía, las cuales son:

- Fuentes de energía renovables
- Fuentes de energía no renovables

1.1.1.1. Fuentes renovables

Tipo de energía que se producen de forma continuo y son inagotables a escala humana (Instituto Tecnológico de Canarias, S.A., 2008).

Entre las importantes tenemos:

- Energía hidráulica
- Energía eólica
- Energía solar
- Energía geotérmica
- Energía marítima
- Energía biomasa

1.1.1.2. Fuentes no renovables

Tipos de energía con mayor uso en la actualidad y que causan un gran impacto medioambiental; entre las principales tenemos:

- Carbón
- Petróleo
- Gas natural

- Uranio

Actualmente, el ingenio utiliza energía proveniente del sistema eléctrico nacional. Esta energía depende de varias formas de generación entre las que están: hidroeléctricas, carbón, eólicas, entre otros. Por otro lado, se consume la energía que proporciona la utilización de biomasa (bagazo de caña de azúcar), que se combustiona en las calderas del ingenio. Esta energía se utiliza para sostenimiento del proceso y también para la venta al sistema eléctrico nacional.

1.1.2. Consumo de energía eléctrica

Guatemala es un país que cuenta con una gran cantidad de recursos naturales de tipo renovable, los cuales tienen un gran potencial energético. Siendo la fuente energética de mayor demanda en el país, la leña; se estima que para el año 2012 su consumo alcanzó un 57 % del total del consumo energético en el país (Instituto Nacional de Bosques, 2015).

En Guatemala se utiliza la biomasa en diversas formas, tal es el caso mismo de la leña, cogeneración con bagazo de caña, biodigestión, entre otras. El balance energético nacional muestra que para el año 2016 en el consumo nacional de energía, la leña constituye el 55.53 del consumo final de energía. Le sigue los derivados del petróleo con 35.62 % y la electricidad con el 8.85 % (Ministerio de Energía y Minas, 2016).

Guatemala depende de varios tipos de generación de energía eléctrica, donde la fuente hídrica es una de las que más aporta con un 46.40 %. Y es el sector industrial una de las áreas que más consumen energía como lo muestra el cuadro siguiente, para el año 2011 (Ministerio de Energía y Minas, 2012):

Tabla I. **Consumo de energía eléctrica en GWH**

Actividad	Año					
	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Industrial	2,678.2	2,921.8	2,806.3	3,010.9	3,054.0	3,121.6
Residencial	2,271.1	2,332.5	2,407.1	2,435.9	2,470.5	2,525.2
Comercio y servicios	1,253.6	1,924.8	1,964.0	1,993.7	2,023.8	2,068.6
Consumo propio	40.7	257.5	252.9	321.3	381.1	344.0
Pérdidas	945.8	1,195.9	1,215.8	1,227.3	1,186.9	1,258.8
Total	7,189.4	8,632.5	8,646.1	8,989.1	9,116.3	9,318.2

Fuente: estadísticas energéticas subsector eléctrico 2011, (2012).

1.1.3. Impacto medio ambiental

El problema energético y medioambiental que existe a nivel mundial, que se manifiesta a través de un horizonte cercano para los combustibles no renovables y el calentamiento del planeta a través del efecto invernadero, ha llevado a las diferentes administraciones a implementar políticas energéticas dirigidas a fomentar el uso racional de la energía y la eficiencia energética (Agencia Andaluza de la Energía, 2011).

Así, la estrategia global y local en el ámbito energético a desarrollar en cualquier país o región, debe primar la eficiencia energética, por su efecto favorable sobre el medio ambiente y su incidencia en la macroeconomía del país y en la economía de los usuarios (Agencia Andaluza de la Energía, 2011).

Varias industrias en diferentes países han iniciado con la meta incrementar la eficiencia energética en sus procesos. Esto implica una inversión

que representa ahorros para la misma, así como beneficios para el medio ambiente al consumir menos energía.

Reducir el consumo de energía, resulta ser tan importante como saber qué clase de energía se está utilizando. Debido a esto varias empresas buscan una alternativa de fuente de energía para reducir la contaminación de la atmosfera con energía no renovable. Ingenio La Unión es una empresa que genera energía, tanto para consumo propio como para la venta de energía.

La generación de energía es a través de biomasa, la cual se obtiene de los residuos de la caña de azúcar y se denomina bagazo. Este tipo de energía alternativa, permite disminuir en gran manera el consumo de energía que provee el sistema eléctrico nacional. El período de bajo consumo es de seis meses, que es el tiempo que dura la zafra o período de producción de azúcar en el país.

1.2. Proceso de producción de azúcar

Para obtener azúcar es necesario llevar a cabo una serie de procesos sobre la caña. A continuación se describen cada uno de los pasos más importantes dentro del proceso:

1.2.1. Patio de caña

Llega la caña del campo hacia el ingenio, a través de camiones que utilizan remolques (jaulas), las cuales son pesadas para determinar la cantidad de caña que se ingresa en cada camión. Posteriormente, los remolques son manipulados para ingresar la caña a la mesas por medio de grúas, que han sido diseñada para la manipulación de las jaulas (Rain, 2012).

1.2.2. Preparación de caña

Antes de la etapa de molienda la caña atraviesa un proceso de preparación, que tiene como finalidad abrir la fibra para facilitar la extracción del azúcar. Este procedimiento se realiza utilizando cuchillas giratorias, que cortan la caña en pedazos y desfibradoras la cual vuelven la caña en tiras (Rain, 2012).

1.2.3. Molienda

Los molinos clásicos combinan tres mazas o rodillos que están dispuestos en forma triangular, es una unidad estándar de molienda. Se utilizan de tres a siete juegos de dichas unidades, llamadas respectivamente molinos. Los rodillos tienen de 0.609 m a 0.914 m de diámetro y de 1.219 m de largo, aunque puede haber más grandes. Cada molino es movido por una unidad motriz que puede ser una máquina de vapor, motor eléctrico, o una turbina de vapor (Rain, 2012).

El jugo obtenido pasa al siguiente proceso, mientras que el bagazo o fibra resultante se envía al área de generación donde se secará y se utilizará como combustible en las calderas.

1.2.4. Clarificación y filtración

Este proceso permite remover las impurezas tanto solubles como insolubles del jugo obtenido de los molinos, empleando cal y agentes clarificantes. El jugo es de color verde oscuro y ácido (pH aproximado de 5,2), por lo que se trata con lechada de cal, para elevar el pH y así minimizar las

posibles pérdidas de sacarosa. La aplicación de cal ayuda también a precipitar las impurezas que vienen en el jugo (Rain, 2012).

Para que este proceso sea efectivo, es necesario elevar la temperatura del jugo encalado utilizando un sistema de tubos calentadores hasta el punto de ebullición o ligeramente arriba. Con esto se coagulan, algunas grasas, ceras y gomas (Rain, 2012).

Para obtener el jugo clarificado, se deja reposar el mismo un mínimo de dos horas y así las impurezas formadas por la alcalinización y calentamiento se decantan. Los lodos decantados se conocen como cachaza y son enviados a una serie de filtros tipo banda en donde se extrae lo último de azúcar que es un aproximado de un 10 %. Este jugo recuperado es enviado nuevamente al proceso para continuar con la obtención del producto deseado (Rain, 2012).

1.2.5. Evaporación

Después de la etapa de clarificación el jugo tiene un aproximado de 75 % de agua. Ésta es eliminada en los evaporadores de múltiple efecto. Este proceso consta de una serie de vasos ordenados, de tal modo que cada vaso subsiguiente tenga un vacío más alto. Esto permite al líquido hervir a menor temperatura; los vapores del vaso anterior hacen hervir el jugo en el siguiente vaso. De esta manera el jugo que ingresó al primer vaso a 15° *Brix*, sale del último ya en forma de jarabe al cual se le llama meladura con 62° *Brix* (Chou & Chen, 1993).

1.2.6. Cristalización

Etapa donde se desarrollan los cristales de azúcar, se utilizan tachos al vacío, para seguir evaporando la meladura hasta el punto de saturarse. Al llegar a la saturación se añaden semillas que sirven de núcleo para formar los cristales, se continua agregando meladura para que éstos crezcan y llenen el tacho, al contenido de un tacho lleno se le da el nombre de templa y al material masa cocida. (Chou & Chen, 1993)

1.2.7. Centrifugación

En esta etapa se elimina el revestimiento de miel que tienen los cristales de la masa cocida, a través de máquinas centrifugas. Se separa la miel de los cristales y se envía nuevamente al proceso para obtener un máximo agotamiento y así recuperar el azúcar contenida en las mismas. (Chou & Chen, 1993)

1.2.8. Secado y almacenamiento

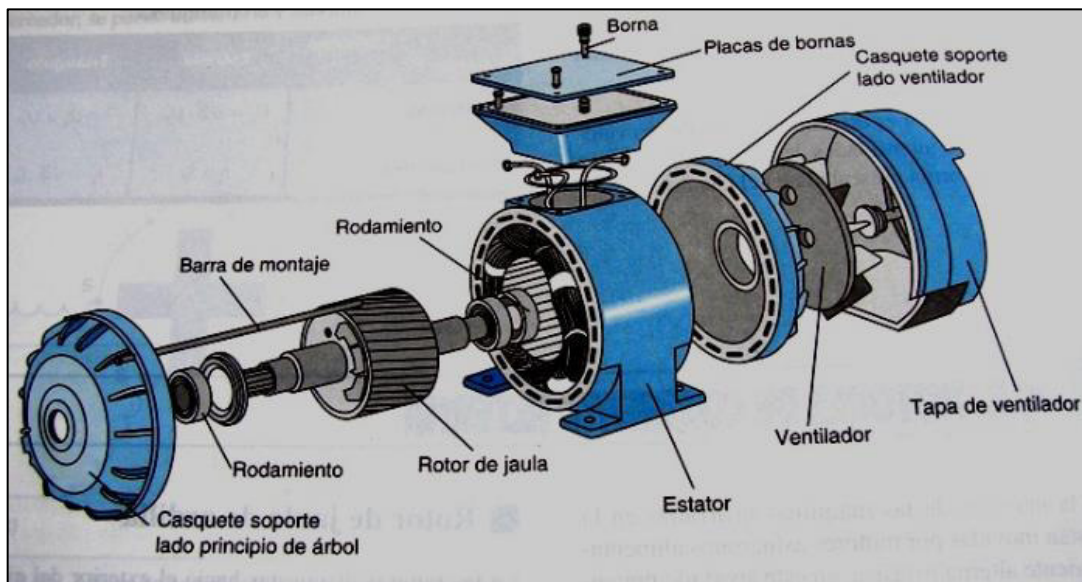
Al salir de las centrifugas el azúcar contiene aproximadamente 1 % de humedad, por lo que es necesario secarla para disminuir la misma y así pueda ser almacenada en sacos (polipropileno, azúcar blanca), a granel (azúcar crudo) o en silos (azúcar refinada). La humedad del azúcar al pasar por la secadora puede bajar hasta 0.1 %. (Chen, 1985)

1.3. Motores de inducción de corriente alterna

Actualmente en la industria los sistemas eléctricos son movidos por medio de motores de inducción. Los más comunes son los de jaula de ardilla.

Un motor de inducción está constituido por una parte fija (estator) formada por tres devanados dispuestos entre si 120° . En la parte interna del centro de los devanados, se encuentra situado el rotor (parte móvil) constituido por un circuito eléctrico cerrado. En todos los motores de inducción cerrados, la ventilación se realiza mediante un ventilador montado en el eje que hace circular el aire por el armazón, enfriando así sus superficies externas. (Harper, 2004).

Figura 1. **Motor de inducción de jaula**



Fuente: motores de corriente alterna, (2011).

El estator: es la parte fija del motor y está constituido por una carcasa en que está fijada una corona de chapas de acero al silicio provistas de unas ranuras. En el cual cada devanado esta alimentado por una fase distinta de un sistema trifásico. Esto genera tres campos magnéticos desfasados entres si 120° ; dichos campos cambian su sentido, debido a la propia señal trifásica, con

una velocidad de cambio directamente proporcional a la frecuencia de la corriente de alimentación (Harper, 2004).

El rotor: es la parte móvil del motor. Está situado en el interior del estator y está constituido por un paquete de láminas de acero apiladas en forma de un cilindro, en el interior del cual se dispone un bobinado eléctrico. En dicho bobinado se induce un campo magnético giratorio debido al estator (Harper, 2004).

Se denominan de inducción, debido a que su funcionamiento se basa en campos magnéticos generados por corrientes eléctricas que circulan por el rotor. Este fenómeno se denomina Ley de Faraday, la cual establece que si una espira es atravesada por un campo magnético variable en el tiempo, se establece entre sus extremos una diferencia de potencial, dado por la siguiente expresión (Harper, 2004).

$$\epsilon = - \frac{d\varphi}{dt} \quad \text{Ecuación 1}$$

ϵ = diferencia de potencial inducida en voltios

φ = flujo de campo magnético

t = tiempo en segundos

El signo menos de la ecuación establece la polaridad del voltaje inducido en la bobina. Lo que significa que este voltaje produciría una corriente que causaría un flujo en sentido contrario al cambio de flujo original.

Como se describió anteriormente: al distribuir espacialmente alrededor del estator de un motor los embobinados de un sistema de tensión trifásico, se

genera un campo magnético giratorio. Donde la velocidad de giro de este campo viene dada por la expresión (Wildi, 2007):

$$n = \frac{120 \times f}{p} \quad \text{Ecuación 2}$$

n = velocidad de giro del campo magnético en r.p.m.

f = frecuencia de la corriente eléctrica de alimentación del motor.

p = número de polos magnéticos establecidos en el embobinado del estator.

En resumen, se puede decir que para variar la velocidad del motor sin tomar en cuenta la fricción por la parte mecánica, se necesita variar la frecuencia de alimentación del motor o bien variar el número de polos del equipo.

1.3.1. Control de velocidad variando el número de polos

Según la fórmula anterior, se puede variar la velocidad de un motor al cambiar el número de polos. Esto se logra teniendo varios embobinados en el estator del motor y de ir conectándolos según sea la necesidad.

Sin embargo, modificar el número de polos del motor es un procedimiento limitado; esto es, el motor adquiere revoluciones concretas y no de manera continua como sería de desear. Además, según las velocidades que se deseen el tamaño del motor podría incrementar significativamente (Wildi, 2007).

1.3.2. Control de velocidad por cambio de frecuencia

Este control se logra, a través de los variadores de frecuencia, que suministran una tensión alterna y al mismo tiempo una frecuencia de alimentación variable, de este modo, se logra un control de velocidad muy efectivo. El objetivo de variar la frecuencia está en conseguir un par constante en todo el rango de velocidad del motor. Este tema se ampliará posteriormente.

1.3.3. Eficiencia de los motores y aplicación

Existen diferentes tipos de motores de inducción de corriente alterna, los cuales pueden variar dependiendo la marca, la aplicación y su eficiencia.

Básicamente, un motor convierte energía eléctrica en energía mecánica. Sin embargo, en el proceso de transformación de energía existen pérdidas, lo que no permite que el 100 % de la energía se transforme, esto representa mayor consumo de energía con menos rendimiento. Con base a lo anterior, se tiene que la eficiencia de un motor es la medida de la capacidad que tiene el mismo, de convertir energía eléctrica en energía mecánica. (Quispe & Mantilla, 2004). La eficiencia se puede expresar de la siguiente manera:

$$Eficiencia = \frac{Potencia\ mecánica\ de\ salida}{Potencia\ eléctrica\ de\ entrada} \quad \text{Ecuación 3}$$

Se entiende por pérdidas a la potencia eléctrica que se transforma y disipa en forma de calor en el proceso de conversión de la energía eléctrica en mecánica (Quispe & Mantilla, 2004). Dichas pérdidas están asociadas al diseño y construcción del motor y pueden ser:

- Pérdidas por conductores: se dividen en la zona del estator y rotor. Y están en función de la corriente que fluye en los devanados y la resistencia de los mismos (Quispe & Mantilla, 2004).
- Pérdidas en el núcleo magnético: estas pueden ser por histéresis al magnetizar o desmagnetizar el núcleo continuamente. O por corriente inducidas en las láminas del núcleo del estator, debido al flujo magnético giratorio (Quispe & Mantilla, 2004).
- Pérdidas por fricción y ventilación: son debido a la fricción en los rodamientos y a las pérdidas por resistencia del aire al giro del ventilador y de otros elementos rotativos en el motor (Quispe & Mantilla, 2004).
- Pérdidas adicionales en carga: son relacionadas con la carga del motor. Entre los elementos que influyen en estas pérdidas están; diseño del devanado, relación entre magnitud del entrehierro, relación entre ranuras del estator y rotor, entre otras (Quispe & Mantilla, 2004).

Las distintas pérdidas mencionadas son independientes unas de las otras. Sin embargo, cuando se procuran mejoras sustanciales en la eficiencia, se encuentra que las mismas están fuertemente entrelazadas. Por lo tanto, el diseño final de un motor es un balance entre las eficiencias pérdidas, con el objetivo de obtener una eficiencia elevada y aun satisfacer otros requerimientos operacionales (Quispe & Mantilla, 2004).

La forma en que se distribuye relativamente estas pérdidas depende del tipo y tamaño del motor, como lo muestra la tabla siguiente:

Tabla II. **Distribución típica de pérdidas en motores**

Potencia (HP)	5	50	100	200
Tipo de pérdidas	% Pérdidas			
Conductores estator	40	38	28	30
Conductores rotor	20	22	18	16
Núcleo magnético	29	20	13	15
Fricción y ventilación	4	8	14	10
Adicionales en carga	7	12	27	29
Eficiencia %	83	90.5	91.5	93

Fuente: motores eléctricos de alta eficiencia, (2004).

Esto indica que si un motor fue reparado su eficiencia disminuye. De modo que los fabricantes de motores deben buscar incrementar la eficiencia disminuyendo las pérdidas, a través de utilizar materiales de alta calidad y un mejor el proceso de fabricación. Generalmente se puede considerar tres tipos de motores respecto a su eficiencia:

- Motores de eficiencia estándar
- Motores de alta eficiencia

Los motores estándar cumplen con los requerimientos mínimos de eficiencia, su fabricación y material son de calidad moderada. Por lo que el consumo de energía no es el óptimo. Sin embargo, los motores de alta eficiencia permiten tener un consumo relativamente bajo de energía, sin sacrificar el rendimiento del mismo. Por esta razón, el costo de estos últimos es elevado, lo que hace que el precio juegue un papel importante al momento de adquirir un motor eléctrico (Quispe & Mantilla, 2004).

Tabla III. **Eficiencia de motores FULL-LOAD**

HP	2 Pole		4 Pole		6 Pole	
	Nominal	Mínima	Nominal	Mínima	Nominal	Mínima
30	91.0	89.5	92.4	91.0	92.4	91.0
50	92.4	91.0	93.0	91.7	93.0	91.7
75	93.0	91.7	94.1	93.0	93.6	92.4
100	93.0	91.7	94.1	93.0	94.1	93.0
150	93.6	92.4	95.0	94.1	94.5	93.6
200	94.5	93.6	95.0	94.1	94.5	93.6
250	94.5	93.6	95.4	94.5	95.4	94.5

Fuente: NEMA MG 1, 12.60, (2009) .

Además, su aplicación los motores pueden ser: a prueba de explosión, motofreno, *inverter duty*, entre otros. Estos últimos están diseñados para trabajar en conjunto con variadores de frecuencia.

Los motores de propósito general están diseñados para trabajar a una velocidad constante de forma eficiente. Sin embargo, es posible que trabajen a velocidad variable utilizando un variador de frecuencia, cuando las exigencias del proceso no sean altas. Como por ejemplo, amplio rango de velocidades, torque constante, distancia entre motor y variador muy grande, entre otros. Los problemas que se pueden presentar son:

- Bajas velocidades: a bajas revoluciones el motor puede presentar sobre calentamiento, ya que se busca mantener el par nominal. Esto obliga a instalar una ventilación forzada o sobredimensionar el motor (Mecánica Moderna, 2011).
- Altas velocidades: a estas revoluciones el rendimiento del motor disminuye a medida que se incrementan. Existe un gasto de potencia

que absorbe el ventilador, pero la potencia propia del motor no aumente de la nominal. A su vez, se suman las pérdidas magnéticas en el entrehierro (Mecánica Moderna, 2011).

- El diseño propio del motor limita las revoluciones de trabajo (Mecánica Moderna, 2011).
- Destrucción de los bobinados: los mismos se degradan, debido a los picos en altas frecuencias a la salida del variador. Ya que los aislamientos no están preparados para dichas transiciones de tensión (Mecánica Moderna, 2011).

Por otro lado, los motores *inverter duty* poseen características especiales que les permiten trabajar en un amplio rango de velocidades sin afectar el rendimiento y vida útil del motor (Mecánica Moderna, 2011). Entre las principales se encuentran:

- Aislamiento extra especial para alta temperatura, para soportar los picos de tensión.
- Mayor cantidad de ciclos de barnizado.
- Alto desempeño mecánico para evitar vibraciones en altas velocidades.
- Materiales de mejor calidad que permitan una buena disipación de calor. O ventilación forzada.
- Proceso de fabricación con menos pérdidas.

Lo anterior le permite operar en un amplio rango de velocidades sin presentar sobrecalentamiento y soportar picos de voltaje. Reduce las vibraciones por velocidad, su estructura soporta alta exigencia de torques y evita fallas prematuras de aislamiento.

1.4. Variadores de frecuencia

Los variadores de frecuencia son sistemas electrónicos utilizados para el control de la velocidad de motores eléctricos de corriente alterna. Estos equipos transforman la tensión de la red, de amplitud y frecuencia constante, en una tensión de amplitud y frecuencia variable. Estos cambios permiten variar la velocidad mecánica de la rotación del motor (WEG, 2016).

1.4.1. Relación volts/Hz

La velocidad de un motor trabajando a plena carga, tiene un voltaje, frecuencia nominal o base. Esto indica que el motor trabaja con un determinado torque, el cual se define por la siguiente ecuación:

$$T = K_1 * \phi_m * I_2 \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\phi_m = K_2 * \frac{V_1}{F_1} \quad \text{Ecuación 5}$$

T : par o torque (N.m)

ϕ_m : flujo magnético (W)

I_2 : corriente del rotor (A), depende de la carga

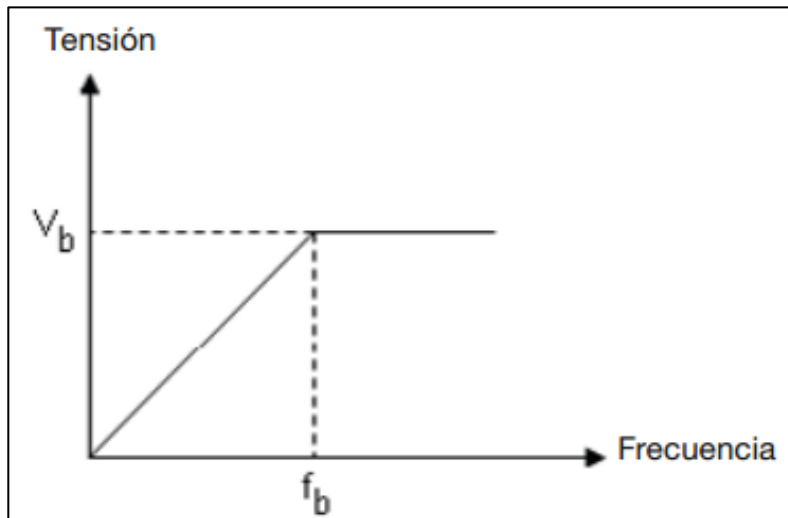
V_1 : tensión del rotor (V)

K_1 y K_2 : constantes, dependen del material y diseño del motor

En la ecuación 4, la corriente resulta constante al tener una carga constante. Por lo tanto, se determina que al variar proporcionalmente la tensión y frecuencia de alimentación, el flujo magnético y por consiguiente el torque se mantiene constante (WEG, 2016).

Basados en lo anterior, se obtiene que la relación V/f presenta el siguiente comportamiento:

Figura 2. **Relación V/Hz**



Fuente: guía técnica - motores de inducción alimentados por convertidores PWM, (2016).

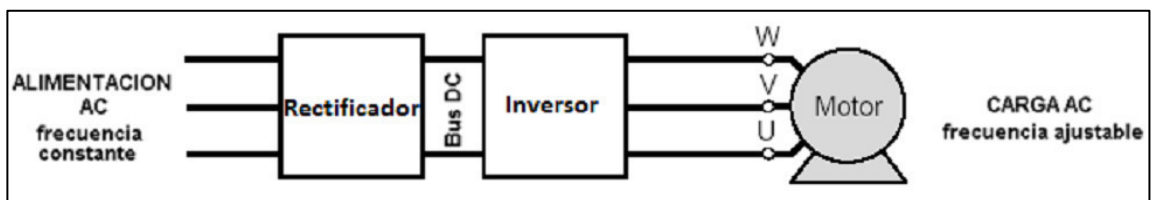
Por arriba de la frecuencia nominal, la tensión de alimentación es la máxima (nominal) y permanece constante. Sin embargo, la frecuencia aplicada puede seguir variando, según lo indica la figura anterior (WEG, 2016).

Al incrementar la frecuencia más allá de la nominal, el motor empieza a trabajar en la región de enflaquecimiento. En dicha región, el flujo magnético disminuye y consecuentemente el torque también. Esto quiere decir que el torque permanece constante hasta la frecuencia nominal y decrece gradualmente al trabajar por encima de la misma (WEG, 2016).

1.4.2. Principios de operación

Los variadores de frecuencia básicamente constan de dos etapas: rectificador e inversor.

Figura 3. Partes de un variador de velocidad

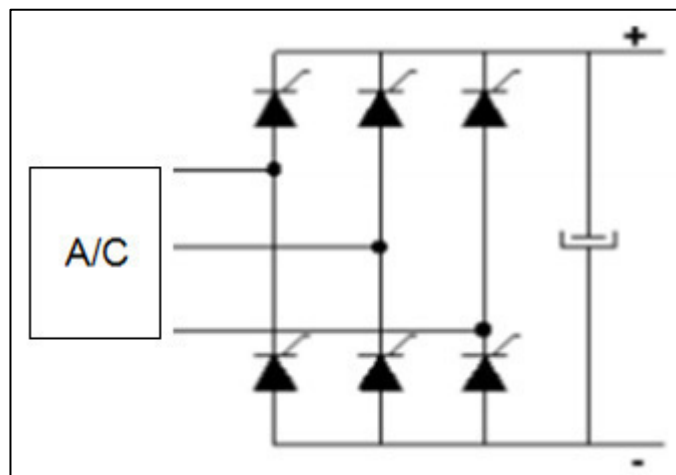


Fuente: elaboración propia.

1.4.2.1. Rectificador

La función del rectificador es convertir la señal de corriente alterna de línea de alimentación en corriente directa, así controlar el voltaje de entrada al inversor (Pulido, 2000).

Figura 4. Rectificador por tiristores

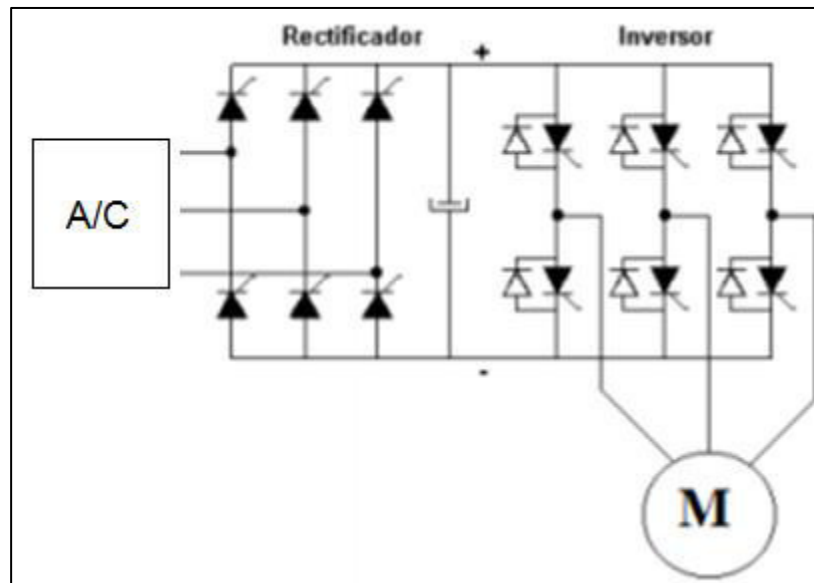


Fuente: elaboración propia.

1.4.2.2. Inversor

El objetivo en esta etapa es convertir la señal de corriente directa que se generó en la parte rectificadora, nuevamente en corriente alterna. Pero con valores de amplitud y frecuencia variables, según la necesidad del control (Pulido, 2000).

Figura 5. Inversor



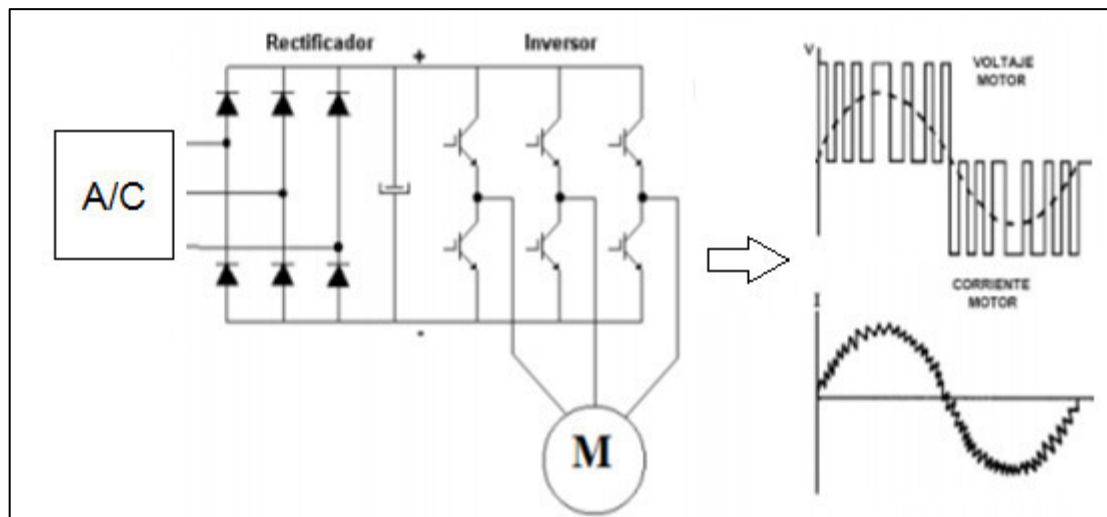
Fuente: elaboración propia.

Para realizar este proceso el variador controla el tiempo de conducción de los componentes de potencia, como lo son los SCR's, GTO's o bien los IGBT's; con el objetivo de generar una onda sinusoidal similar a la de la línea de alimentación.

1.4.2.3. Inversor PWM

Este otro tipo de inversor utiliza la modulación por ancho de pulso, para generar una señal de forma de onda cuadrada, con la que se alimenta al motor. Las características de esta señal, varias, según el control del variador, para cada frecuencia en la señal de salida, existe un número determinado de pulsos y anchos respectivos (WEG, 2016).

Figura 6. Inversor PWM, forma de onda



Fuente: elaboración propia.

Existen también variadores de velocidad con este tipo de inversor, pero que utilizan una señal de retroalimentación del motor con el controlador. Esto significa que hay un monitoreo en tiempo real de la velocidad y posición del rotor del motor, por medio de una señal digital.

Este tipo de variador con retroalimentación en la parte inversora, permite tener un excelente control del torque, velocidad y potencia. Esto genera una rápida respuesta contra cambios de carga. Para lograr este control, el variador explora al motor haciendo un auto-reconocimiento (*autotuning*), en el que le

inyecta corriente y voltaje para determinar su comportamiento, creando un algoritmo o modelo de sus características de funcionamiento, con el fin de controlarlo de la manera más adecuada.

1.4.3. Interacción entre variador de frecuencia, red y motor

Un variador de frecuencia puede tener un impacto en el motor que va más allá del simple cambio de velocidad. De no tener las consideraciones necesarias la vida útil del motor puede verse afectada. A continuación se describen los principales resultados de la interacción de estos equipos.

1.4.3.1. Armónicas

La red eléctrica de alimentación ve al sistema (variador + motor) como una carga no lineal, cuya corriente posee armónicas. De manera general, el rectificador del variador produce armónicas en el orden h , en el lado de la alimentación (WEG, 2016).

$$h = np \pm 1 \quad \text{Ecuación 6}$$

h = armónicas

n = 1, 2, 3...

p = número de pulsos del convertidor

Esto quiere decir que para el caso de un rectificador puente de 6 diodos (6 pulsos) las armónicas principales serán 5ª y 7ª cuyas amplitudes varían desde el 10 % al 40 % de la fundamental. Las armónicas superiores generalmente son de menor amplitud y más fáciles de filtrar (WEG, 2016).

Dichas armónicas de corriente pueden ocasionar un bajo factor de potencia, además de aumentar las pérdidas eléctricas en las instalaciones con sobrecalentamiento de componentes como cables, transformadores, motores, etc.

Para reducir las armónicas y aumentar el factor de potencia es posible instalar una inductancia en la entrada al variador o bien en la entrada a la fase DC del variador. Esta inductancia ya viene incluida en los diferentes tipos de variadores de velocidad que existen, por ejemplo: ACS550, ACS800 y ACS880 de ABB (WEG, 2016).

Cuando se alimenta el motor con un variador de frecuencia, el motor de inducción es sometido a una tensión PWM y por lo mismo está sujeto a tensiones armónicas. Esto depende de la modulación, de la frecuencia de conmutación y de otras particularidades de control.

El motor puede presentar un incremento de temperatura, niveles de vibración, ruido y pérdidas de eficiencia. Para evitar este inconveniente se pueden instalar filtros activos externos, mejorar la modulación PWM, utilizar rectificadores activos de IGBT's para controlar la potencia en la red de distribución y mejorar el FP.

1.4.3.2. Temperatura del motor

Los motores de inducción pueden presentar elevación de la temperatura cuando son alimentados por convertidores de frecuencia, a diferencia de que si se alimentarán por una señal senoidal pura (WEG, 2016).

Además, operar los motores a bajas revoluciones provoca una reducción en la ventilación y consecuentemente pérdidas de enfriamiento en motores autoventilados causando una elevación de temperatura de estabilización térmica. Básicamente para evitar este sobrecalentamiento se puede evitar tener motores sobredimensionados o bien tener un sistema de ventilación independiente (WEG, 2016).

1.4.3.3. Aislante del motor

La evolución de semiconductores de potencia y su utilización en la etapa rectificadora e inversora de un variador de frecuencia, ha elevado las frecuencias de conmutación que pueden provocar un aumento de la emisión electromagnética y la probable incidencia de picos de tensión en las terminales de los motores (WEG, 2016).

Estos picos de tensión o pulsos se denominan *overshoot* y pueden reducir la vida del motor y aumentan la degradación del sistema de aislamiento de las espiras de los devanados. Básicamente, los *overshoot* dependen de (WEG, 2016):

- *Rise time* del pulso: tiempo en que la señal PWM pasa de su valor mínimo al máximo. Esto depende la velocidad de conmutación de los IGBT's. Mientras más pequeño se este tiempo más afecta el aislamiento de las espiras (WEG, 2016).
- Largo del cable: la distancia del cable puede incrementar el valor del *overshoot* en las terminales del motor. ($L \leq 100$ m, no necesita filtros, $100 \text{ m} < L \leq 300$, necesita reactancia de salida y $L > 300$ m, necesita filtros especiales) (WEG, 2016).

- Mínimo tiempo entre pulsos: mientras más pequeño es el tiempo entre pulsos, mayor será el impacto del *overshoot* (WEG, 2016).
- Frecuencia de conmutación: mientras más alta sea la frecuencia de conmutación, mayor será la probabilidad de falla del aislamiento (WEG, 2016).

1.4.4. Eficiencia del sistema variador de velocidad y motor

La eficiencia global del sistema de potencia depende no solamente del motor, sino que también del variador de velocidad. Este último presenta una eficiencia elevada del orden de 96 % o más. Esta puede variar, según la carga y capacidad del mismo.

Los motores eléctricos como se vio anteriormente, también presentan una determinada eficiencia, llegando a 95 % o más cuando esta la misma es alta, operando bajo condiciones nominales.

Para la determinación de la eficiencia de un sistema motor – variador, no existe una norma que especifique el procedimiento de pruebas para dicha evaluación. Esto permite que las pruebas sean realizadas de diferente manera, considerando siempre la influencia que el variador tiene sobre el motor eléctrico (WEG, 2016).

Ya que un motor alimentado por un convertidor de frecuencia PWM, disminuye su eficiencia en relación a un motor alimentado por tensión puramente senoidal. Esto se debe por el aumento de las pérdidas ocasionadas por las armónicas y la elevación de temperatura, causadas por el variador (WEG, 2016).

$$\eta \% = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} = \frac{P_{salida}}{P_{salida} + \sum \text{pérdidas}} \quad \text{Ecuación 7}$$

η = eficiencia del motor

$P_{entrada}$ = potencia eléctrica de entrada

P_{salida} = potencia de mecánica de salida

$P_{pérdidas}$ = pérdidas propias del motor más variador

Además, se deben considerar las características del convertidor y del motor. Ya que en un motor de alta eficiencia, alimentado por convertidores de frecuencia, ve disminuido su rendimiento en menos proporción, si se compara con motores estándar.

La eficiencia global del sistema se debe de basar en las pérdidas totales del motor, del variador y de cualquier equipamiento auxiliar. Sin embargo, a pesar de la consideración del total de pérdidas del sistema, el uso de convertidores de frecuencia aumenta la eficiencia del sistema, cuando se compara con los métodos tradicionales de variación de velocidad (como engranajes y correas) y de ajuste de carga (como válvulas y amortiguadores) (WEG, 2016).

1.4.5. Ventajas y desventajas de utilizar variadores de velocidad

Los variadores de velocidad son equipos eléctrico/electrónicos que permiten cambiar de manera segura y eficiente, la velocidad de un motor eléctrico de corriente alterna (WEG, 2016). Entre sus ventajas se tienen las siguientes:

- Disminución del consumo de energía eléctrica, por efectos de reducción del pico del par de arranque y mejora el factor de potencia.
- Mejor rentabilidad y productividad de los procesos, ya que aumenta la producción al incrementar la velocidad del proceso.
- Protege al motor por contar con sistemas de protección interna y reduce los impactos mecánicos, a través de la asignación de rampas de aceleración y desaceleración en arranque y parada respectivamente.
- Reduce el mantenimiento por no contar con piezas mecánicas que puedan sufrir desgaste.
- Facilita el control de los procesos, ya que los variadores pueden interactuar con funciones de control PID, además de activar señales de alarma en caso de fallas.
- Permite una comunicación con distintos equipos de control como los PLC, sistemas de control distribuido, a través de diferentes interfaces.

Entre sus desventajas podemos mencionar:

- Limitación de la corriente de arranque.
- La instalación, programación y mantenimiento, debe ser realizada por personal calificado.
- Las averías del equipo, requieren del servicio técnico o enviarlas a fábrica. Mientras tanto, es necesario tener otro variador disponible o detener el proceso hasta que se resuelva el inconveniente.
- Generación de armónicos en la red eléctrica

Adicional a los beneficios en el control que implican los variadores de frecuencia, implementar esta tecnología como medida de ahorro energético y generar energía con biomasa, permite a la empresa tener una muy buena base para establecer en un futuro una política energética. Lo que permitirá

administrar de una mejor manera los recursos energéticos con los que cuenta, en función del aumento de rentabilidad, así como también de la reducción de contaminación del medio ambiente. Promoviendo una cultura de ahorro energético en los procesos y sus colaboradores.

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

La fábrica del ingenio se encuentra ubicada al sur del país, en la ciudad de Santa Lucia Cotzumalguapa. En dicha planta, el proceso de fabricación de azúcar se lleva a cabo, a través de varios subprocesos esenciales para la obtención de un producto óptimo. En todos estos subprocesos se utilizan diversidad de equipos eléctricos y electrónicos, los cuales van desde sensores, luces, computadoras hasta motores eléctricos, variadores de velocidad, entre otros.

Estos equipos se encuentran distribuidos en toda la fábrica, según la necesidad del proceso. Sin embargo, uno de los equipos más utilizados para diferentes tareas son los motores eléctricos. Prácticamente, se encuentran instalados en toda la fábrica. Estos equipos varían en tamaño, aplicación y tiempo de uso.

En todas las áreas de la fábrica, los motores trabajan de una forma simple (arranque/paro) o bien de una forma controlada (regulan alguna variable). Esta última aplicación resulta ser muy importante, debido a que indica que el motor está dentro de un lazo de control, el cual puede ser tan crítico como el de mantener el pH del jugo de caña, el cual se controla en el subproceso de tratamiento de jugo.

La mayoría de estas aplicaciones de control están implementadas en dicha área y corresponde al proceso por el cual circula el jugo de caña proveniente de la molienda. En el resto de las áreas también existen estas aplicaciones, aunque en menor cantidad, además de que algunas no resultan

ser tan críticas. Por esta razón, el estudio se centró en los motores ubicados en el área de tratamiento de jugo.

2.1. Distribución de equipos utilizado en clarificación

Los motores eléctricos se encuentran distribuidos dentro del área, según sea la necesidad. Con base a la información consultada al departamento de electricidad del ingenio, se seleccionaron los equipos para la muestra considerando que: los motores estuvieran instalados en sistemas de bombeo, motores dentro o fuera de lazos de control y motores de diversas capacidades.

Los equipos seleccionados están instalados con su respectivo arrancador suave o bien con variador de frecuencia, estos equipos son utilizados para bombeo de jugo, cachaza, dosificación de cal y floculante. A continuación se presenta el listado de equipos eléctricos que se consideró para el estudio.

Tabla IV. Datos de placa del motor

DESCRIPCIÓN MOTORES JUGO ALCALIZADO	POTENCIA		VOLTS	AMP	TIPO DE ARRANQUE
	HP	KW			
ALCALIZADO CRUDO/BLANCO	250	189	460	283	VARIADOR
ALCALIZADO DE CRUDO	250	189	460	283	ARRANCADOR
ALCALIZADO DE BLANCO	250	189	460	291	ARRANCADOR
BOMBA DE SULFITADO BLANCO #3	125	94	460	150	VARIADOR
BOMBA DE SULFITADO BLANCO #2	125	94	460	141	ARRANCADOR
BOMBA DE SULFITADO BLANCO #1	150	113	460	170	VARIADOR
BOMBA 1 CALENT. DE BLANCO	7.5	6	460	9.53	ARRANCADOR
BOMBA 2 CALENT. DE BLANCO	3	2	460	3.9	ARRANCADOR
BOMBA 3 CALENT. DE BLANCO	7.5	6	460	9.2	ARRANCADOR
BOMBA DE CACHAZA 1 CLARIFICADOR 2	5	4	460	6.5	ARRANCADOR
BOMBA DE CACHAZA CACHAZON 1	15	11	460	17.9	ARRANCADOR

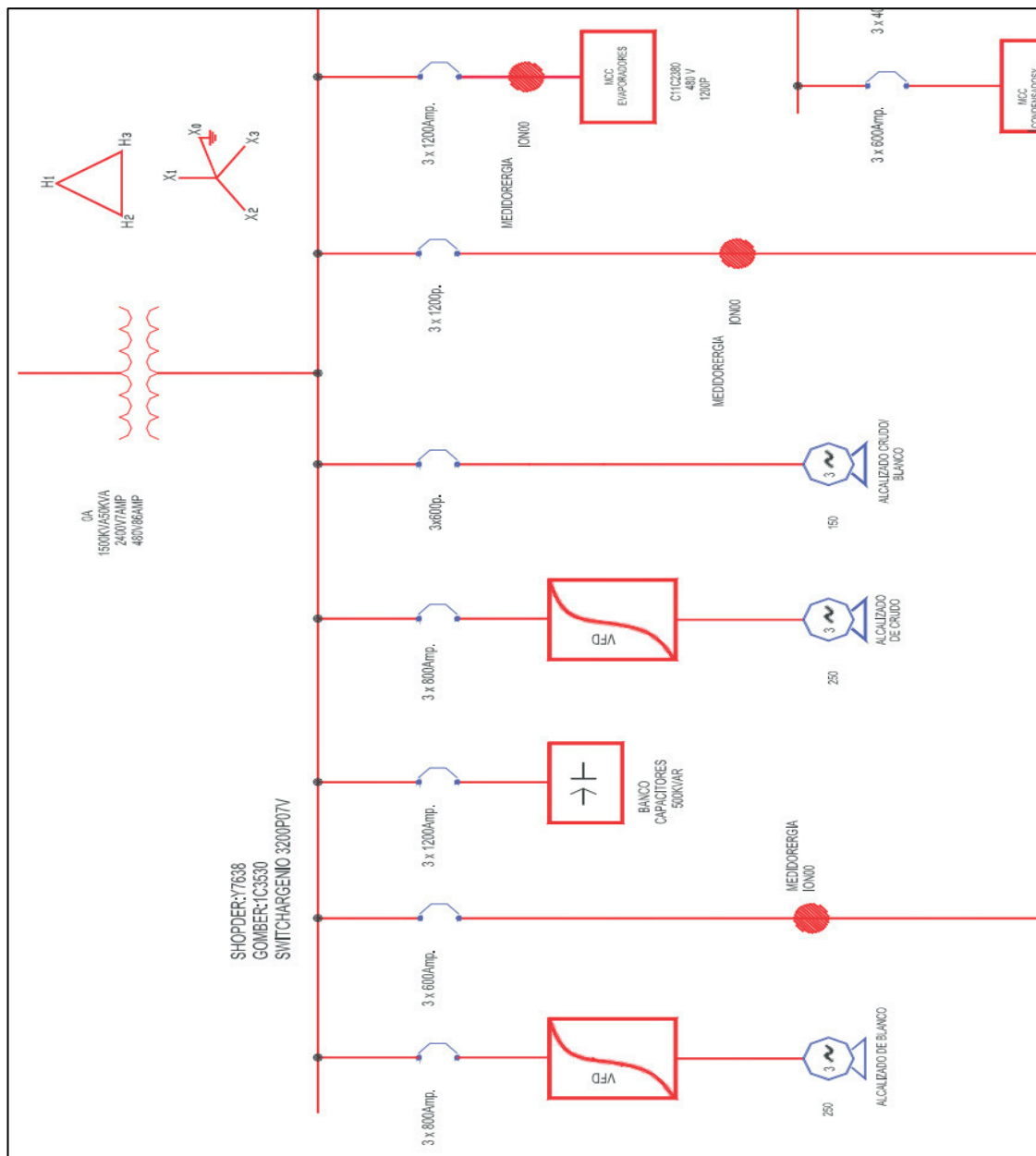
Continuación Tabla IV

BOMBA DE ESPUMA A REFINERÍA	7.5	6	430	10	VARIADOR
BOMBA DE CUARTO EFECTO DE BLANCO	5	4	460	8	ARRANCADOR
BOMBA DE LAVADO TELAS FILTRO B CLARIF	25	19	460	28.5	ARRANCADOR
B. CACHAZA DEL CLARIFICADOR STI	15	11	460	18.1	VARIADOR
B. FLOCULANTE 1 CLARIFICADOR STI	2	2	460	2.95	VARIADOR
B. FLOCULANTE 2 CLARIFICADOR STI	2	2	460	2.95	ARRANCADOR
BOMBA DE CAL 3 DE CRUDO	1.5	1	460	2.7	VARIADOR
BOMBA DE CAL 4 DE CRUDO	5	4	460	8.5	ARRANCADOR
B. DE SACARATO 1 DE BLANCO	7.5	6	460	11.3	VARIADOR
B. DE SACARATO 2 DE BLANCO	5	4	460	8.5	VARIADOR
BOMBA DE CAL HACIA REFINERÍA	7.5	6	230-460	8.4	ARRANCADOR
B. DE CACHAZA CLARIFICADOR 5	15	11	230-460	19	ARRANCADOR
B. DE FLOC. 1 CLARIFICADOR 5	2	2	230-460	2.95	ARRANCADOR
B. HIDRA. TANQUE CACHAZA	30	23	230-460	36.9	ARRANCADOR
BOMBA DE CACHAZA FILTROS PRENSA	15	11	460	18.1	ARRANCADOR
BOMBA DE JUGO FILTRADO #3	20	15	460	24	ARRANCADOR
BOMBA DE JUGO FILTRADO #4	20	15	460	24	VARIADOR
BOMBA DE JUGO PRENSADO	10	8	460	13.9	ARRANCADOR
BOMBA DE JUGO FILTRADO 1	20	15	460	24	ARRANCADOR
BOMBA DE JUGO FILTRADO 2	20	15	460	24	VARIADOR
BOMBA DE FLOCULANTE 1 FILTROS PRENSA	2	2	460	3.2	VARIADOR
BOMBA DE FLOCULANTE 2 FILTROS PRENSA	3	2	460	4.6	ARRANCADOR
B. CACHAZA CLARIFICADOR RAPIDO	15	11	460	18.2	ARRANCADOR
BOMBA 1 DE FLOCULANTE CLARIFICADOR RAPIDO	2	2	460	2.95	VARIADOR
BOMBA 2 DE FLOCULANTE CLARIFICADOR RAPIDO	2	2	460	2.95	ARRANCADOR
BOMBA DE SACARATO CLARIFICADOR MELADURA DE CRUDO	2	2	460	3.2	ARRANCADOR
BOMBA DE SACARATO CLARIFICADOR MELADURA DE BLANCO	1	1	460	1.8	VARIADOR
BOMBA DE FLOCULANTE CLARIFICADOR MELADURA CRUDO	2	2	460	2.95	ARRANCADOR
BOMBA DE FLOCULANTE CLARIFICADOR MELADURA BLANCO	2	2	460	2.95	VARIADOR

Fuente: elaboración propia.

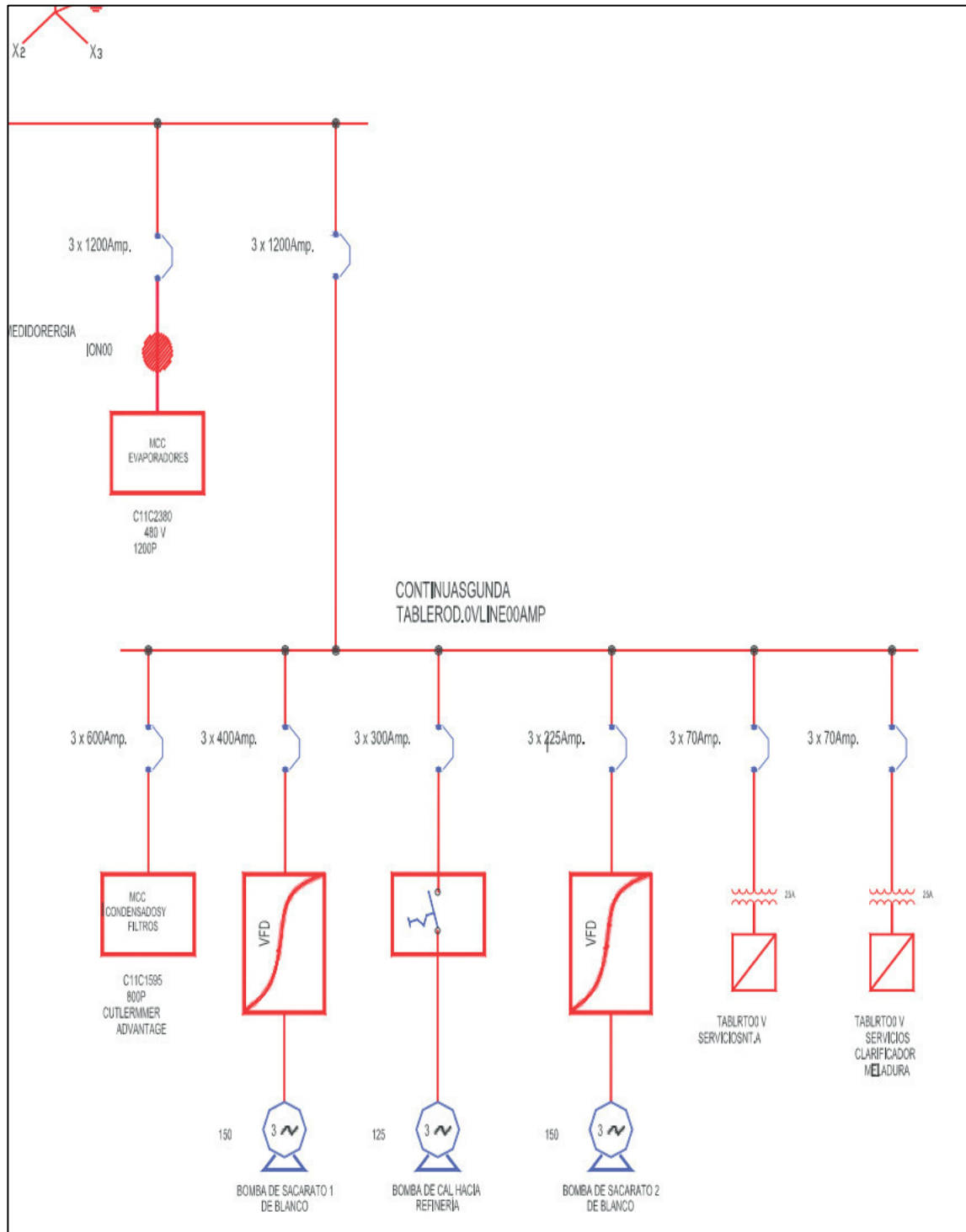
Se agrega también un diagrama unifilar donde se distribuyen parte de los motores listados. Las imágenes a continuación están nombradas con letras, siguiendo un orden para visualizar el plano.

Figura 7. Diagrama unifilar A



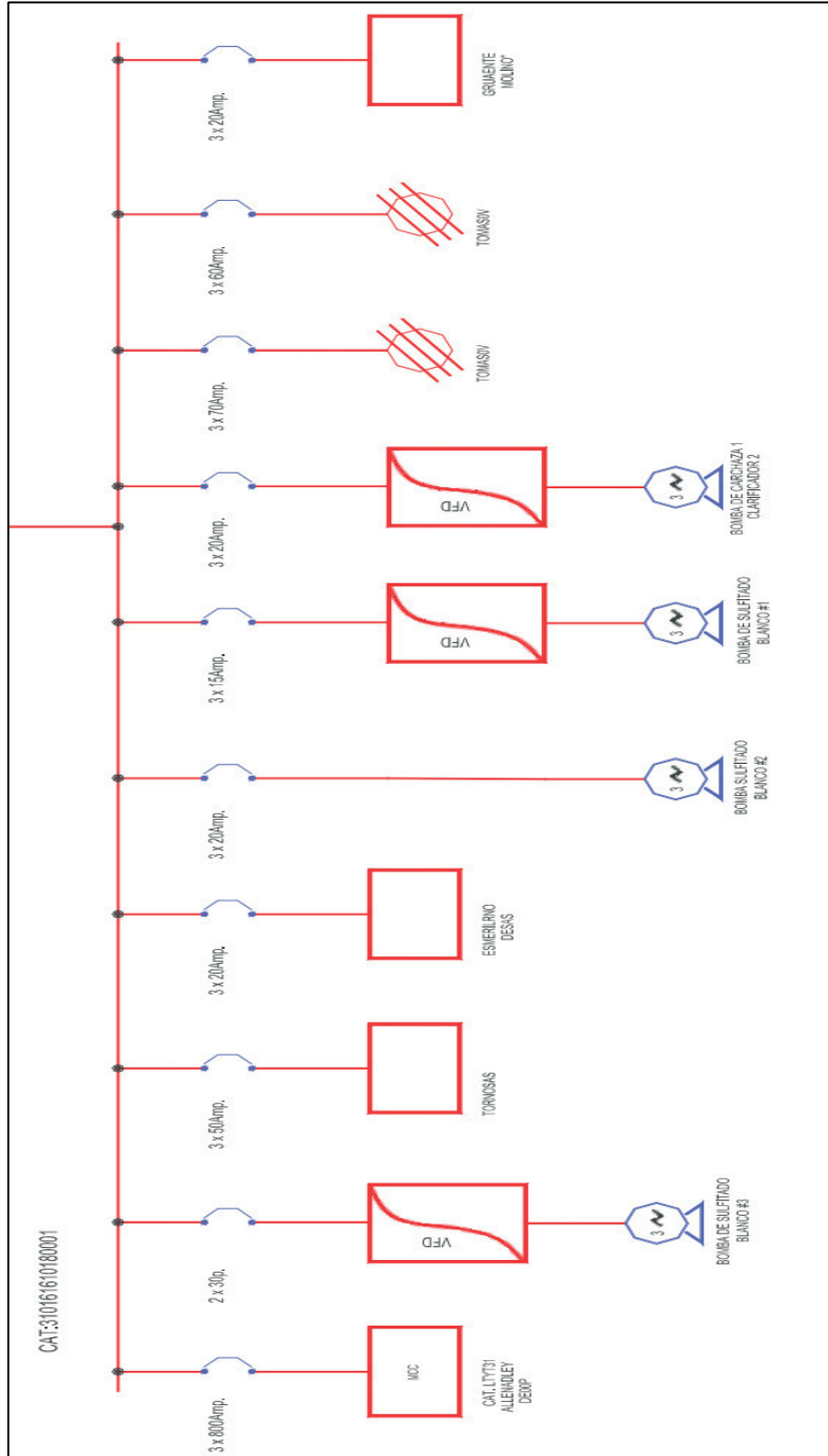
Fuente: taller de electricidad.

Figura 8. Diagrama unifilar B



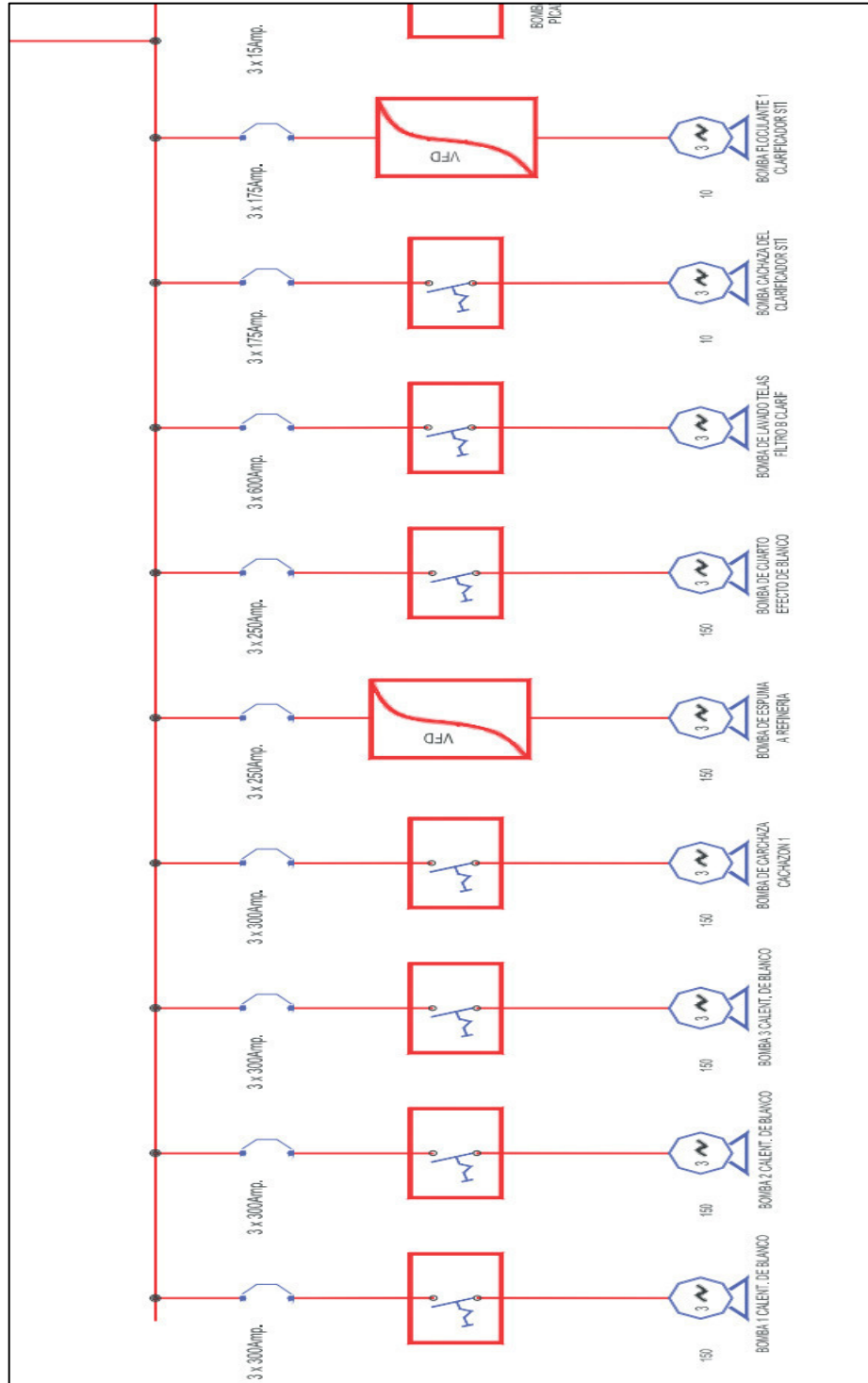
Fuente: taller de electricidad.

Figura 9. Diagrama unifilar C



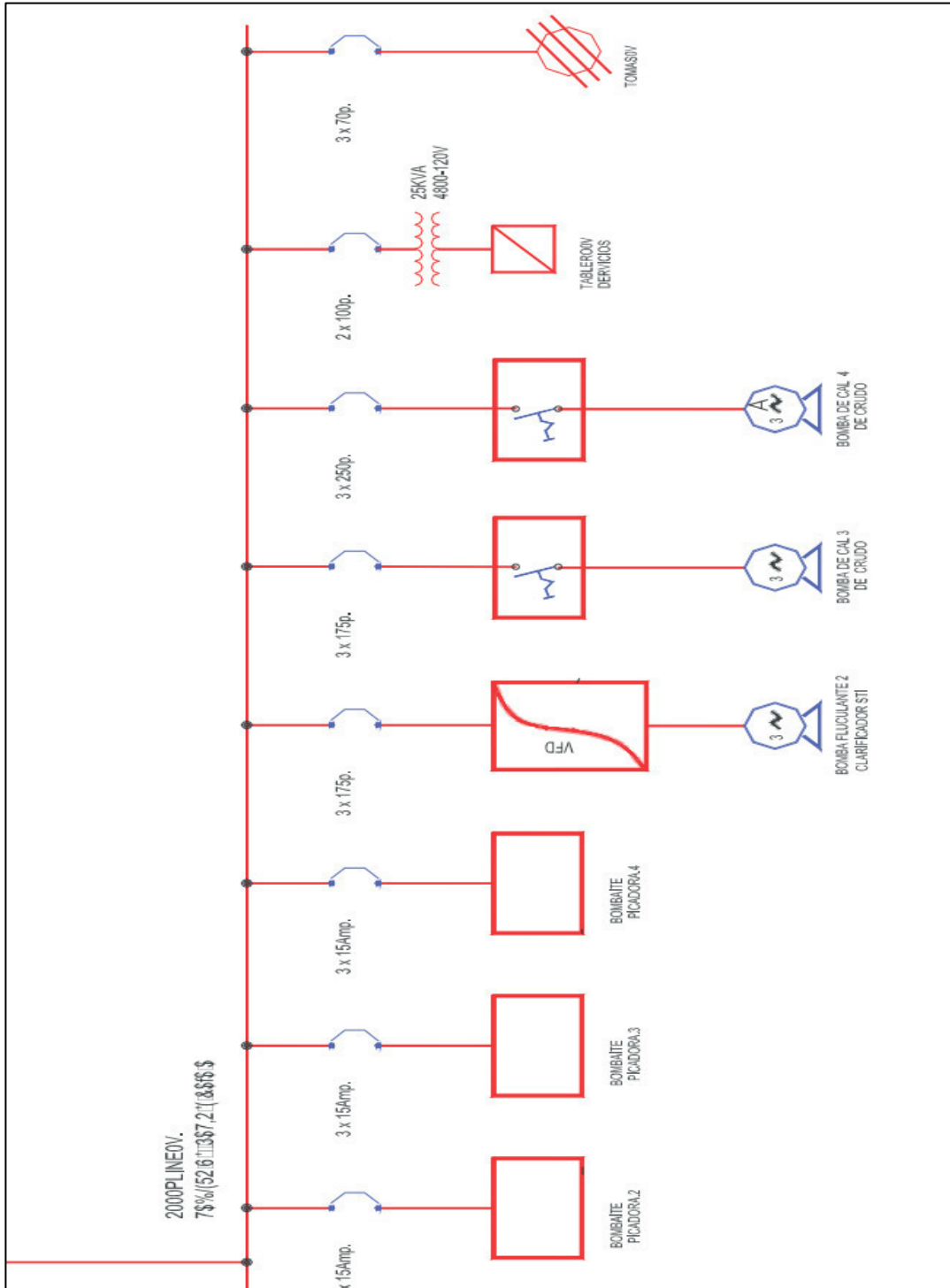
Fuente: taller de electricidad.

Figura 10. Diagrama unifilar D



Fuente: taller de electricidad.

Figura 11. Diagrama unifilar E



Fuente: taller de electricidad.

2.2. Generación y consumo de energía

El ingenio genera su propia energía durante el período de zafra, utiliza el bagazo de la caña de azúcar como biocombustible para las calderas. Parte de la energía generada es consumida por el propio ingenio y parte es vendida al sistema eléctrico nacional.

Los datos de generación se consultaron en los registros del departamento de cogeneración. En la siguiente tabla se presentan los datos de generación correspondientes a mes de zafra y el consumo que representa la fábrica.

Tabla V. **Generación, venta y consumo de energía**

FECHA	PRODUCCION KWH	VENTA TOTAL KWH	CONSUMO KWH
25/03/2017	54822	38638	16184
26/03/2017	39713	23553	16160
27/03/2017	54612	38557	16055
28/03/2017	55572	39426	16146
29/03/2017	53703	37565	16138
30/03/2017	57850	41663	16187
31/03/2017	53696	37684	16012
01/04/2017	53771	37739	16033
02/04/2017	53876	37758	16118
03/04/2017	53652	37661	15992
04/04/2017	53283	37223	16060
05/04/2017	54477	38408	16069
06/04/2017	51350	35305	16045
07/04/2017	53215	37100	16115
08/04/2017	54641	38612	16029
09/04/2017	52321	36267	16054
10/04/2017	52135	36037	16098
11/04/2017	54208	38153	16055
12/04/2017	52306	36275	16031
13/04/2017	55076	39011	16064

Continuación Tabla V

14/04/2017	54301	38257	16044
15/04/2017	52623	36501	16122
16/04/2017	53261	37245	16015
17/04/2017	51995	35934	16061
18/04/2017	52555	36502	16053
19/04/2017	22465	6387	16078
20/04/2017	53196	37315	15881
21/04/2017	54815	38715	16101
22/04/2017	59447	43428	16019
23/04/2017	53907	38096	15811

Fuente: elaboración propia.

2.3. Datos y selección de equipos para pruebas

Para fin de las pruebas, se determinó que el período de funcionamiento de los equipos fuera de 24 horas diarias durante 175 días, que es lo que dura aproximadamente la zafra. En la siguiente tabla se muestran los consumos de los motores, basados en los datos anteriores (datos de placa).

Tabla VI. Consumo de energía con base a datos de placa

DESCRIPCIÓN MOTORES JUGO ALCALIZADO	HP	VOLTS	AMP	CONSUMO KWH (PLACA)
ALCALIZADO DE BLANCO	250	460	283	189
ALCALIZADO DE CRUDO	250	460	283	189
ALCALIZADO CRUDO/BLANCO	250	460	291	189
BOMBA DE SULFITADO BLANCO #3	125	460	150	94
BOMBA DE SULFITADO BLANCO #2	125	460	141	94
BOMBA DE SULFITADO BLANCO #1	150	460	170	113
BOMBA 1 CALENT. DE BLANCO	7.5	460	9.53	6
BOMBA 2 CALENT. DE BLANCO	3	460	3.9	2
BOMBA 3 CALENT. DE BLANCO	7.5	460	9.2	6

Continuación Tabla VI

BOMBA DE CACHAZA 1 CLARIFICADOR 2	5	460	460	6.5
BOMBA DE CACHAZA CACHAZON 1	15	460	17.9	11
BOMBA DE ESPUMA A REFINERÍA	7.5	460	10	6
BOMBA DE CUARTO EFECTO DE BLANCO	5	460	8	4
BOMBA DE LAVADO TELAS FILTRO B CLARIF	25	460	28.5	19
B. CACHAZA DEL CLARIFICADOR STI	15	460	460	18.1
B. FLOCULANTE 1 CLARIFICADOR STI	2	460	460	2.95
B. FLOCULANTE 2 CLARIFICADOR STI	2	460	460	2.95
BOMBA DE CAL 3 DE CRUDO	1.5	460	2.7	1
BOMBA DE CAL 4 DE CRUDO	5	460	8.5	4
B. DE SACARATO 1 DE BLANCO	7.5	460	11.3	6
B. DE SACARATO 2 DE BLANCO	5	460	8.5	4
BOMBA DE CAL HACIA REFINERÍA	7.5	460	8.4	6
B. DE CACHAZA CLARIFICADOR 5	15	460	230-460	19
B. DE FLOC. 1 CLARIFICADOR 5	2	460	230-460	2.95
B. HIDRA. TANQUE CACHAZA	30	460	36.9	23
BOMBA DE CACHAZA FILTROS PRENSA	15	460	18.1	11
BOMBA DE JUGO FILTRADO #3	20	460	24	15
BOMBA DE JUGO FILTRADO #4	20	460	24	15
BOMBA DE JUGO FILTRADO #4	20	460	24	15
BOMBA DE JUGO PRENSADO	10	460	13.9	8
BOMBA DE JUGO FILTRADO 1	20	460	24	15
BOMBA DE JUGO FILTRADO 2	20	460	24	15
BOMBA DE FLOCULANTE 1 FILTROS PRENSA	2	460	3.2	2
BOMBA DE FLOCULANTE 2 FILTROS PRENSA	3	460	4.6	2
B. CACHAZA CLARIFICADOR RAPIDO	15	460	18.2	11
BOMBA 1 DE FLOCULANTE CLARIFICADOR RAPIDO	2	460	2.95	2
BOMBA 2 DE FLOCULANTE CLARIFICADOR RAPIDO	2	460	2.95	2
BOMBA DE SACARATO CLARIFICADOR D MELADURA DE CRUDO	2	460	3.2	2
BOMBA DE SACARATO CLARIFICADOR D MELADURA DE BLANCO	1	460	1.8	1
BOMBA D FLOCULANTE CLARIFICADOR DE MELADURA D CRUDO	2	460	2.95	2
BOMBA D FLOCULANTE CLARIFICADOR DE MELADURA D BLANCO	2	460	2.95	2

Fuente: elaboración propia.

La tabla anterior se puede ver que los motores de mayor capacidad son los de 250 HP y se encuentran trabajando tanto en lazo de control por válvula, como por variador. Siendo la mayoría de motores instalados de tipo estándar o propósito general. Por lo tanto, no cuentan con las características ideales para ser usados con variador de velocidad.

Basados en el listado que proporcionó el departamento de electricidad, se procedió a la selección de los equipos para pruebas, donde se tomaron en cuenta las consideraciones siguientes:

- Motores de características similares, para que no existiera diferencia significativa en el desempeño de los mismos.
- Motores de alta capacidad, para que el ahorro energético a determinar sea el máximo.
- Motores trabajando dentro de un lazo de control, regulando variables por medio de válvula y variador.

Teniendo estas consideraciones, se seleccionaron los siguientes equipos:

- Bomba alcalizado de crudo
 - 250 HP
 - Volt/ampere 460/283
 - Eficiencia 96.2
 - Factor de potencia 86.0
 - Trabajo continuo
 - Variador ABB ACS800-U2-0320-5

- Bomba alcalizado blanco/crudo
 - 250 HP
 - Volt/ampere 460/291
 - Eficiencia 94.1
 - Factor de potencia 85.5
 - Trabajo continuo
 - Arrancador
 - Control por válvula

Ambos motores no fueron fabricados con las características de los motores de alta eficiencia. Sin embargo, por la capacidad de los mismos, la eficiencia es alta basándose en la Tabla III, antes mencionada.

2.4. Toma de datos

Una vez establecidos los equipos para las pruebas, se procede a la toma de información. Para el desarrollo de esta actividad, se utilizó un amperímetro Fluke para medir corriente eléctrica y un voltímetro de la misma marca para la medición del voltaje.

Tabla VII. **Datos de motor sin variador**

Apertura Válvula %	Voltaje V	Consumo Corriente A	Potencia KW
0	460	164	112
25	460	202	138
50	460	212	145
75	460	214	146
100	460	219	149

Fuente: elaboración propia.

En el sistema de control por válvula, se tomaron las siguientes consideraciones: para un 100 % de apertura de válvula y por debajo del 25 % de apertura, no existe un control del proceso. En estos puntos, la apertura de la válvula no es significativa para regular el lazo de control, por lo que no resulta relevante para la investigación.

Después de considerar los puntos anteriores, se tomó como consumo promedio el valor de 214 A para el motor sin variador, el cual es equivalente a un 75 % de apertura de válvula. Esto debido a que no existe mucha variación de corriente entre las aperturas de 50 al 100 %

La medición de consumo con variador, se tomó estando el motor trabajando a diferentes velocidades, según la necesidad del proceso. De modo que, los datos obtenidos son variables a diferencia del sistema con válvula.

A continuación se presenta una tabla donde se comparan los consumos correspondientes a los dos motores bajo prueba.

Tabla VIII. Comparación de datos

No. DATO	SIN VARIADOR		CON VARIADOR	
	AMP	VOLT	AMP	VOLT
1	214	460	161	460
2	214	460	159	460
3	214	460	101	460
4	214	460	161	460
5	214	460	136	460
6	214	460	144	460
7	214	460	155	460
8	214	460	168	460
9	214	460	141	460
10	214	460	88	460
11	214	460	113	460

Continuación Tabla VIII

12	214	460	127	460
13	214	460	115	460
14	214	460	132	460
15	214	460	128	460
16	214	460	133	460
17	214	460	132	460
18	214	460	49	460
19	214	460	50	460
20	214	460	51	460
21	214	460	61	460
22	214	460	107	460
23	214	460	136	460
24	214	460	108	460
25	214	460	114	460
26	214	460	134	460
27	214	460	147	460
28	214	460	137	460
29	214	460	141	460
30	214	460	129	460
31	214	460	119	460
32	214	460	112	460
33	214	460	145	460
34	214	460	126	460
35	214	460	108	460
36	214	460	127	460
37	214	460	117	460
38	214	460	127	460
39	214	460	111	460
40	214	460	126	460

Fuente: elaboración propia.

La medición de voltaje durante las pruebas no presentó una variación significativa, por lo que se tomaron los 460 Vac como valor constante a lo largo

de las pruebas. Por último, el consumo de energía se obtuvo a partir de la fórmula:

$$P = \sqrt{3} \times I \times V \times FP \quad \text{Ecuación 8}$$

P = potencia en watts

I = corriente eléctrica en amperios

V = voltaje en volts

FP = factor de potencia

El factor de potencia FP se obtuvo de los datos de la placa de cada uno de los motores a prueba.

Tabla IX. **Consumo y ahorro de energía**

CONSUMO DE ENERGÍA KWH		
SIN VARIADOR	CON VARIADOR	% AHORRO
146	110	25
146	108	26
146	69	53
146	110	25
146	92	37
146	98	33
146	105	28
146	115	21
146	96	34
146	60	59
146	77	47
146	86	41
146	79	46
146	90	39
146	87	40
146	91	38
146	90	39

Continuación Tabla IX

146	33	77
146	34	77
146	35	76
146	42	71
146	73	50
146	92	37
146	74	49
146	78	47
146	92	37
146	100	31
146	94	36
146	96	34
146	88	40
146	81	44
146	77	48
146	99	32
146	86	41
146	74	49
146	86	41
146	80	45
146	86	41
146	76	48
146	86	41

Fuente: elaboración propia.

2.5. Herramientas estadísticas

La información obtenida de las pruebas permitió determinar los consumos energéticos de los motores, así como también el rendimiento de uno respecto al otro y de esta manera establecer el costo de la aplicación. Todos los datos se catalogaron en tablas, para un mejor ordenamiento y comprensión de los mismos.

Se determinaron los promedios de consumo de corriente y energía de cada motor de prueba y del total de los motores listados, para tener un dato específico del consumo durante toda la zafra.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{Ecuación 9}$$

\bar{x} = promedio de muestras

x_i = valor de una muestra

n = número de muestras

Además, se calculó la desviación estándar de los valores de consumo del motor con variador, para determinar la variación de consumo de corriente durante la regulación del lazo de control.

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / n} \quad \text{Ecuación 10}$$

σ = desviación estándar

x_i = valor de una muestra

\bar{x} = promedio de muestras

n = número de muestras

Con la información anterior se establecieron los máximos y mínimos de los datos obtenidos durante las pruebas. Así como también, el coeficiente de variación de los datos, permitiendo representar el porcentaje de variabilidad del consumo de energía en función de la regulación del lazo de control.

$$CV = \frac{\sigma}{|\bar{x}|} \times 100 \quad \text{Ecuación 11}$$

CV = coeficiente de variación

\bar{x} = promedio de muestras

σ = desviación estándar

También se utilizaron gráficas de dispersión como apoyo para determinar el comportamiento del consumo de corriente del motor con variador. Se compararon los datos de los motores a prueba, para visualizar de mejor manera la diferencia de consumos que existe entre uno y otro. Además, se implementaron gráficas de barras para representar el consumo de energía de todos los motores listados.

En la sección de resultados, se determina el costo que representa utilizar variadores de velocidad y su período de amortización. Así como también, el ahorro que se obtendría si se utilizan variadores en el resto de los motores.

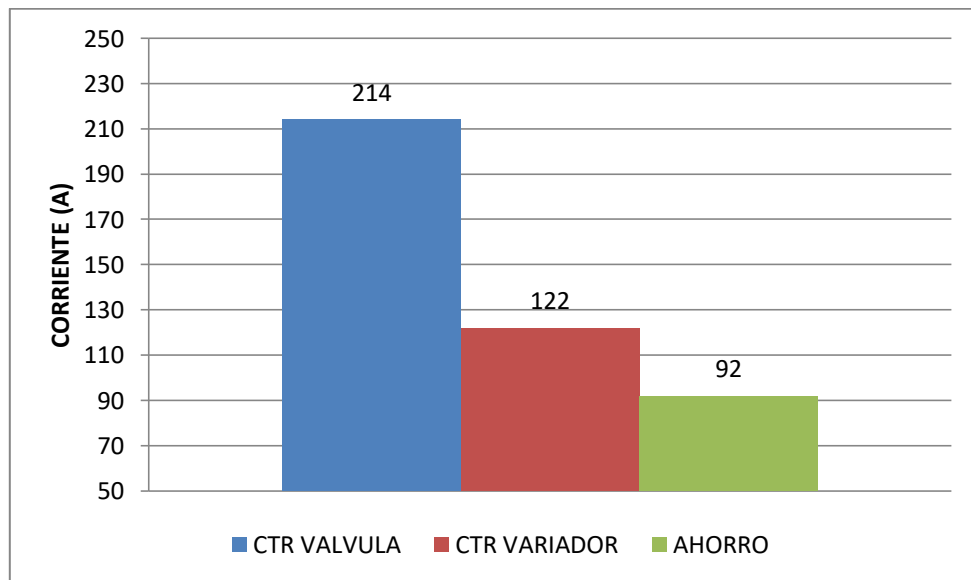
3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

3.1. Reducción del consumo de energía, mediante el variador de velocidad

El consumo de energía que representan los motores eléctricos, es muy significativo comparado con otros equipos. Más cuando trabajan a velocidad constante en un proceso que requiere de regular variables. Se puede mencionar que en los sistemas de bombeo o transporte es donde más se observa este tipo de funcionamiento.

Para las pruebas realizadas, la diferencia de consumo de corriente entre un motor con variador y uno sin variador resulta ser muy marcado.

Figura 12. Consumo promedio de corriente

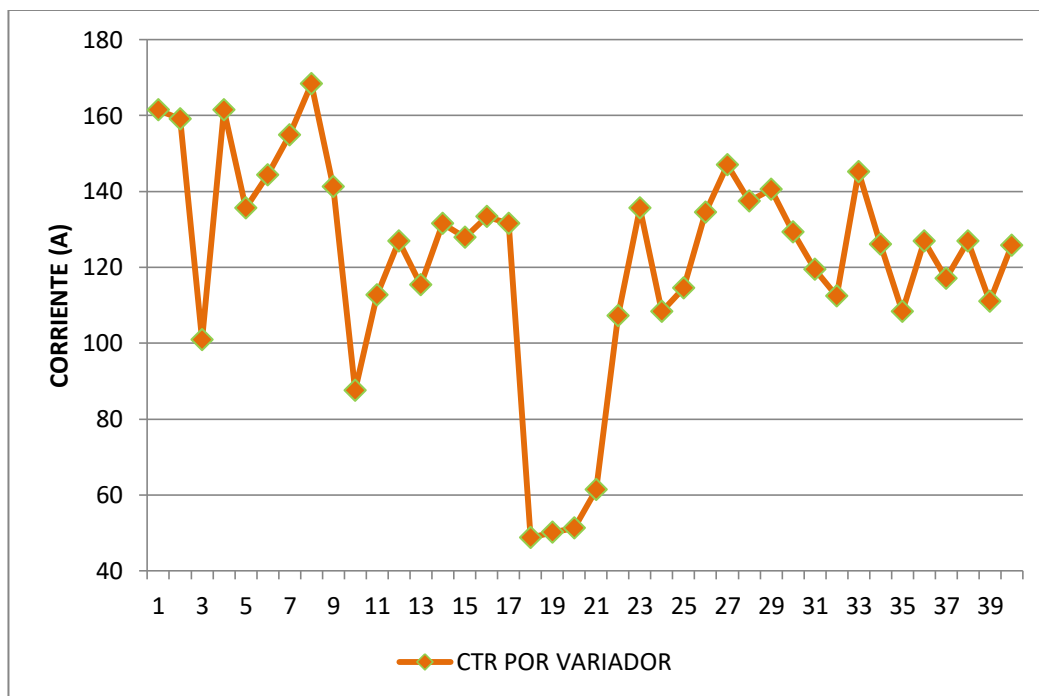


Fuente: elaboración propia.

Los resultados indican una diferencia promedio de 92 A entre los motores a prueba, lo que representa en términos de energía 63 KWH de consumo.

El comportamiento del consumo del motor con variador, no es constante. Esto debido a que representa la regulación de velocidad del equipo, con el fin de controlar la variable del proceso.

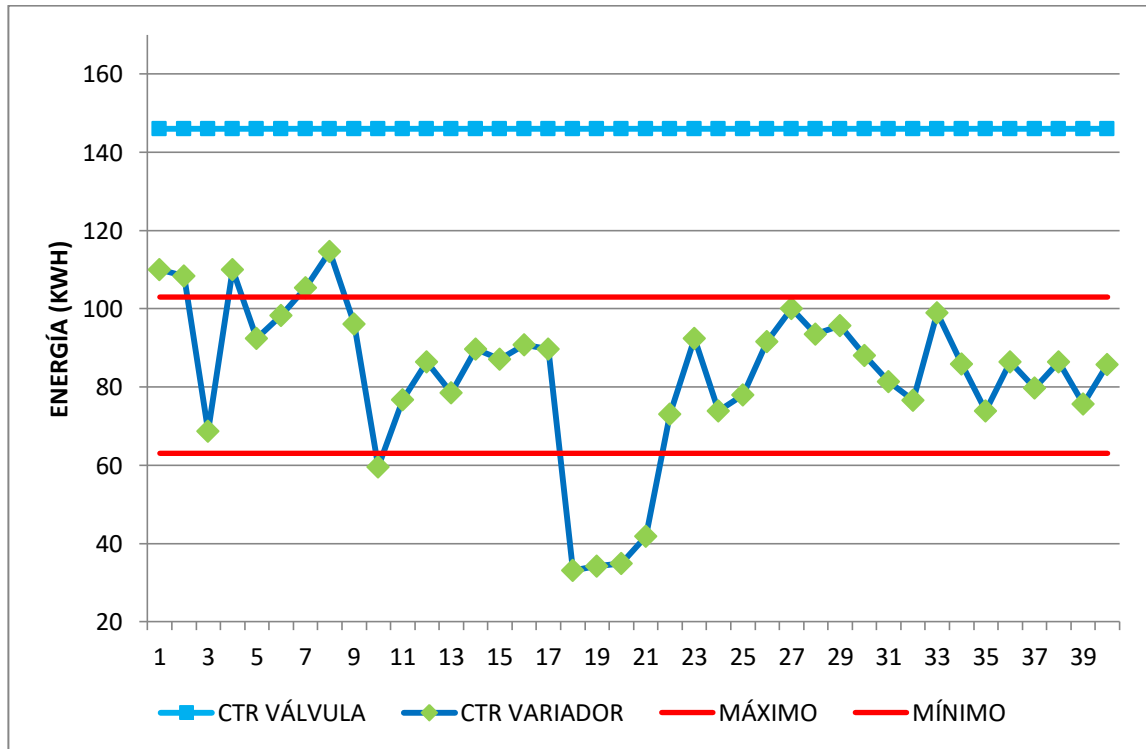
Figura 13. **Consumo de corriente – control por variador**



Fuente: elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente, el consumo de corriente que se consideraría para el control por válvula sería de 214 A. Esto indica que para los datos de consumo del sistema con variador, ni en su punto más alto llega a alcanzar los 200 A de consumo.

Figura 14. Consumo de energía - variador vs. válvula



Fuente: elaboración propia.

De los datos anteriores, se determinó un consumo promedio de energía al no utilizar variador de 146 KWH. Así mismo, se obtuvo un consumo promedio implementado variador de velocidad de 83 KWH, con un porcentaje de variación de consumo de 24 %. La relación entre los consumo para ambos casos, indica que existe un disminución de consumo de energía en un 43 %, al implementar variador de velocidad.

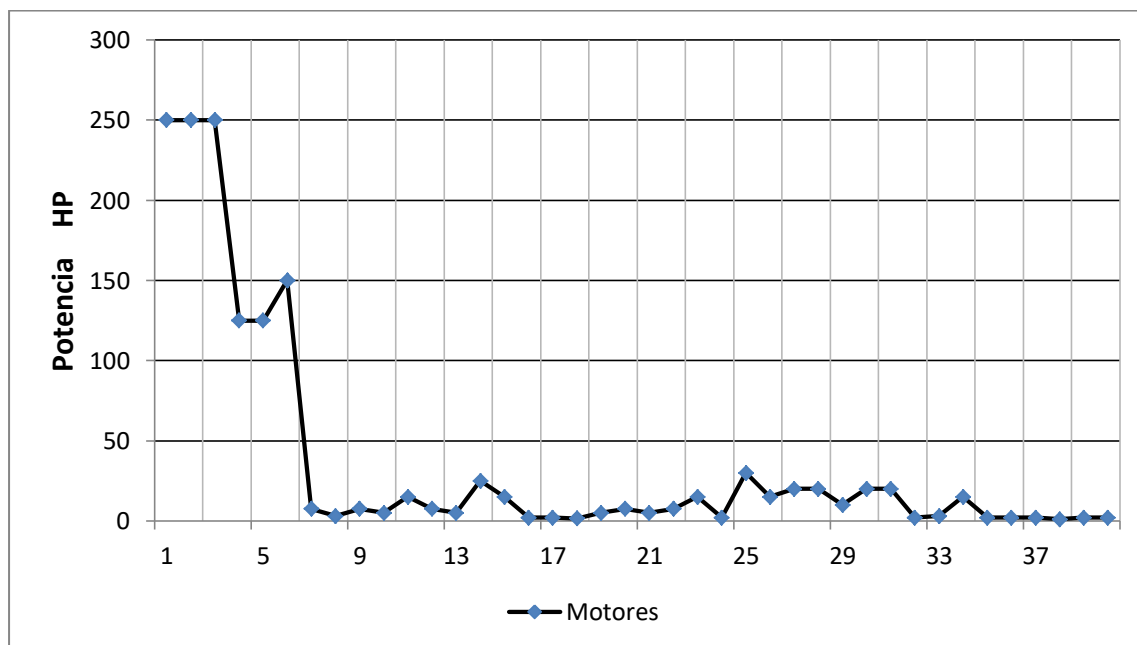
3.2. Consumo de energía de los motores eléctricos

Los motores listados en la Tabla IV, son una muestra de los equipos que están instalados en el área de tratamiento de jugo. El funcionamiento de los mismos varía, según la aplicación en que se encuentran. Puede ser que trabajen constantemente, que estén dentro de un lazo de control o bien que

estén de reserva, lo que hace que su funcionamiento sea periódico. Según información del listado, 38 % de los motores utilizan variador y el 62 % restante usan arrancador. Estos últimos deberían de utilizar válvula de control, si se desea regular alguna variable.

Con base a la información de dicha tabla, se determinó que el 85 % de los mismos tienen una capacidad por debajo de los 50 HP. Con un 60 % de los mismos sin utilizar variador de frecuencia y 40 % que si utilizan.

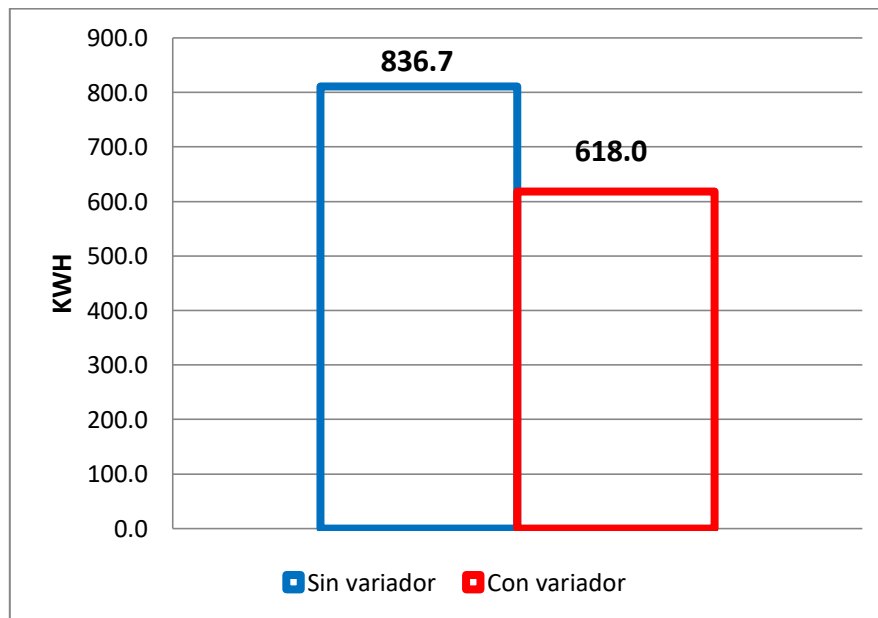
Figura 15. **Capacidad de motores**



Fuente: elaboración propia.

Tomando el dato de 43 % como un ahorro fijo al utilizar variadores de frecuencia y aplicarlo a los motores que no utilizan variador, se determina el consumo de energía que implicaría utilizar variadores de velocidad en todos los motores.

Figura 16. **Consumo de energía de motores**

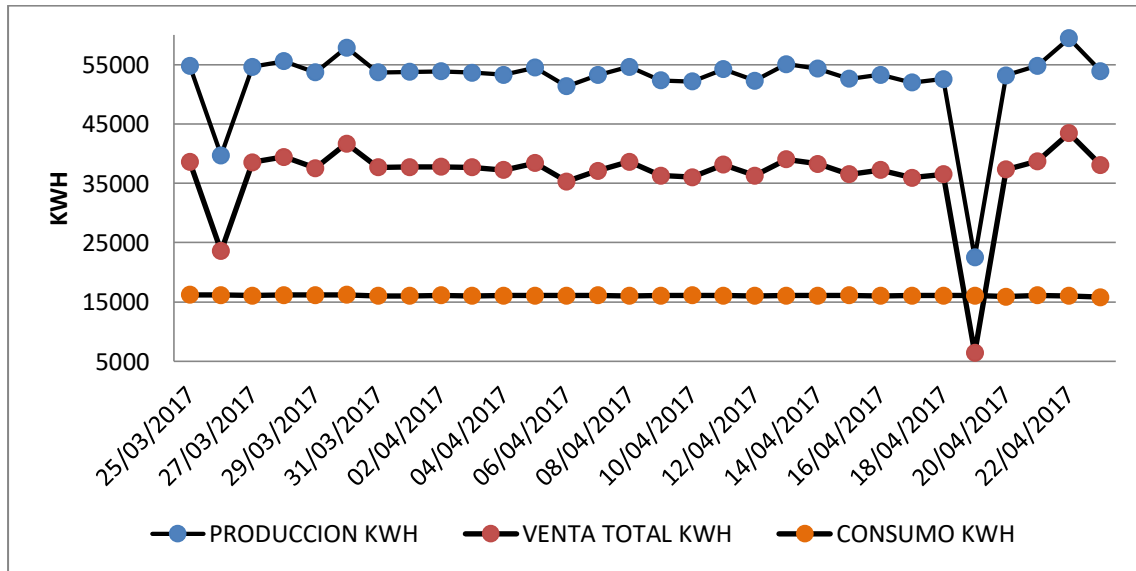


Fuente: elaboración propia.

En la figura 11, la columna azul representa a los motores con y sin variador, según la tabla IV. Mientras que la columna roja representa a todos los motores de dicha tabla al utilizar variador de velocidad. El resultado de la comparación indica que se genera un ahorro de energía de 218.7 KWH, al implementar dichos equipos a los motores listados anteriormente.

Considerando la energía que consume la fábrica, que son 16 MWH equivalente a un 31 % de la energía que genera el ingenio. Se tiene la siguiente comparación:

Figura 17. **Generación, venta y consumo de energía**



Fuente: elaboración propia.

Por lo tanto, se tiene que la carga generada por los motores listados, representan para la fábrica un 5.2 % de consumo de energía. Mientras que al utilizar variadores de velocidad el dato baja a un 3.9 % de energía consumida.

3.3. Viabilidad técnica para la implementación de variadores de velocidad

Los motores *inverter duty* son fabricados pensando en aplicaciones donde se utilicen variadores de velocidad. Como se mencionó anteriormente estos tienen características especiales para soportar los picos de voltaje proveniente del variador.

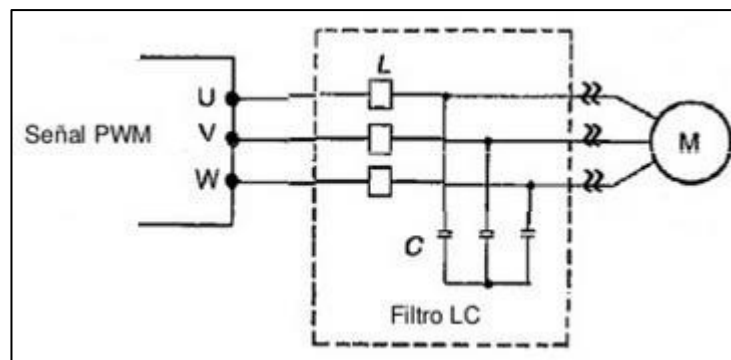
A diferencia de los anteriores, los motores estándar o de propósito general son más propensos a daños cuando se controlan por medio de un variador. Sin embargo, si se toman las medidas necesarias es posible implementar este sistema con equipos estándar.

El motor utilizado en el sistema de control por válvula, es de tipo estándar, que tiene ventilación convencional y está conectado a un arrancador suave por medio de un cable sin blindaje THHN #350MCM. Estas condiciones lo limitan a no trabajar con variador de velocidad, debido al daño que le puede ocasionar.

Sin embargo, como se mencionó anteriormente es posible controlar un motor estándar por medio de un variador de velocidad, siempre y cuando se implementen los siguientes puntos:

- Instalar un filtro entre el variador y el motor, que permita eliminar los picos de tensión generados por la etapa inversora del variador.

Figura 18. **Filtro LC entre variador y motor**



Fuente: elaboración propia.

- Implementar una ventilación extra o forzada al motor, de modo que la temperatura no incremente al trabajar a bajas revoluciones. Esto también ayudará al calentamiento que puede provocar los picos de tensión en los bobinados.
- Cambio de cable de conexión entre variador y motor, por uno blindado o enmallado. Para evitar la onda reflejada y distorsiones electromagnéticas que afecten la alimentación del motor.

Para el caso de motores *inverter duty* se recomiendan la misma protección aunque dependerá de la instalación. Ya que en una distancia menor a 60 mt de instalación no es necesario instalar el filtro entre variador y motor.

Considerando los requisitos anteriores, se determina que los mismos son externos al motor que se desee utilizar. Únicamente dependerán de las características principales del equipo como potencia, corriente, voltaje e incluso lugar de la instalación.

Por lo tanto, se puede decir que es factible implementar variador de velocidad a un motor estándar. Como lo es en este caso, el motor de aluminio de blanco/crudo que se utilizó en la investigación. Siempre que se garantice mantener la temperatura del motor, dentro del rango de operación. Además de la instalación del filtro adecuado que elimine los picos de tensión. Sin olvidar que la instalación del sistema se debe hacerse con el cable idóneo, para minimizar los daños en el motor, así no reducir la eficiencia del sistema significativamente.

3.4. Ahorro y periodo de amortización

Tomando los promedios de consumo de energía de los motores a prueba, se tiene los siguientes datos:

- Motor con válvula 146 KWH
- Motor con variador 83 KWH

Esto quiere decir que existe un ahorro del 43 % de la energía, equivalente a 63 KWH en la prueba realizada. Considerando que el precio de la energía es

de USD 0.08 por KWH, se tiene que los 63 KWH equivalen a USD 21,168.00 de ahorro por zafra para la prueba realizada.

Tabla X. **Costo – ahorro de energía (motor a prueba)**

Consumos de energía	Costo de energía a 100 % de la velocidad	Costo de energía a velocidad variable	Ahorro de energía en el periodo de zafra
Consumo pruebas	\$ 49,056	\$ 27,888	\$ 21,168
Consumo placa	\$ 62,496	\$ 37,968	\$ 24,528

Fuente: elaboración propia.

Ahora bien, considerando los precios de los equipos que se deben de adquirir para la implementación del variador, se tiene la siguiente tabla:

Tabla XI. **Inversión inicial**

Equipo / accesorios	Modelo	Precio unitario	Precio total
Variador	ACS800-U2-0320-5	\$15,839.00	\$15,839.00
Filtro	FOCH0320-50	\$2,219.00	\$2,219.00
Cable 50 mt	ROZ1-K(AS) ECM	\$80.00	\$4,000.00
Ventilación	Ventilador VT644	\$928.20	\$928.20
Total			\$22,986.20

Fuente: elaboración propia.

Para los datos de la tabla anterior, se tiene que el conjunto filtro-cable-ventilador equivale a un 45 % del valor del variador. Dicho dato puede variar, según el tipo de motor a utilizar y distancia de la instalación del motor con respecto al variador.

Si se compara el total de ahorro que se tiene al utilizar variador de velocidad, contra el gasto de inversión inicial para un motor estándar. Se obtiene que para cuando se finalice la zafra, se habrá cubierto el 92 % del gasto inicial.

De modo que el retorno de la inversión dura una zafra completa, más un mes de trabajo de la zafra siguiente. Para hacer un total de 7 meses de período de amortización. Estos datos indican que implementar variadores de velocidad a los motores estándar, resulta ser económicamente viable. Debido a que la inversión se recupera en menos de un año.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Consumo de energía utilizando variadores de velocidad

Los resultados de la investigación confirman el hecho que la implementación de variadores de velocidad a los motores eléctricos, permiten optimizar los procesos y reducir el consumo de energía.

Industrias como las azucareras cuentan con un gran número de motores de diversas capacidades, que pueden variar desde 2 hasta 250 HP como se puede ver en la Tabla IV. Dichos equipos están instalados en diferentes aplicaciones, dentro de las más comunes se encuentran: agitación, bombeo, ventilación, conductores y centrifugas.

Para el caso del área de tratamiento de jugo, el sistema por bombeo es el que se utiliza, tanto para transportar el jugo de caña de un punto a otro como para controlar tanques o sistemas de dosificación. El bombeo se realiza de dos formas: por válvula o por variador de frecuencia.

El método de variación de velocidad permite tener un buen desempeño del control, así como también un mayor ahorro energético, tal como lo indican los resultados de la presente investigación. En la cual se determinó que, utilizar válvula para controlar el caudal de jugo de caña, represente un consumo de 146 KWH. Mientras que al implementar el variador de velocidad, se redujo el consumo a un promedio de 83 KWH.

Los datos anteriores representan que existe una disminución en el consumo de energía de 63 KWH, lo que es equivalente a un 43 % de ahorro de la misma.

Este ahorro se debe a que en el sistema por válvula, la bomba trabaja al 100 % de su capacidad, lo que implica un consumo constante y mayor de energía durante la regulación del flujo. Mientras que en el control por variador, el motor trabaja a diferentes velocidades, por lo tanto, el consumo de energía también resulta variable. Para el caso del motor a prueba el consumo promedio que tuvo indica que el equipo estaba trabajando a un 57 % de su capacidad.

4.2. Consumo de energía de motores instalados

Los 40 motores listados en la tabla IV representan una carga significativa en el consumo de energía del área de tratamiento de jugo. Al basarse en datos de placa y modos de funcionamiento, se determinó que estos motores consumen un total de 836.7 KWH (cerca de 1 MWH).

De la energía que se consume se tiene que el 75 % de la misma corresponde a los motores con capacidades por arriba de los 100 HP. Esto indica que para motor con potencias menores, el ahorro puede variar.

Como se determinó, utilizar variadores de velocidad para aplicaciones de bombeo, permite tener un ahorro de energía en comparación con el sistema de válvula de control. Dicho ahorro representa un 43 % menos de la energía consumida por un motor trabajando con válvula.

Aplicando el porcentaje de ahorro anteriormente mencionado, a cada uno de los 40 motores listados. Se tiene que existe un gasto de 618 KWH de

consumo de energía por el total de los equipos. Esto quiere decir que hay un ahorro de energía de 218.7 KWH al utilizar variadores de velocidad en todos los motores. Para los motores pequeños es necesario evaluar los costos de los equipos, para determinar si es factible económicamente la implementación de variadores de velocidad.

4.3. Viabilidad técnica de motores instalados

La mayoría de los motores listados son tipo estándar, esto indica que trabajar con velocidad variable puede afectar su vida útil significativamente; de no tomarse las consideraciones necesarias. Problemas como la elevación de temperatura, bobinados dañados y eficiencia disminuida son algunos de los problemas generados en este tipo de motores.

Para evitar estos inconvenientes se deben considerar elementos extras al sistema variador – motor. Para el caso del motor a prueba los equipos considerados son:

- Ventilación forzada
- Filtro para supresión de picos de voltaje
- Cable especial blindado

Cada uno de los puntos mencionados contribuye a prolongar la vida del motor y evita que su eficiencia disminuya significativamente. Estos puntos son obligatorios en una instalación con motores estándar, ya que dichos equipos no cuentan con características que les permitan soportar los picos de tensión constantes y la elevación de temperatura a velocidades bajas.

Si el motor utilizado es de tipo *inverter duty*, las consideraciones mínimas para la instalación son el cable blindado y filtro. Este último dependerá de la longitud del cable de conexión, porque mientras más distancia exista, los efectos generados por la parte inversora del variador pueden impactar en mayor proporción las terminales y bobinados del motor.

Por tanto, para el caso de los motores estándar mencionados en la tabla IV, se puede decir que técnicamente son viables para ser controlados por medio de variador de velocidad. Debido a que los requisitos a cumplir son de instalación y por lo tanto, externos a al propio motor.

Por otro lado, la eficiencia energética del sistema variador – motor puede verse reducida si se compara con el control por válvula. Debido a que en este tipo de control, el desempeño del motor depende únicamente de sus propias características.

Sin embargo, al utilizar variador de velocidad la eficiencia del sistema se reduce. Por tal motivo, adicionar la ventilación forzada, el filtro y el cableado especial, permite minimizar el impacto que tiene el variador sobre la eficiencia del motor. Adicional a este factor, se suma también el ahorro energético que representa utilizar variador de velocidad.

4.4. Inversión, ahorro y período de amortización

Como se determinó anteriormente, controlar un motor estándar con un variador de velocidad, implica gastos extras a lo que es el precio del variador de frecuencia. Esto hace que el costo del proyecto se incremente, pero a la vez también reduce la posibilidad de que el motor resulte dañado.

El precio del variador para un motor de 250 HP ronda los USD 15,839.00, según datos del proveedor ABB. A esto se le suma el precio por un filtro para atenuar picos de voltaje; el precio del cable blindado, el cual varía según la distancia de instalación y por último, el precio de la ventilación forzada. Esto da como resultado un costo de implementación de USD 22,986.20.

Comparando el costo de inversión contra el ahorro que representa utilizar variador de velocidad, trabajando durante 24 horas en 175 días de zafra. Se tiene que el 92 % de la inversión es cubierta en los primeros 6 meses de funcionamiento de la implementación.

El 8 % restante se recupera en un mes de trabajo del sistema variador – motor. Por lo tanto, se necesitaría un período de 7 meses de trabajo de dicho sistema, para amortizar el costo de la inversión. Esto indica que en menos de 1 año se empieza a percibir ganancias. Este ahorro de energía implica tenerla disponible para otros procesos o bien para la venta, lo que también genera ingresos a empresa.

Además, utilizar variador de frecuencia permite reducir el costo de mantenimiento en los equipos. Ya que en un sistema por válvula, se debe de dar mantenimiento al motor y a la válvula. Mientras que en el otro sistema, solo implica el mantenimiento del motor, debido a que los componentes electrónicos del variador no sufren desgaste mecánico, por lo que no es necesario renovarlos cada período de reparación.

La reducción del mantenimiento permite un ahorro de USD 872.48 que es el costo de repuestos para una válvula de control de 6" Fisher (según el departamento de instrumentación del ingenio).

Esto demuestra que implementar dicha tecnología resulta ser viable económicamente. Debido a que es una buena estrategia para incrementar el ahorro energético en la empresa, mejorar los sistemas de control de procesos y reducir los costos de mantenimiento. Lo anterior se traduce en ganancias para la empresa, tanto por el ahorro de recursos económicos, humanos, así como también por la energía disponible para la venta en el mercado eléctrico nacional.

CONCLUSIONES

1. Con el estudio, se determinó que existe una disminución en el consumo de energía, al utilizar variadores de velocidad en los motores del área de tratamiento de jugo, al momento de regular el caudal. El porcentaje de ahorro promedio fue del 43 %, en comparación con el sistema que utiliza control por válvula de control.
2. Los motores eléctricos son una de las principales cargas que existen en el área de tratamiento de jugo. Basado en los datos de placa y el porcentaje de ahorro obtenido en las pruebas, se determinó el consumo de energía de los motores listados en el estudio. Actualmente representan cerca de 0.9 MWH incluyendo motores con variadores y sin variador.
3. Los motores estándar instalados en el área de tratamiento de jugo, no son aptos para el uso en conjunto con variadores de velocidad. Debido a que pueden dañarse por el incremento de temperatura y picos de voltaje que dañan el bobinado del motor.
4. Para la utilización de un motor estándar con variador, se debe de considerar el tipo de cable a utilizar, filtros y ventilación extra. Esto ayudará a minimizar los daños en el motor y a prolongar su vida útil. Los requisitos anteriores son externos al propio motor e indican que los mismos son técnicamente viables para el uso de variadores de velocidad. Siempre y cuando se cumplan con los elementos necesarios.

5. El ahorro económico al implementar variadores de velocidad para el caso de estudio, es de USD 21,168.00 por zafra. Mientras que el costo de inversión que representa utilizar variador de velocidad con todo y sus elementos antes mencionados, es de USD 22,968.20. Por lo tanto, el retorno de la inversión se percibirá en su mayoría en una zafra. Queda únicamente el 8 % de la inversión pendiente, para la otra zafra. Esto indica que el período de amortización es de 7 a 8 meses, trabajando el motor 24 horas, durante 175 días.

6. Además de la disminución de consumo energético que representa la utilización de variadores de velocidad. También existe un ahorro económico, ya que se reducen los mantenimientos de la válvula de control.

RECOMENDACIONES

1. Revisar los lazos de control de los procesos para la implementación de variadores. Revisar las características del motor a utilizar, para determinar los elementos que mejor se adecuen al equipo.
2. Para nuevos proyectos, considerar motores con las características necesarias para trabajar con variador de velocidad, tomando en cuenta el tipo de control. Ahora bien si no se controla nada, considerar motores de alta eficiencia para tener ahorro energético en ese tipo de funcionamiento.
3. Implementar por fases variadores de velocidad en el resto de las áreas de la fábrica. Tomando en cuenta que el ahorro depende de la capacidad del motor y del proceso.
4. Considerar un plan de ahorro energético para la fábrica, aprovechando la generación de energía con biomasa. Implementar tecnologías como los variadores de velocidad y motores de alta eficiencia, para reducir el consumo energético. Todo esto se convierte en ingresos para la empresa y más energía disponible para la venta, solamente si el mercado eléctrico así lo permite.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Agencia Andaluza de la Energía. (2011). *Metodología para la elaboración de auditorías energéticas en la industria*. Sevilla: Servigraf Artes Gráficas.
2. Castellanos, J. E., Mahecha, D. R., & Nuñez Cossio, E. (2012). Variadores de frecuencia eléctrica en el control de bombeo de hidrocarburos para reducción de costos energéticos. *Revista Colombiana de Tecnologías Avanzadas*.
3. Chen, J. C. (1985). *Manual del azúcar de caña*. México: Limusa.
4. Chou, C. C., & Chen, J. C. (1993). *Cane Sugar Handbook*. New York: John Wiley & Sons Inc.
5. CNEE, FIDE. (Marzo de 2010). *Ahorro de energía eléctrica mediante motores eléctricos de inducción de alta eficiencia*. Recuperado el 11 de Enero de 2017, de [http://www.cnee.gob.gt/EficienciaEnergetica/FIDE/004%20M%C3%B3dulo%20IV%20\(AEE%20Motores%20de%20Inducci%C3%B3n\).pdf](http://www.cnee.gob.gt/EficienciaEnergetica/FIDE/004%20M%C3%B3dulo%20IV%20(AEE%20Motores%20de%20Inducci%C3%B3n).pdf)
6. Harper, G. E. (2004). *El ABC de las máquinas eléctrica II. Motores de Corriente Alterna*. México: LIMUSA.
7. Instituto Nacional de Bosques. (2015). *Estrategía nacional de producción sostenible y uso eficiente de la leña 2013-2024*. Recuperado el 2 de

Abril de 2018, de <http://www.usaid-cncg.org/wp-content/uploads/2015/07/Estrategia-produccion-y-uso-le%C3%B1a-v6.pdf>

8. Instituto Tecnológico de Canarias, S.A. (Abril de 2008). *Energía renovables y eficiencia energética*. Tenerife, Islas Canarias, España: ITC.
9. Mecánica Moderna. (29 de Enero de 2011). *InfoPLC*. Recuperado el 29 de Marzo de 2018, de <http://www.infoplcn.net/documentacion/21-motion-control-motores/40-introduccion-motores-asincronos-vectoriales>
10. Ministerio de Energía y Minas. (3 de Septiembre de 2012). *Estadísticas Energéticas Subsector Eléctrico 2011*. Recuperado el 15 de Julio de 2017, de <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2015/06/Estad%C3%ADsticas-Energ%C3%A9ticas-2011-corinto.pdf>
11. Ministerio de Energía y Minas. (Marzo de 2013). *Política energética 2003-2027*. Recuperado el 25 de Abril de 2017, de <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2013/02/PE2003-2027.pdf>
12. Ministerio de Energía y Minas. (2016). *Informe Balance Energético 2016*. Recuperado el 15 de Mayo de 2017, de <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2015/05/Balance-Energetico-2016.pdf>
13. NEMA. (2009). *NEMA MG-1 2009: Motors and Genartos*. Recuperado el 1 de Abril de 2018, de <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/005/nema.mg-1.2009.pdf>

14. Pardo García, A., & Díaz Rodríguez, J. L. (2003). Ahorro energético con convertidor de frecuencia. *Revista Colombiana de Tecnologías Avanzadas*.
15. Pulido, M. Á. (2000). *Convertidores de frecuencia, controladores de motores y SSR*. Barcelona, España: MARCOMBO.
16. Quispe, E., & Mantilla, F. (2004). Motores Eléctricos de Alta Eficiencia. *Energía y Computación*, 12(1), 11.
17. Rain, P. (2012). *Ingeniería de la caña de azúcar*. Berlín: Bartens.
18. Valdelvira, Á. d. (Noviembre de 2011). http://platea.pntic.mec.es/~jgarrigo/SAP/archivos/1eva/introduccion_motores_ca.pdf. Recuperado el Octubre de 2017, de http://platea.pntic.mec.es/~jgarrigo/SAP/archivos/1eva/introduccion_motores_ca.pdf
19. Villegas Fernández, R. M. (2009). *Variadores de frecuencia para el ahorro de energía en moto bombas del proyecto Park Plaza*. México D.F.: Tesina, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Eléctrica.
20. WEG. (Enero de 2016). *Guía técnica - Motores de inducción alimentados por convertidores de frecuencia PWM*. Recuperado el 5 de Abril de 2018, de <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motores-de-induccion-alimentados-por-convertidores-de-frecuencia-pwm-50029372-articulo-tecnico-espanol.pdf>

21. Wildi, T. (2007). *Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia*. México: Pearson Educación.

22. Zerquera Izquierdo, M. D., & Sánchez Jiménez, J. J. (2010). Operación óptima de bombas en paralelo empleando variadores de velocidad. *Ingenierías*.