



**UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA**  
**ELECTRÓNICA**



## **TESIS**

# **ESTUDIO TÉCNICO – ECONÓMICO DE AHORRO ENERGÉTICO Y EFICIENCIA PARA LA APLICACIÓN DE VARIADORES DE FRECUENCIA EN EL ARRANQUE DE MOTORES**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO  
ELECTRÓNICO**

**ELABORADO POR**

Bach. Castope Vega César Augusto

Bach. Cornetero Urpeque Armando Martin

**Asesor:**

Mtro. Ing. Oblitas Vera Carlos Leonardo

**LAMBAYEQUE – PERÚ**

**2021**

**UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**



**ESTUDIO TÉCNICO – ECONÓMICO DE AHORRO  
ENERGÉTICO Y EFICIENCIA PARA LA APLICACIÓN DE  
VARIADORES DE FRECUENCIA EN EL ARRANQUE DE  
MOTORES**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO  
ELECTRÓNICO**

**ELABORADO POR**

Bach. Castope Vega César Augusto

Bach. Cornetero Urpeque Armando Martin

**Asesor:**

Mtro. Ing. Oblitas Vera Carlos Leonardo

**LAMBAYEQUE – PERÚ**

**2021**

# TESIS

## ESTUDIO TÉCNICO – ECONÓMICO DE AHORRO ENERGÉTICO Y EFICIENCIA PARA LA APLICACIÓN DE VARIADORES DE FRECUENCIA EN EL ARRANQUE DE MOTORES

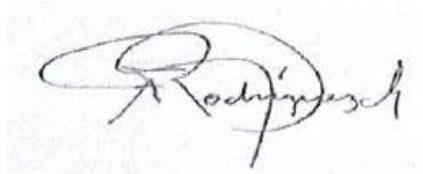
### TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:



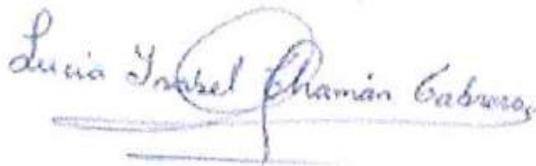
---

ING. RAMÍREZ CASTRO MANUEL JAVIER  
PRESIDENTE



---

MG. ING. RODRÍGUEZ CHIRINOS FRANK RICHARD  
SECRETARIO



---

M.SC. ING. CHAMÁN CABRERA LUCÍA ISABEL  
VOCAL

# TESIS

ESTUDIO TÉCNICO – ECONÓMICO DE AHORRO ENERGÉTICO Y  
EFICIENCIA PARA LA APLICACIÓN DE VARIADORES DE  
FRECUENCIA EN EL ARRANQUE DE MOTORES

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO ELECTRÓNICO

AUTORES:



---

BACH. CASTOPE VEGA CÉSAR AUGUSTO



---

BACH. CORNETERO URPEQUE ARMANDO MARTIN

ASESOR:



---

MTRO. ING. OBLITAS VERA CARLOS LEONARDO



ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL N°045-2021-D/FACFyM

Siendo las 11:00 am del día 17 de diciembre del 2021, se reunieron vía plataforma virtual, <https://meet.google.com/ytv-wfsx-ous> los miembros del jurado evaluador de la Tesis titulada: "ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO DE AHORRO ENERGÉTICO Y EFICIENCIA PARA LA APLICACIÓN DE VARIADORES DE FRECUENCIA EN EL ARRANQUE DE MOTORES", Designados por Resolución N° 686-2021-VIRTUAL-D/FACFyM de fecha 23 de setiembre 2021, Con la finalidad de evaluar y calificar la sustentación de la tesis antes mencionada, conformada por los siguientes docentes:

<b>Ing. Manuel Javier Ramírez Castro</b>	Presidente
<b>Mg. Ing. Frank Richard Rodríguez Chirinos</b>	Secretario
<b>Mg. Ing. Lucía Isabel Chamán Cabrera</b>	Vocal

La tesis fue asesorada por el Mtro. Ing. Carlos Leonardo Oblitas Vera, nombrado por Decreto N° 020-2020-VIRTUAL-UI/FACFyM de fecha 17 de octubre de 2020.

El Acto de Sustentación fue autorizado por Resolución N° 890-2021-VIRTUAL-D/FACFyM de fecha 02 de diciembre de 2021.

La Tesis fue presentada y sustentada por los Bachilleres: Cornetero Urpeque Armando Martín y Casto Vega César Augusto, y tuvo una duración de 45 minutos.

Después de la sustentación, y absueltas las preguntas y observaciones de los miembros del jurado se procedió a la calificación respectiva, otorgándole el Calificativo de 15 (Quince) en la escala vigesimal, mención Regular.

Por lo que quedan aptos para obtener el Título Profesional de **Ingeniero Electrónico** de acuerdo con la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

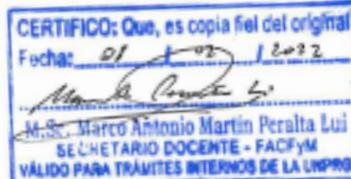
Siendo las 12:05 pm se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto con la firma de los miembros del jurado.

Ing. Manuel Javier Ramírez Castro  
Presidente

Mg. Ing. Frank Richard Rodríguez Chirinos  
Secretario

Mg. Ing. Lucía Isabel Chamán Cabrera  
Vocal

Mtro. Ing. Carlos Leonardo Oblitas Vera  
Asesor



## **Declaración Jurada de Originalidad**

Nosotros, César Augusto Castope Vega y Armando Martin Cornetero Urpeque investigadores principales e Ing. Carlos Leonardo Oblitas Vera, asesor del trabajo de investigación “ESTUDIO TÉCNICO – ECONÓMICO DE AHORRO ENERGÉTICO Y EFICIENCIA PARA LA APLICACIÓN DE VARIADORES DE FRECUENCIA EN EL ARRANQUE DE MOTORES” declaramos bajo juramento que este trabajo no ha sido plagiado, ni contiene datos falsos. En caso se demuestre lo contrario, asumimos responsablemente la anulación de este informe y por ende el proceso administrativo a que hubiera lugar. Que puede conducir a la anulación del título o grado emitido como consecuencia de este informe.

Lambayeque, 25 de febrero del 2022

Investigadores:

Bach. Castope Vega César Augusto

Bach. Cornetero Urpeque Armando Martin

Asesor:

Ing. Oblitas Vera Carlos Leonardo

## **AGRADECIMIENTOS**

*Agradecer a Dios, por fortalecerme a seguir adelante y brindarme salud para alcanzar mis metas y logros trazados. A mi madre por ser el apoyo incondicional hoy y siempre. A mi hermano, abuelos y tías por darme ánimos y su apoyo para nunca rendirme.*

*Castope Vega César Augusto*

*Primero agradecer a Dios, por brindarme salud y sabiduría para alcanzar mis metas trazadas. A mis padres, por ser mi apoyo hoy y siempre. A mis hermanos, abuelos por darme ánimos cuando los necesitaba y a todas las personas que siempre me apoyan.*

*Cornetero Urpeque Armando Martin*

## DEDICATORIA

*Dedico esta tesis a mi abuela que está en el cielo y me ilumina en cada paso que doy en mi vida y a mi madre que gracias a ella pude lograr terminar mi carrera profesional con esfuerzo y salud. A las personas que brindaron un tiempo en sus vidas para brindarme sus conocimientos y ayuda.*

*Castope Vega César Augusto*

*Dedico este trabajo a mi abuela ya en el cielo que me ilumina en cada paso de mi vida profesional y personal. A mi abuelo que en vida me sigue brindando sus sabios consejos. A mis padres y hermanos los cuales me brindan su apoyo de manera incondicional.*

*Cornetero Urpeque Armando Martin*

## RESUMEN

En este proyecto de investigación se realizó un estudio económico y técnico con el objetivo de definir la viabilidad en la aplicación de variadores de frecuencia para el arranque de sistemas de bombeo residenciales a velocidad variable utilizando tres variadores de frecuencia: ATV32, SINAMICS V20 y DELTA VFD-L. Como caso de estudio se tomó el sistema de bombeo a velocidad constante que abastece a 12 familias del Bloque B de la Residencial San Pedro, ubicada en la dirección Ca. 2 de mayo #321 en la región Lambayeque. El estudio técnico contempló las visitas de campo a la residencial para determinar el estado del sistema de bombeo, la cantidad de viviendas y miembros por familia, de esta manera se pudo estimar el consumo diario por vivienda que se utiliza para realizar las necesidades tanto en higiene como para el consumo de esta, obteniendo así que una persona necesita como mínimo 100 litros diarios de agua, según lo señala la OMS. El estudio técnico también abarcó las pruebas realizadas para determinar cuál de los tres variadores de frecuencia ofrece el mejor rendimiento y el menor consumo de energía. Por su parte, el estudio económico sirvió para determinar los costos por adquisición para el variador de frecuencia, así como también su porcentaje de ahorro por el costo que produce la energía consumida. Los resultados fueron los siguientes: con respecto al consumo de energía anual a velocidad constante (950,4 kW/h), el variador de frecuencia ATV32 logró una disminución de 348,288 kW/h o 36,65%, mientras que los variadores de frecuencia SINAMICS V20 y DELTA VFD-L lograron una disminución de 373,008 kW/h o 39,25%. Respecto al costo económico anual por energía consumida a velocidad constante (S/ 691,92), el variador de frecuencia ATV32 logró una disminución de S/ 253,484 o 36,63%, mientras que los variadores de frecuencia SINAMICS V20 y DELTA VFD-L lograron una disminución de S/ 265,44 o 38,36%.

***Palabras Clave:*** Ahorro Energético, Eficiencia Energética, Variadores de Frecuencia.

## ABSTRACT

In this research project, an economic and technical study was carried out with the aim of defining the feasibility in the application of frequency inverters for the start-up of residential pumping systems at variable speed using three frequency inverters.: ATV32, SINAMICS V20 and DELTA VFD-L. As a case study, the constant speed pumping system that supplies 12 families from Block B of Residencial San Pedro, located at Ca. 2 de Mayo # 321 in the Lambayeque region was taken as a case study. The technical study included field visits to the residential to determine the status of the pumping system, the number of homes and members per family, in this way it was possible to estimate the daily consumption per home assuming that a person needs at least 100 liters of daily water to meet their drinking and hygiene needs, according to the WHO. The technical study also covered tests carried out to determine which of the three frequency inverters offers the best performance and the lowest power consumption. For its part, the economic study served to determine the costs for acquiring the frequency inverter and the percentage of savings due to the cost of energy consumed. The results were as follows: with respect to annual energy consumption at constant speed (950.4 kW / h), the ATV32 frequency inverter achieved a decrease of 348.288 kW / h or 36.65%, while the SINAMICS frequency inverters V20 and DELTA VFD-L achieved a decrease of 373.008 kW / h or 39.25%. Regarding the annual economic cost for energy consumed at constant speed (S / 691.92), the ATV32 frequency inverter achieved a decrease of S / 253.484 or 36.63%, while the SINAMICS V20 and DELTA VFD-L frequency inverters they achieved a decrease of S / 265.44 or 38.36%.

**Keywords:** *Energy Saving, Energy Efficiency, Variable Frequency Drive.*

## ÍNDICE

1. CAPÍTULO I: ASPECTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	8
1.1. Planteamiento de la Investigación.....	8
1.1.1. Síntesis de la Situación Problemática .....	8
1.1.2. Formulación del Problema de Investigación.....	10
1.1.3. Hipótesis del Problema .....	10
1.1.4. Objetivos.....	10
1.2. Diseño Teórico.....	11
1.2.1. Antecedentes .....	11
1.2.2. Definición y Operacionalización de Variables .....	13
1.2.3. Diseño Metodológico.....	14
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	16
2.1. Ahorro Energético y Eficiencia.....	16
2.1.1. Eficiencia Energética en el Control de Motores .....	17
2.1.2. Eficiencia Energética en el Control de Iluminación .....	19
2.1.3. Eficiencia Energética en los Sistemas de Medición .....	20
2.1.4. Eficiencia Energética en la Compensación de Energía Reactiva.....	21
2.2. Motores Eléctricos.....	22
2.2.1. Estructura .....	22
2.2.2. Clasificación .....	24
2.2.3. Tipos de Arranque.....	28
2.3. Variador de frecuencia .....	36
2.3.1. Principio de Funcionamiento .....	37
2.3.2. Etapas de Funcionamiento .....	38
2.3.3. Beneficios .....	40

3.	CAPÍTULO III ESTUDIO TÉCNICO – ECONÓMICO .....	42
3.1.	Estudio Técnico.....	42
3.1.1.	Abastecimiento de Agua.....	43
3.1.2.	Consumo de Agua Bloque B.....	45
3.1.3.	Cálculo de Tiempo de Vaciado de Tanques .....	46
3.1.4.	Cálculo de Tiempo de Llenado de Tanques.....	47
3.1.5.	Cálculo del Tiempo de Operación de las Bombas .....	47
3.1.6.	Cálculo de Energía Consumida a Velocidad Constante .....	49
3.1.7.	Calculo de Energía a Velocidad Variable.....	50
4.	CAPÍTULO IV RESULTADOS.....	84
4.1.	Resultados del Estudio Técnico .....	84
4.2.	Resultados del Estudio Económico.....	84
5.	CAPÍTULO V CONSLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	86
5.1.	Conclusiones .....	86
5.2.	Recomendaciones.....	90
6.	BIBLIOGRAFÍA .....	92

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Eficiencia en el Control de Motores con Variadores de Frecuencia .....	9
<b>Figura 2</b> Diseño y Contrastación de Hipótesis.....	14
<b>Figura 3</b> Consumo de Energía y Emisiones de CO <sub>2</sub> para 2050 .....	17
<b>Figura 4</b> Aplicación de Variadores de Frecuencia para Eficiencia Energética.....	18
<b>Figura 5</b> Aplicación de Luces LED para Eficiencia Energética .....	19
<b>Figura 6</b> Partes Internas del Motor Eléctrico .....	23
<b>Figura 7</b> Partes Externas del Motor Eléctrico .....	24
<b>Figura 8</b> Devanados de Motor Eléctrico Monofásico .....	25
<b>Figura 9</b> Arranque Directo de Motor Monofásico .....	26
<b>Figura 10</b> Conexión Interna de Devanados.....	26
<b>Figura 11</b> Conexión en Triangulo y Conexión en Estrella .....	27
<b>Figura 12</b> Conexión de los Devanados del Motor Trifásico.....	27
<b>Figura 13</b> Arranque Directo de Motor Trifásico.....	28
<b>Figura 14</b> Relevador de Falta de Fase.....	29
<b>Figura 15</b> Curva Par - Velocidad .....	30
<b>Figura 16</b> Curvas Par - Velocidad y Corriente-Velocidad.....	31
<b>Figura 17</b> Curva de Arranque a Tensión Reducida.....	32
<b>Figura 17</b> Bornes de Potencia del Arrancador Suave .....	33
<b>Figura 19</b> Bornes de Control del Arrancador Suave.....	34
<b>Figura 20</b> Configuración de Parámetros del Arrancador Suave .....	34
<b>Figura 21</b> Control de Velocidad en Modo Manual .....	35
<b>Figura 22</b> Control de Velocidad en Modo Automático .....	36

<b>Figura 23</b> Aplicaciones en la Industria de los VFD.....	37
<b>Figura 24</b> Rectificador de Entrada.....	38
<b>Figura 25</b> Bus de CC Simplificado.....	39
<b>Figura 26</b> PWM.....	40
<b>Figura 27</b> Bloques de Residencial San Pedro.....	43
<b>Figura 28</b> Tanques de Abastecimiento de Agua.....	44
<b>Figura 29</b> Bombas de Abastecimiento de Agua.....	44
<b>Figura 30</b> Características de Bombas de Abastecimiento de Agua.....	45
<b>Figura 31</b> Características de Tanques de Abastecimiento de Agua.....	45
<b>Figura 32</b> Características Eléctricas de Bombas de Abastecimiento de Agua.....	49
<b>Figura 33</b> VFD ATV 32.....	50
<b>Figura 34</b> Configuración de Fábrica de ATV32.....	51
<b>Figura 35</b> Parámetro FCSI de ATV32.....	52
<b>Figura 36</b> Parámetro FrY de ATV32.....	52
<b>Figura 37</b> Parámetro GFS de ATV32.....	53
<b>Figura 38</b> Configuration de Arranque Rápido de ATV32.....	53
<b>Figura 39</b> Referencia y Orden de Marcha de ATV32.....	56
<b>Figura 40</b> Prueba al 50% con el ATV32.....	59
<b>Figura 41</b> Prueba al 70% con el ATV32.....	60
<b>Figura 42</b> Prueba al 100% con el ATV32.....	62
<b>Figura 43</b> VFD SINAMICS V20.....	63
<b>Figura 44</b> Configuración de SINAMICS V20.....	63
<b>Figura 45</b> Configuración de Frecuencia de SINAMICS V20.....	64

<b>Figura 46</b> Configuración de Tensión Nominal de SINAMICS V20 .....	64
<b>Figura 47</b> Configuración de Corriente Nominal de SINAMICS V20 .....	65
<b>Figura 48</b> Configuración de Potencia Nominal de SINAMICS V20.....	65
<b>Figura 49</b> Configuración de Frecuencia Nominal del Motor en SINAMICS V20 .....	66
<b>Figura 50</b> Configuración de Frecuencia Mínima del Motor en SINAMICS V20 .....	66
<b>Figura 51</b> Configuración de Frecuencia Máxima del Motor en SINAMICS V20.....	67
<b>Figura 52</b> Configuración de Rampa de Aceleración del Motor en SINAMICS V20 .....	67
<b>Figura 53</b> Configuración de Rampa de Deceleración del Motor en SINAMICS V20 .....	68
<b>Figura 54</b> Prueba al 50% con el SINAMICS V20 .....	69
<b>Figura 55</b> Prueba al 70% con el SINAMICS V20 .....	71
<b>Figura 56</b> Prueba al 0% con el SINAMICS V20 .....	72
<b>Figura 57</b> DELTA VFD-L .....	73
<b>Figura 58</b> Parámetros Básicos de DELTA VFD-L .....	74
<b>Figura 59</b> Parámetros de Operación de DELTA VFD-L.....	75
<b>Figura 60</b> Frecuencia de Operación en DELTA VFD-L .....	75
<b>Figura 61</b> Límite de Frecuencia Máximo de Operación en DELTA VFD-L .....	76
<b>Figura 62</b> Voltaje Máximo de Salida en DELTA VFD-L .....	76
<b>Figura 63</b> Tiempo de Rampa de Aceleración en DELTA VFD-L.....	77
<b>Figura 64</b> Tiempo de Rampa de Desaceleración en DELTA VFD-L.....	77
<b>Figura 65</b> Fuente de Comando de la Frecuencia en DELTA VFD-L.....	78
<b>Figura 66</b> Fuente de Comando de Operación en DELTA VFD-L.....	78
<b>Figura 67</b> Prueba al 50% con el DELTA VFD-L .....	80
<b>Figura 68</b> Prueba al 70% con el DELTA VFD-L .....	81

<b>Figura 69</b> Prueba al 100% con el DELTA VFD-L .....	83
<b>Figura 70</b> Energía Consumida al 50% de Carga.....	86
<b>Figura 71</b> Energía Consumida al 70% de Carga.....	87
<b>Figura 72</b> Energía Consumida al 100% de Carga.....	87
<b>Figura 73</b> Variación del Tiempo de Llenado para el 50%, 70% y 100% de Carga.....	88
<b>Figura 74</b> Reducción de Energía Consumida Anual al 100% de Carga .....	89
<b>Figura 75</b> Reducción de Costos por Energía Consumida Anual al 100% de Carga .....	89

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Definición y Operacionalización de Variables .....	13
<b>Tabla 2</b> Días y Tiempo de Operación de la Bomba .....	47
<b>Tabla 3</b> Eficiencia de Variadores de Frecuencia ATV32 .....	51
<b>Tabla 4</b> Eficiencia de Variadores de Frecuencia ATV32 .....	54
<b>Tabla 5</b> Eficiencia de Variadores de Frecuencia ATV32 .....	57
<b>Tabla 6</b> Consumo de Energía a Velocidad Variable .....	84
<b>Tabla 7</b> Costo Económico por Consumo de Energía .....	85
<b>Tabla 8</b> Costo de Variadores de Frecuencia.....	85
<b>Tabla 9</b> Consumo Mensual de Energía DELTA VFD-L .....	90
<b>Tabla 10</b> Costo Económico por Consumo de Energía Mensual y Anual DELTA VFD-L.....	90

## CAPÍTULO I

### ASPECTOS DE LA INVESTIGACIÓN

#### 1.1. Planteamiento de la Investigación

##### 1.1.1. *Síntesis de la Situación Problemática*

La eficiencia energética es considerada la manera más barata, rápida y pura de disminuir la demanda de gasto de energía y, por lo tanto, reducir cualquier clase de emisión de gases, como los del efecto invernadero todo esto con el objetivo de satisfacer los objetivos planteados en el Protocolo de Kioto, y que en diversos sectores industriales existe una creciente demanda (Schneider Electric, 2012).

Según (ABB, 2016), 40% del total de la electricidad es consumida por el sector industrial, de los cuales, los motores eléctricos utilizan los dos tercios. Además, se ha logrado estimar que 70% de toda esta energía es utilizada por motores eléctricos, hablamos de millones de estos que se encuentran funcionando en diferentes industrias a lo largo del mundo.

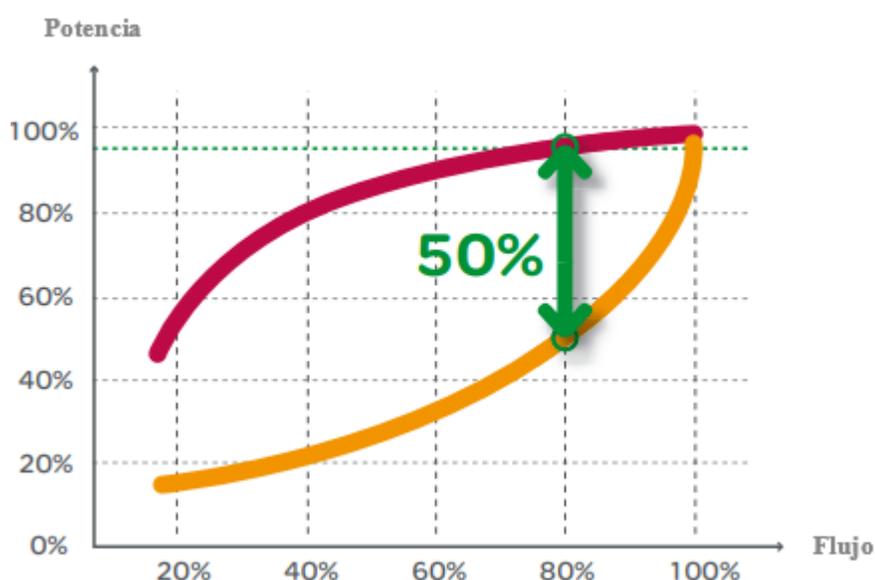
Es conocido que para un proceso particular se necesita una amplia cantidad de motores, los cuales demandan electricidad con el fin de otorgar la velocidad y el par que se necesita. Algunos requieren menos velocidad y otros mucha más, todo depende del proceso a realizar y de la medida de energía necesaria para tal propósito. Sin embargo, lo ideal es que se gestione la velocidad de dicho motor para que sea lo estrictamente requerido durante el proceso en mención, esto se hace con la finalidad de no malgastar la energía (ABB, 2018).

En una instalación tradicional de bombeo y ventilación, el motor eléctrico recibe energía directamente de la línea eléctrica y funciona a su velocidad nominal, esto se logra con los sistemas de arranque DOL (Direct On Line) y sus variantes. Sin embargo, con un convertidor de frecuencia instalado entre el disyuntor y el motor, el ahorro en costos de electricidad podría estar entre 15 y

50 %, dependiendo de la instalación. Además, el retorno de la inversión es generalmente muy rápido, entre 9 y 24 meses (Schneider Electric, 2018).

En la Fig. 1 se puede observar que con el control tradicional aplicado a un sistema de bombeo (curva de color morado), el motor utiliza el 95 % de potencia nominal para el 80 % de flujo, mientras que usando el convertidor de frecuencia controlando a este motor (curva de color mostaza), este solo utiliza el 50 % de potencia nominal para la misma cantidad de flujo.

**Figura 1** Eficiencia en el Control de Motores con Variadores de Frecuencia



Fuente: Schneider Electric

Los convertidores de frecuencia pueden contribuir a un uso más eficiente adecuando la velocidad de cada motor eléctrico a los requerimientos de cada aplicación y, por lo tanto, reducir el consumo de energía del motor, sin embargo, los motores no cuentan con este dispositivo en muchos casos (menos del 10% solo los utiliza) (ABB, 2018).

Como vemos, el requerimiento mundial por la electricidad está en constante crecimiento en todos los sectores. Por esta razón, las grandes empresas deben proporcionar una propuesta

efectiva con el fin de disminuir las emisiones de gases, así como también la disminución del consumo energético y el mejoramiento de esta eficiencia energética.

En el presente proyecto de investigación se aplicará una metodología para determinar la viabilidad en la utilización de convertidores de frecuencia para el arranque de motores dentro de un sistema de bombeo residencial mediante un estudio técnico-económico de ahorro de energía y eficiencia energética, para lograrlo, se realizarán pruebas con tres variadores de frecuencia de distintas marcas para controlar el arranque, calcular el costo y consumo de energía.

### ***1.1.2. Formulación del Problema de Investigación***

¿Cómo el estudio técnico – económico de ahorro energético y eficiencia puede demostrar que la aplicación de variadores de frecuencia en el arranque de motores es viable?

### ***1.1.3. Hipótesis del Problema***

Si realizamos un estudio técnico-económico que incluya el cálculo y costo de energía consumida a velocidad constante y a velocidad variable, entonces se podrá demostrar que la aplicación de variadores de frecuencia en el arranque de motores es factible y reduce el consumo energético.

### ***1.1.4. Objetivos***

#### **1.1.4.1. Objetivo General**

Realizar un estudio técnico – económico de ahorro energético y eficiencia para la aplicación de variadores de frecuencia en el arranque de motores.

#### **1.1.4.2. Objetivos Específicos**

Como objetivos específicos dentro de esta investigación, tenemos los siguientes:

- Realizar visitas a la Residencial San Pedro para determinar el número de personas por viviendas B y el estado del sistema de bombeo.

- Calcular el tiempo de vaciado y llenado del tanque, y el tiempo de actividad de la bomba.
- Realizar el análisis técnico: cálculo de energía consumida mensual y anual a velocidad constante y velocidad variable con tres variadores de frecuencia.
- Realizar el análisis económico: cálculo del costo por energía consumida mensual y anual a velocidad constante y velocidad variable con tres variadores de frecuencia.

## **1.2. Diseño Teórico**

### **1.2.1. Antecedentes**

#### **1.2.1.1. Nacional**

**Título:** Mejora de la eficiencia energética en los sistemas de bombeo por variación del flujo.

**Institución:** Universidad Nacional de San Agustín (UNSA), Arequipa.

**Año en que fue publicada:** 2016.

Tesis para optar el TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO presentada por: Aztete Álvarez, Gaskels Harland.

**Resumen:** El propósito de este proyecto fue cotejar el gasto de la energía eléctrica de dos clases de control de flujo en sistemas de bombeo, estos fueron usando un convertidor de frecuencia y el otro mediante una válvula de estrangulamiento, en este caso se hizo para 2 clases de motores, hablamos de los que cuentan con alto rendimiento y de los estándares. Para el caso estudiado, se logró demostrar que el uso de un motor con alto rendimiento en reemplazo de un motor estándar genera una disminución en el gasto de la energía eléctrica, esta fue de 33,42% a 32,45%. El cambio realizado para controlar el flujo y el cambio hecho en la válvula para estrangulación durante el control con el variador de velocidad produjo una conservación de energía eléctrica de aproximadamente 47,18% a 52,22% para ciertos rangos. El reemplazo que se realizó para controlar el flujo mediante la válvula y el motor de clase estándar para manejar este flujo mediante el

convertidor de frecuencia y el uso de un motor con alta eficiencia hizo que se generara una conservación de energía de 67,03%. Para estimar el peso usando el programa para controlar la eficiencia energética de la cualidad de energía, el investigador midió tanto los diferentes niveles de deformación armónica total presente en la corriente y voltaje creados mediante las tres formas de accionar a un motor trifásico, estos son, el arranque con convertidor de frecuencia, usando el arranque suave y el clásico arranque directo, todo esto comparándose con normas internacionales y valores estándares.

### **1.2.1.2. Internacional**

**Título:** Diseño e implementación de una demostración práctica en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas utilizando el variador de frecuencia como fuente de ahorro de energía.

**Institución:** Escuela Superior Politécnica de Chimborazo – Riobamba, Ecuador.

**Año de publicación:** 2012.

Tesis para optar el TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO presentada: Pesántez Erazo, Adriana Alexandra.

**Resumen:** El desarrollo de este proyecto se basó en diseñar y construir un equipo de laboratorio utilizando un convertidor de frecuencia con el objetivo de controlar el sistema utilizado para bombear y lograr determinar la cantidad de energía ahorrada. El método empleado para desarrollar este proyecto fue programar nuestro LOGO, el cual es considerado un relé inteligente, este a su vez nos permite tomar el control del convertidor de frecuencia y mediante este mismo al sistema utilizado para bombear accionando todo esto de manualmente y automáticamente. Para estimar la cantidad de energía ahorrada se usó un medidor, este fue uno trifásico, este al conectarse al sistema utilizado para bombear y ejecutar un arranque directo y un arranque usando un convertidor de frecuencia por un periodo de tiempo, nos da la facilidad de estimar la variación en el gasto

energético entre ambas formas de manejo, obteniendo de esta manera un notable ahorro de la energía utilizada. Por último, podemos concluir que a través del cambio en frecuencia en el motor utilizado para manejar la bomba se logran ganancias económicas dentro de las compañías que utilizan estos para sus aplicaciones.

### 1.2.2. Definición y Operacionalización de Variables

En este proyecto de investigación se distinguen las siguientes variables:

**Tabla 1** Definición y Operacionalización de Variables

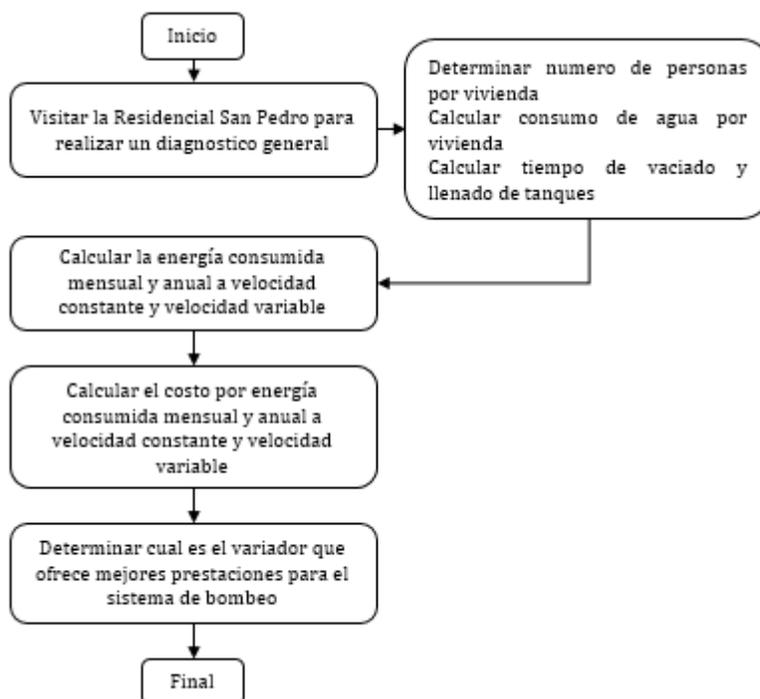
Variables	Dimensiones	Definición Operacional	Indicadores
<b>Independiente</b>  Estudio Técnico – Económico de Ahorro Energético y Eficiencia	Estudio Técnico – Económico	Permite proponer y analizar opciones tecnológicas para controlar el arranque de motores y verificar la factibilidad técnica de cada una de ellas.	Cálculo de Energía Consumida Cálculo de Ahorro Energético Costos de Instalación
	Ahorro Energético y Eficiencia	Es aquel hecho de realizar un consumo de energía mucho menor al usual, esto es, lograr disminuir el gasto de energía, sin embargo, esto no debe afectar al nivel de funcionamiento actual del sistema.	kWh
<b>Dependiente</b>  Aplicación de Variadores de Frecuencia en el Arranque de Motores	Aplicación de Variadores de Frecuencia	El convertidor de frecuencia permite efectuar un control tanto en velocidad como en el par en distintas aplicaciones con motores.	Tensión Nominal (V) Corriente Nominal (A) Frecuencia Nominal (Hz) Par (N.m) Velocidad (RPM) Potencia (HP)
	Arranque de Motores	Este proceso consiste en arrancar el motor, esto se da en el tiempo en el que el motor tiene velocidad cero hasta el punto en que este se estabilice al nivel del par necesario para controlar la carga que tiene por objetivo mover.	Tensión Nominal (V) Corriente Nominal (A) Corriente Píco (A) Potencia (HP)

Fuente: Elaboración propia

### 1.2.3. Diseño Metodológico

#### 1.2.3.1. Diseño de Contrastación de Hipótesis

*Figura 2 Diseño y Contrastación de Hipótesis*



*Fuente: Elaboración propia*

#### 1.2.3.2. Población

Residencial San Pedro.

#### 1.2.3.3. Muestra

Bloque B – Residencial San Pedro.

#### 1.2.3.4. Técnicas, Instrumentos, Equipos y Materiales

En este proyecto de investigación se utilizaron los siguientes recursos:

- Bomba centrífuga trifásica: de 2,2 kW, 220 V CA, conexión en triángulo.
- Tres variadores de frecuencia: input: 220VCA (monofásica), output: 220VCA (monofásica).

- Manuales de configuración de variadores de frecuencia.
- Herramientas de medición: voltímetro, pinza amperimétrica, etc.
- Pulsadores, selectores, pilotos luminosos, etc.
- Conductores para sistemas de potencia y control.
- Catálogos, hojas de datos, fichas técnicas, etc.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### **2.1. Ahorro Energético y Eficiencia**

El constante crecimiento en la inquietud por obtener una mejor sostenibilidad y la preocupación por el futuro de la Tierra nos ha llevado a repensar los patrones actuales de generación y consumo de energía. El apremio por asegurar el ahorro de energía, moderar la contaminación existente en nuestro planeta y disminuir cualquier clase de emisión de gas con el objetivo de contener el creciente cambio climático. Con esto en mente, las diversas organizaciones gubernamentales internacionales y nacionales se han planteado fines y medidas concretas para reducir el consumo de energía y las emisiones de dióxido de carbono (Schneider Electric España, S.A., 2015).

A pesar de las enormes inversiones en energías renovables, cada año se queman millones de toneladas de combustibles fósiles para generar electricidad. Debido a las ineficiencias que se producen, desde la detección de varias fuentes de energía hasta su consumo, se liberan innecesariamente grandes cantidades de dióxido de carbono a la atmósfera, lo que contribuye al calentamiento global (ABB, 2018).

Dada la urgencia del cambio climático, nuestra mayor oportunidad de reducir significativamente las emisiones es utilizar la energía de manera más eficiente. Se estima que las mejoras en la eficiencia energética podrían lograr la mitad de la reducción de emisiones requerida para retrasar el calentamiento global en los próximos 25 años. Además, al utilizar estos valiosos recursos de manera más eficiente, duran más y se ahorra dinero (ABB, 2018).

De acuerdo a (Schneider Electric España, S.A., 2015), el consumo de energía en 2050 será el doble que el del año en curso, y para cumplir con las disposiciones del Protocolo de Kioto, este año (2020) se debe disminuir la emisión de los GEI a la mitad en contraste a niveles como en el año 1990.

**Figura 3** Consumo de Energía y Emisiones de CO<sub>2</sub> para 2050



Fuente: Schneider Electric

Una solución a esto es alcanzar a generar energía más pura a mediano plazo, pero lamentablemente las soluciones de hoy en día usadas para lograr una eficiencia energética y encaminadas a optimizar el gasto de energía permiten un ahorro de 30% como máximo, lo que hace que esta sea una solución ecológica que sea inmediatamente aplicable. (Schneider Electric España, S.A., 2015).

### **2.1.1. Eficiencia Energética en el Control de Motores**

Los motores consumen más energía eléctrica que la requerida por otros dispositivos. Por esta razón, algo relevante en la industria a un nivel general fue examinar el grupo de carga del motor e intentar optimizar todo el proceso. Por lo general, podemos encontrar motores que funcionan bajo variables circunstancias de carga (gases, pesos, líquidos, etc.). Para este tipo de casos, la variación electrónica para la velocidad del motor reemplaza los sistemas usados en control

convencionales con resultados de energía espectaculares según sea necesario (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2010).

Los motores de inducción son muy robustos en entornos con alta demanda, pero también son sensibles a las condiciones de la energía suministrada por la red de distribución. De esta manera, las desigualdades de voltaje, la presencia de armónicos y otras perturbaciones en el suministro provocan vibraciones en el eje, calentamiento adicional de los devanados y pérdidas adicionales en el motor. Muchos de estos efectos son insignificantes en comparación con las cantidades normales de torque, pero su presencia continua durante la operación de la máquina generalmente conlleva graves consecuencias (Guevara, 2010).

La selección para instalar un convertidor de frecuencia como medio para ahorrar energía tiene presente (Sandoval, 2015):

- Reducir el nivel de consumo.
- Mejorar el control de la operación, a su vez aumentar la ganancia y la utilidad de las fases productivas, disminuyendo la velocidad del motor cuando esta sea innecesaria.
- Ahorro durante el mantenimiento (el motor trabaja siempre que se encuentre en condiciones óptimas de funcionamiento).

**Figura 4** *Aplicación de Variadores de Frecuencia para Eficiencia Energética*



Fuente: ABB

### ***2.1.2. Eficiencia Energética en el Control de Iluminación***

La iluminación de color blanca nos da una variedad de maneras para salvaguardar la energía y proteger de esta manera el ambiente que nos rodea. A mejor luminosidad observada de esta iluminación blanca nos da a conocer la distancia que existe a través de los postes de la lámpara y aumenta para instalaciones nuevas. Por otro lado, es posible utilizar lámparas que posean una potencia menor mientras se realiza la renovación de estos componentes.

Simplemente actualizando la estación de iluminación usando nuevos surtidores de luz, el gasto de energía puede verse reducido en 43%. Realizando una nueva instalación, el ahorro alcanza un 56% y usando tecnología LED para ahorrar energía, los posibles ahorros son aún mayores (Philips Lighting, 2019).

Por lo tanto, la alta calidad de la iluminación blanca viene a ser una solución ecológica en lugares al aire libre, ya que reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> a un nivel anteriormente considerado imposible y reduce considerablemente las facturas de electricidad.

#### ***Figura 5 Aplicación de Luces LED para Eficiencia Energética***



*Fuente: Philips Lighting*

### ***2.1.3. Eficiencia Energética en los Sistemas de Medición***

Se debe llevar a cabo una gran cantidad de muestreo y mediciones tanto para auditorías energéticas como para otros procesos de caracterización energética en un edificio. Estas muestras se utilizan para definir el edificio energéticamente, para obtener información de la línea de base energética, para delimitar las señales de eficiencia energética y para hallar situaciones que permitan mejorarlo (Minem, 2014).

Para realizar tales medidas, se requiere un amplio grupo de herramientas con aplicaciones propias, por ejemplo: detectar presencia de puentes térmicos, medir el consumo, analizar las redes eléctricas o medir la presión.

En este punto, detallaremos algunos puntos importantes para obtener un correcto diagnóstico energético a un nivel completo en cualquier inmueble (Perea, 2014):

- Caudalímetro,
- Analizador de redes eléctricas,
- Luxómetro,
- Medidor de concentración de CO<sub>2</sub>,
- Analizador de gases de combustión,
- Medidores de consumo,
- Sondas de temperatura superficial,
- Cámara termográfica, etc.

#### **2.1.4. Eficiencia Energética en la Compensación de Energía Reactiva**

Por concepto, el factor de potencia ( $\cos \phi$ ) es el cociente que resulta de dividir la potencia activa  $P$  (kW) y la potencia aparente  $S$  (kVA), este a su vez puede oscilar entre los valores de 0 y 1. De esta forma, se utiliza para reconocer el grado de potencia reactiva de diversos dispositivos utilizados.

La energía reactiva se considera una clase de energía eléctrica que es absorbida de la red por ciertos aparatos eléctricos, pero que es devuelta, por tanto, no significa gasto de energía, a pesar que debe generarse y transportarse al equipo.

Un FP de valor 1 dará como consecuencia un gasto de potencia reactiva nula (solo resistencia), en tanto que un FP con valor menor a 1 dará en consecuencia un gasto de potencia reactiva, que irá en aumento hasta que logre llegar a 0 (solo inductancia).

En un sistema eléctrico, el FP puede cambiar de una red hacia otra diferente todo depende de sus cargas que se encuentren instaladas y cómo se usan (carga completa, régimen de carga baja, etc.). Durante mucho tiempo, los dispositivos de medición muestran el consumo de energía activa y reactiva de manera más simple y precisa.

Aumentando el FP se logra optimizar el sistema eléctrico y se proporcionan ventajas tales como (Legrand, 2013):

- Se da una menor caída en la tensión que se encuentra al final de nuestra línea.
- Se genera una potencia adicional que se encuentra disponible en los transformadores, todo esto si realiza en la parte BT.
- Se reduce la pérdida por medio de los conductores puesto que la corriente transmitida a través de estos disminuye.
- Se logra reducir la potencia total, esta es dada en kVA.

- No existe una merma por esta energía reactiva.

## **2.2. Motores Eléctricos**

El motor es un equipo rotativo que se encarga de convertir energía de forma eléctrica a una energía de forma mecánica para producir movimiento. Alimentado por corriente eléctrica, este genera un movimiento alrededor de su eje de manera giratoria que, gracias a los vínculos mecánicos apropiados, se utiliza con el fin realizar diversas tareas en sectores tanto domésticos como industriales. En general, la operación y la puesta en marcha de motores eléctricos generalmente se manejan mediante sistemas de automatización eléctrica. Es por eso que necesitamos saber de antemano qué partes y diversas clases de motores se utilizan en el campo industrial y cómo están conectados.

### **2.2.1. Estructura**

#### **2.2.1.1. Partes Internas**

El motor, y a nivel general tenemos que los equipos eléctricos rotativos, están constituidos por dos fracciones bien diferenciadas, las cuales son: estator y rotor (Serrano & Martínez, 2017).

- **El estator:** Constituye la parte que permanece fija dentro del motor. Está constituido por una chapa magnética con ranuras (o también piezas polares), en las cuales se encuentra un devanado. Para realizar la conexión se procede desde la parte exterior utilizando la caja que contiene los bornes.
- **El rotor:** Constituye la parte móvil del motor y se encuentra en la parte interna del circuito magnético diseñado en el estator. Desde la parte exterior el eje es la única parte visible de este. A su vez el rotor puede encontrarse bobinado o no, todo depende de la clase de equipo eléctrico que se posea. Si se encuentra bobinado, las conexiones eléctricas se realizan a

través de la caja que contiene los bornes, mediante las escobillas, hacia el sistema de anillos rozantes o colector.

**Figura 6** Partes Internas del Motor Eléctrico



*Fuente: AC Motor Shaft*

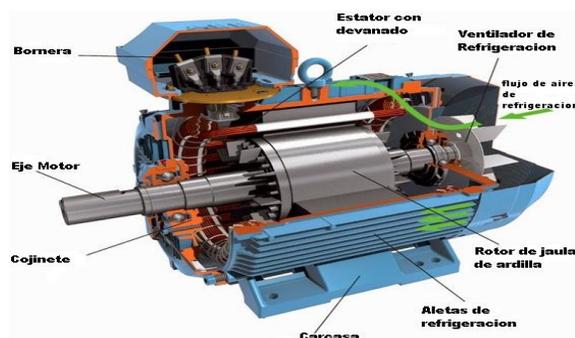
### 2.2.1.2. Partes Externas

Si nos fijamos en la parte externa de cualquier motor eléctrico, podremos notar partes importantes como (Serrano & Martínez, 2017):

- **Caja de Bornes:** A través de esta se realizan las conexiones del motor con el sistema que provee la energía eléctrica.
- **Placa de Características:** Esta placa hecha de aluminio es la que contiene estampadas las diversas características que resaltan del motor.
- **Eje:** Este objeto es el que se encarga de transmitir el movimiento del motor. Cuenta con una chaveta, esta permite acoplarse a la maquinaria para la cual va a ser utilizado.
- **Carcasa:** Es la que rodea la parte interna del motor, esto es, el circuito magnético y el eléctrico.
- **Tapa del Ventilador:** Esta cubre al sistema encargado de ventilar al motor. Cuenta con una rejilla con el objetivo de favorecer el desplazamiento del aire hacia afuera.

- **Base de Fijación:** Esta parte facilita la inserción del motor a un soporte que lo mantenga estable en el lugar donde será ubicado. Por lo general, cuenta con 4 ranuras para lograr su fijación y ajustarse usando tornillos.

*Figura 7 Partes Externas del Motor Eléctrico*



*Fuente: EcuRed – Motor Asíncrono*

### 2.2.2. Clasificación

De acuerdo al tipo de sistema utilizado para alimentar con corriente al motor, podemos clasificarlos en 2 clases: de corriente continua y de corriente alterna.

Por poseer una fácil conexión, poca necesidad de mantenimiento y bajos costos durante la fabricación, los motores de CA se usan más comúnmente hoy en día, dejando los motores de CC para aplicaciones más específicas.

De acuerdo al número de fases que posea la fuente que alimenta el circuito, el motor de CA puede ser monofásico y trifásico. Los monofásicos son suministrados mediante neutro y una fase y los trifásicos mediante tres fases. Los monofásicos son utilizados fundamentalmente en ambientes domésticos y los trifásicos son más usados en ambientes industriales.

Dentro de los motores que utilizan tres fases, pueden resaltarse dos clases dependiendo del tipo de devanado existente en el rotor: aquellos con jaula de ardilla y los que poseen rotor bobinado (conocido también como anillo deslizante). El primer tipo es utilizado principalmente en cualquier

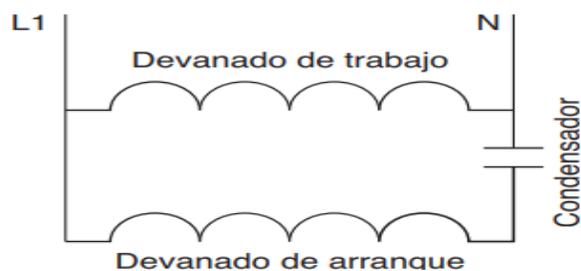
clase de aplicación y el segundo tipo por lo general para casos muchos más específicos como los que necesiten un par mucho más alto.

### 2.2.2.1. Motores Monofásicos

Estos motores tienen dos devanados en su parte interna, uno sirve para el arranque y el otro para trabajar. Por lo general, la caja de terminales de este tipo de motor tiene solo dos terminales, los cuales son conectados de manera directa entre neutro y fase desde la red eléctrica. Este motor cuenta con una sola dirección de giro y esta no puede variar a menos que la máquina sea desmontada, puesto que para realizar esto se tiene que modificar la polaridad de alguno de estos devanados (Serrano & Martínez, 2017).

Estos motores generalmente tienen un devanado de arranque conectado en serie, un condensador (exterior) o un interruptor centrífugo (interior).

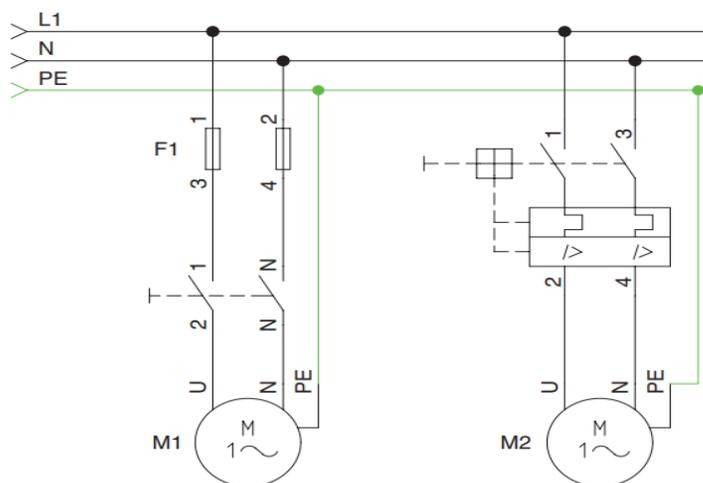
**Figura 8** Devanados de Motor Eléctrico Monofásico



*Fuente: Editores SRL – Motor Eléctrico Monofásico*

En la Fig. 9 se muestran dos maneras de realizar un arranque directo utilizando un motor monofásico. Al lado izquierdo, podemos observar el motor siendo alimentado a través de la red eléctrica utilizando un interruptor de dos polos, mientras que la función de protección la cumplen los fusibles. Al lado derecho, podemos observar que se utiliza el disyuntor bipolar para la parte de protección, pero también para conmutar la fuente que alimenta el sistema (Sandoval, 2015).

**Figura 9** Arranque Directo de Motor Monofásico

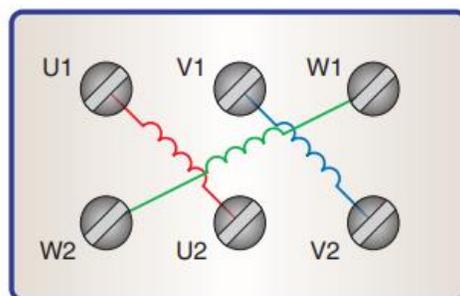


Fuente: *Automatismos Industriales* - Juan Carlos Martín y María Pilar García

### 2.2.2.2. Motores Trifásicos de Rotor en Jaula de Ardilla

Estos motores tienen tres devanados en su estator, cada fase cuenta con uno. Los devanados poseen dos terminales, uno al inicio y uno en su parte final, ambos dirigidos hacia la caja de terminales, que se conectan internamente como podemos observar en la Fig. 10.

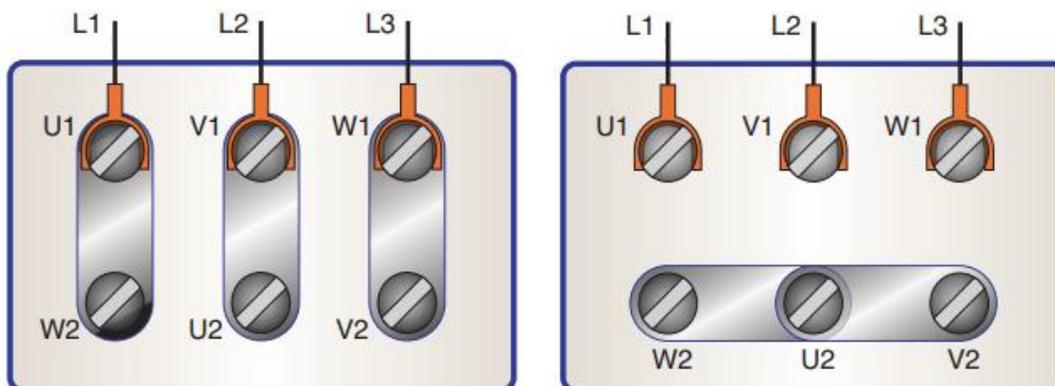
**Figura 10** Conexión Interna de Devanados



Fuente: *Revista Digital INESEM – Conexión y Arranque de los Motores Trifásicos*

La caja de bornes está compuesta por 6 terminales para el caso de un motor trifásico, estos pueden ser empalmados tal como podemos observar en la Fig. 11.

**Figura 11** Conexión en Triangulo y Conexión en Estrella

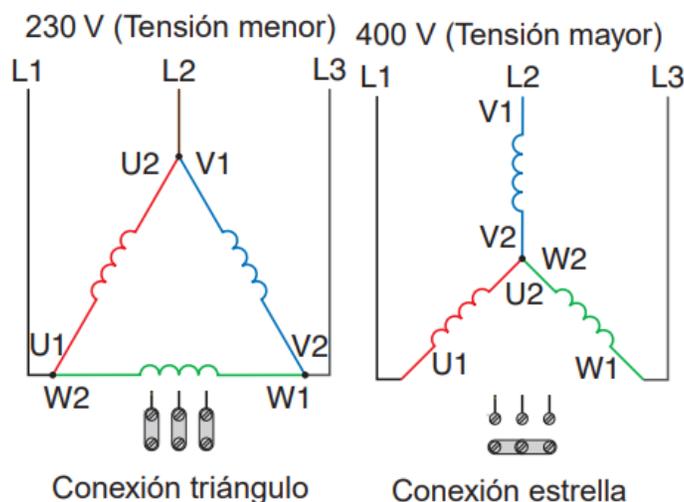


Fuente: Miguel Rodríguez – Arranque de Motores Eléctricos

La primera conexión se llama triángulo y se refiere al voltaje de funcionamiento más bajo que utiliza el motor. La conexión número dos se denomina estrella y corresponde al voltaje más alto.

Si, en el caso que la placa donde se observen las características del motor trifásico muestra que el voltaje nominal es de 230 V / 400 V, la conexión debe hacerse en un triángulo si está conectado a una red de suministro de 230 V. Sin embargo, si la red de suministro es de 400 V, los terminales deben conectarse en estrella (Guevara, 2010).

**Figura 12** Conexión de los Devanados del Motor Trifásico



Fuente: Automatismos Industriales - Juan Carlos Martín y María Pilar García

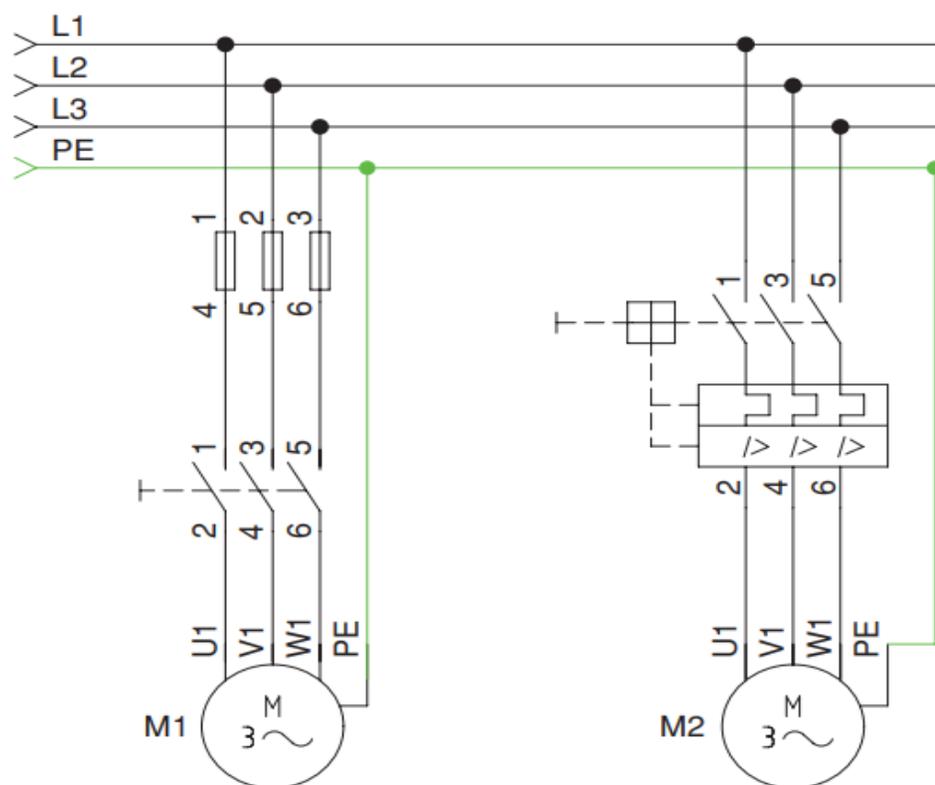
### 2.2.3. Tipos de Arranque

#### 2.2.3.1. Arranque Directo

Para motores que utilizan baja potencia, se puede realizar el arranque de manera directa utilizando el disyuntor tripolar, el cual permita el abre o cierre de las fases al mismo tiempo.

En el diagrama a la izquierda de la Fig. 13, el corte es realizado usando un interruptor de tres fases con control manual y se cuenta con protección ante cortocircuitos y sobrecargas, haciendo el uso de fusibles. Al lado derecho, el disyuntor tripolar es usado para realizar la protección y arranque (ABB, 2018).

**Figura 13** Arranque Directo de Motor Trifásico



Fuente: *Automatismos Industriales* - Juan Carlos Martín y María Pilar García

Si se usan solamente dos fases provenientes de la red eléctrica en un motor trifásico, se genera una sobrecorriente en las fases mencionadas y si permanece constante a través del tiempo, tiende a poner en peligro los devanados ubicados en la parte interna del motor, haciendo que estos se destruyan de manera irreparable en cuestión de segundos.

Si se para el motor y trata un arranque utilizando dos fases, emitirá un peculiar sonido, pero no arrancará. Por otro lado, cuando ocurre una falla en la fase mientras el motor se encuentra en funcionamiento, es probable que este siga funcionando, produciendo un sonido diferente al ordinario, hasta terminar de quemarse.

Se pueden encontrar diversos dispositivos a la venta que nos permiten detectar fallos en alguna de las fases, esto permite desconectar de manera eficaz el motor en uso de la red de energía.

**Figura 14** Relevador de Falta de Fase



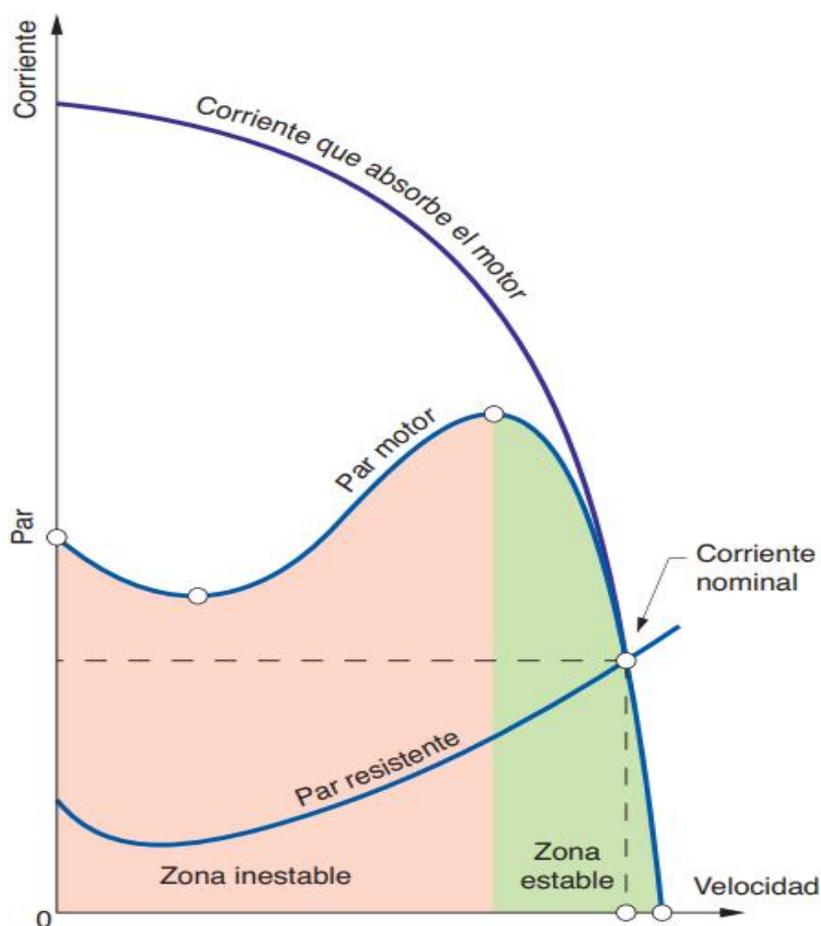
Fuente: Siemens

El momento de arrancar un motor de inducción es particularmente difícil porque la máquina debe superar el par de arrastre ejercido sobre su eje hasta alcanzar a la velocidad que opere de manera nominal. Si contamos con una carga demasiado grande, es posible que el motor no arranque.

Las empresas que fabrican motores a menudo representan esta característica utilizando la llamada curva Par-Velocidad. En esta se logra mostrar lo que pasa con el par mientras que el motor alcanza su velocidad nominal (Minem, 2014).

Observando la Fig. 15, se nota la parte inestable en la cual encontramos que el par varía a través de diversos valores. Para este punto, si nuestro par de arrastre es demasiado alto y se encuentra superior a la curva de par, el motor puede poseer problemas al arrancar. Tan pronto como se supera esta área variable, la máquina logra el valor de la velocidad nominal y funciona a condiciones regulares (Sandoval, 2015).

**Figura 15** Curva Par - Velocidad



Fuente: *Automatismos Industriales* - Juan Carlos Martín y María Pilar García

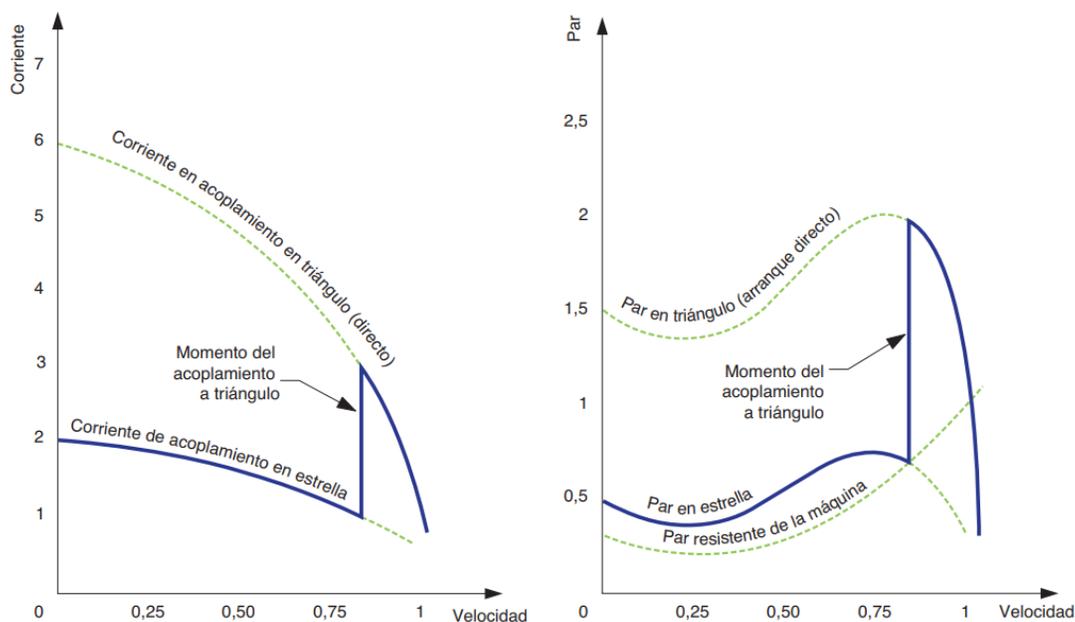
Si tenemos el motor usando plena carga y se supera el par de resistencia se genera una sobrecorriente, el valor de esta supera por mucho a la corriente nominal que posee el motor, esto es extremadamente dañino, para el equipo y para el sistema.

### 2.2.3.2. Arranque Estrella/Triángulo

Tenemos diferentes maneras de eludir sobrecorrientes al arrancar motores de tres fases con jaula de ardilla, sin embargo, el que más se utiliza, debido a su fácil implementación y su costo moderado, es al que se le conoce como arranque Y/ $\Delta$ .

El arranque en Y/ $\Delta$  comprende de dos ciclos para arrancar al motor. Para el primer caso, la cual ocurre durante la conversión en la red de energía, el motor trabaja a través de sus conexiones usando la forma de estrella y, por lo tanto, utiliza tres veces menos energía que en la operación nominal. La segunda vez, la cual ocurre cuando se llega a la velocidad nominal y a su corriente nominal de la máquina, la caja de terminales pasa al modo triángulo y funciona bajo condiciones normales de funcionamiento (Schneider Electric, 2012).

**Figura 16** Curvas Par - Velocidad y Corriente-Velocidad



Fuente: *Automatismos Industriales* - Juan Carlos Martín y María Pilar García

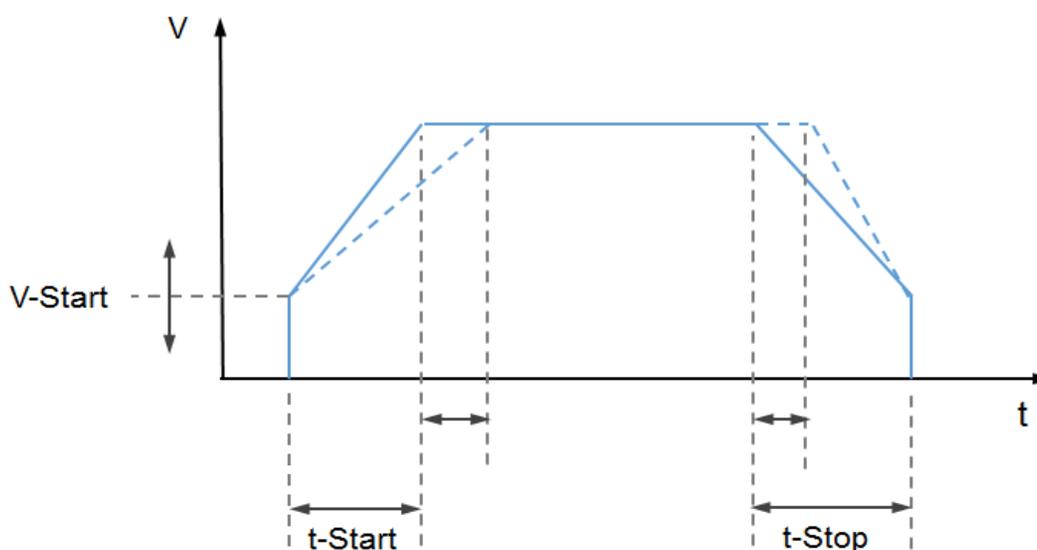
Existen diversas técnicas que permiten realizar un arranque Y/ $\Delta$ . A mayor potencia de motor, más será el nivel precisión cuando se conmuta entre Y- $\Delta$  y, por ende, el nivel de mecanización que tiene dicho circuito. Por otro lado, los sistemas de conmutación manual son mayormente utilizados para motores de baja potencia, ya que el uso de interruptores de levas en los cuadros de distribución está muy extendido (Serrano & Martínez, 2017).

### 2.2.3.3. Arrancador Suave o Soft Starter

La corriente para arrancar motores de inducción es muy alta, puede oscilar de 3 a 15 veces el valor de su corriente nominal. Si bien esto puede ser aceptable, es posible que cause daños en la alimentación y también en el motor, todo esto en un largo plazo.

El arrancador suave se encarga de controlar el voltaje de entrada efectivo que se le da al motor desde cero o en todo caso a algún valor al que sea configurado hasta que alcance el voltaje de trabajo nominal para arrancar y viceversa para parar. Cuando se regula el voltaje de alimentación, se controla la corriente usada para el arranque consumida tanto por el par que se genera y el motor (ABB, 2016).

**Figura 17** Curva de Arranque a Tensión Reducida



Fuente: Rockwell Automation – Arrancadores Suaves en Aplicaciones de Bombeo

Es muy fácil la manera en la que se conecta el arrancador suave, actualmente las principales marcas que fabrican arrancadores funcionan de la misma forma. Para arrancadores suaves de Siemens, ABB, Sirius, PSR, WEG SSW, Schneider AltiStart, o las demás marcas que los comercializan, es necesario seguir solamente tres pasos para realizar las conexiones de manera sencilla (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2010):

### **Conexiones en los bornes de alimentación**

Para este punto, el arrancador es conectado al voltaje de alimentación, este puede ser trifásico usando 230/380 V dependiendo de la tensión de alimentación del motor. Los terminales de alimentación suelen estar marcados mediante una terminología común: R/L1 - S/L2 - T/L3. Los terminales a la salida del arrancador suave también están conectados al motor. Por lo general, se muestran como: U / T1 - V / T2 - W / T3 (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2010).

**Figura 18** Bornes de Potencia del Arrancador Suave



*Fuente: Iguren – Cómo funciona un arrancador suave*

### **Conexión de los Accionamientos de Marcha y Paro**

Después de conectar los terminales de alimentación, es necesario cablear las unidades que permiten que funcione el arrancador. Contamos con diversas maneras y podemos hallar fácilmente en los manuales diversos diagramas eléctricos, los cuales sirven de guía (Perea, 2014).

Para el caso específico de un arrancador Siemens Sirius 3RW30, el arranque es obtenido al conectar neutro con la terminal A2 y la fase con su terminal A1 y la conexión del terminal 1 a la fase utilizando botones / interruptores de encendido / apagado (Perea, 2014).

**Figura 19** Bornes de Control del Arrancador Suave



Fuente: Siemens

### Configuración para el arranque

Para terminar, se necesita ajustar los parámetros importantes de arranque suave o parada. Para obtener esto, se debe usar los potenciómetros con los que cuenta el arrancador suave. El arrancador permite regular el arranque, así como la parada mediante el control básico de tres indicadores los cuales son el voltaje inicial para el arranque, el tiempo de la parada y el tiempo de arranque (Guevara, 2010).

**Figura 20** Configuración de Parámetros del Arrancador Suave



Fuente: ABB

### 2.2.3.1. Arranque con regulación de velocidad

El variador de velocidad electrónico se encuentra hecho a base de circuitos que poseen transistores de potencia, un ejemplo de esto es el IGBT, otro son los tiristores, cuyo funcionamiento base es el de convertir energía que usa una frecuencia a nivel industrial a una energía que posea frecuencia variable, obviamente hablando de energía eléctrica (ABB, 2018).

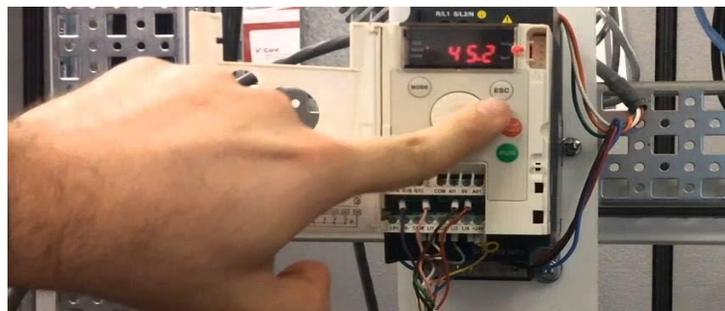
El modo operativo puede ser manual o automático, dependiendo de los requisitos del proceso, ya que los controladores de velocidad ofrecen una enorme flexibilidad. Por lo tanto, se pueden hallar métodos para alcanzar puntos óptimos de trabajo a lo largo de cualquier proceso, además que puedan ser administrados mediante alguna señal digital, un PLC o una computadora.

En su gran mayoría, las marcas incluyen protección del motor en el convertidor, como protección contra sobrecorriente, alta temperatura, falla a tierra, falla de desequilibrio, etc., también ofrecen procesos tanto para arranque como para frenado suave usando rampas de aceleración, esto logra una mayor vida útil no solo del motor, sino también de las instalaciones (ABB, 2018).

En tanto de la velocidad, los variadores pueden ser controlados de dos maneras (Sandoval, 2015):

**Control de velocidad en modo manual:** Para este caso la velocidad se puede modificar de manera manual a través del display de operador. Además, el sentido para el cual gira cuenta con la opción de variar.

*Figura 21 Control de Velocidad en Modo Manual*



*Fuente: Schneider Electric.*

**Control de velocidad en modo automático:** Al utilizar una realimentación se logra regular la velocidad de manera automática. Esta forma es la más adecuada en instalaciones que tienen aplicaciones donde la velocidad resulta ser un factor en constante cambio.

*Figura 22 Control de Velocidad en Modo Automático*



*Fuente: Ideas Capacitación – Programación de PLC Avanzado*

### 2.3. Variador de frecuencia

El variador de frecuencia (VFD) es un instrumento usado para regular el valor de la velocidad de rotación que posee un motor que se alimenta mediante corriente alterna (CA) regulando así la frecuencia de la fuente de energía que le es dada al motor. Son llamados también drivers de CA, micro drivers o drives de frecuencia ajustable (AFD) (ABB, 2016).

Existen diversas aplicaciones que las unidades pueden tener en diversas industrias y aplicaciones. Actualmente existe una amplia gama de variadores de frecuencia que ofrecen tecnología avanzada que adapta cada variador al proceso deseado por el cliente (ABB, 2016).

**Figura 23** Aplicaciones en la Industria de los VFD



Fuente: Schneider Electric

### 2.3.1. Principio de Funcionamiento

Los VFD trabajan teniendo en cuenta que, para un motor de CA, su velocidad síncrona se determina mediante la cantidad de polos que posee el estator y la frecuencia suministrada, todo esto se relaciona mediante (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2010):

$$RPM = \frac{f * 120}{p}$$

Dónde: RPM = revoluciones por minuto, f = frecuencia suministrada (Hertz), p = cantidad de polos.

El número de polos ampliamente usados para motores síncronos varían entre 2, 4, 6 y 8. Utilizando la ecuación definida anteriormente, obtenemos los siguientes resultados: 3600 RPM, 1800 RPM, 1200 RPM y 900 RPM respectivamente, todos estos valores usando 60 Hz de frecuencia (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2010).

Para motores asincrónicos, el número de revoluciones por cada minuto son un tanto más bajas debido a la asincronía misma. Para esta clase de motores existe un pequeño retraso entre la velocidad del campo magnético y la velocidad del rotor (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2010).

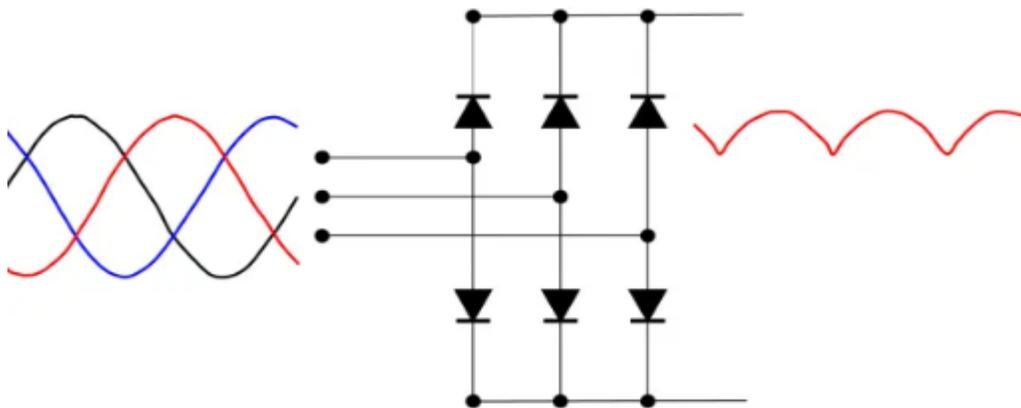
### 2.3.2. Etapas de Funcionamiento

Para que un variador de frecuencia pueda controlar el par, sentido al cual gira y la velocidad de un motor de tres fases asíncrono con rotor de jaula de ardilla, debe dividir su funcionamiento interno en tres etapas (Perea, 2014):

#### Rectificación de CA a CC

Inicialmente, la rectificación de la corriente alterna se realiza mediante un puente de diodos. La parte de corriente alterna es rectificada y convertida a corriente continua, sin embargo, la corriente continua contiene partes de corriente alterna y algunos armónicos restantes, por este motivo, se necesita de un mayor filtrado.

**Figura 24** Rectificador de Entrada

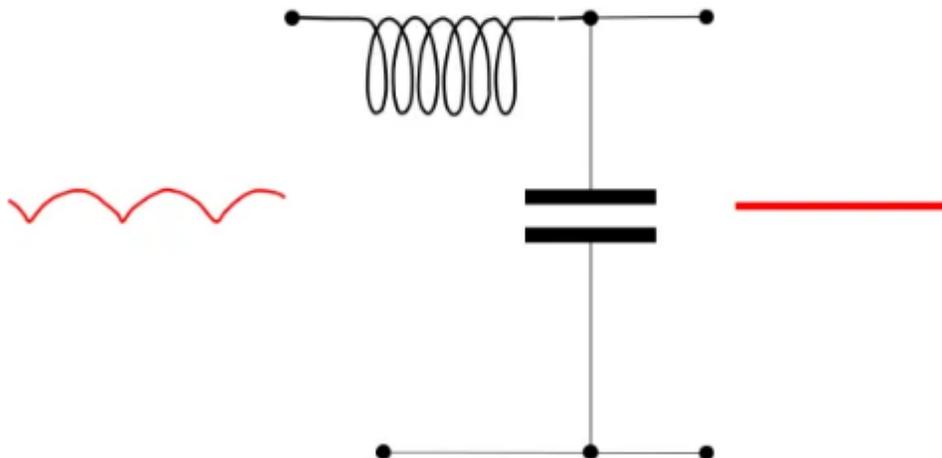


*Fuente: Formación para la Industria 4.0 – Funcionamiento de un Convertidor de Frecuencia*

#### Bus de corriente continua (Circuito Intermedio)

En esta parte la corriente continua que ha sido rectificada es filtrada del exceso de residuos de la parte alterna, para este propósito se usa condensadores e inductores. Es aquí donde la salida queda completamente purificada de ondulaciones, esto resulta beneficioso en motores de CA.

**Figura 25** Bus de CC Simplificado



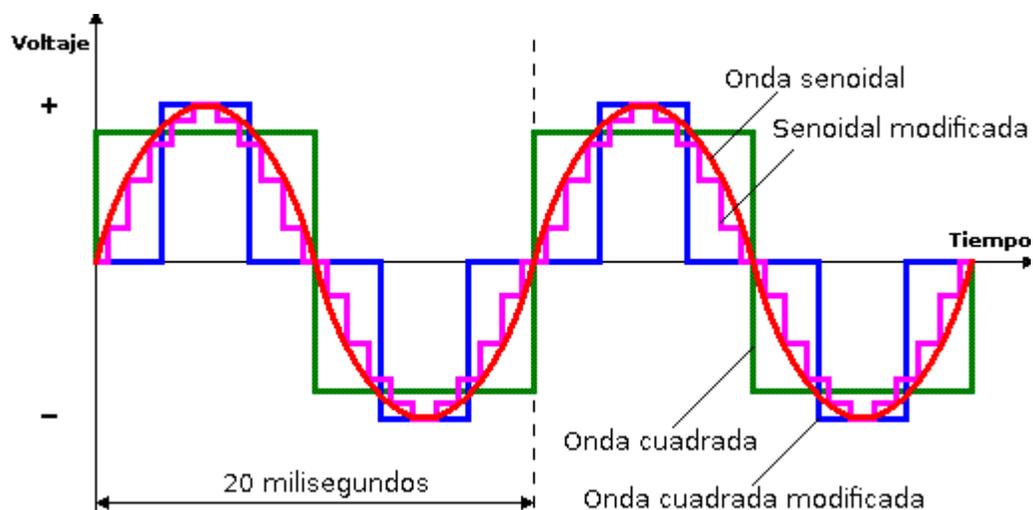
*Fuente: Formación para la Industria 4.0. – Funcionamiento de un Convertidor de Frecuencia*

### **Inversor**

Esta parte se encarga de transformar la corriente continua del circuito intermedio en corriente alterna, esto se realiza de una forma singular la cual es la parte principal de todo el circuito. Está hecho a base de circuitos integrados muy sofisticados que han sido particularmente diseñados y programados para variar proporcionalmente la frecuencia de salida, así como la tensión y también para de una entrada monofásica generar una salida trifásica. Este nivel conlleva a que el convertidor de velocidad variable sea particularmente ideal e único para manejar la velocidad en motores de CA.

Los chips integrados utilizan la tecnología de modulación por ancho de pulso y generan ondas sinusoidales usando corriente continua. Mientras más grande el tiempo a la cual conmutan estas ondas generadas, obtendremos una tensión de salida mayor en el motor y de manera inversa. Esta etapa se encarga de dos funciones primordiales, una consiste en variar la salida de tensión sin pérdida de corriente y la otra de cambiar la frecuencia a una determinada velocidad al mismo tiempo, con el fin de obtener un flujo magnético y par constantes.

**Figura 26 PWM**



*Fuente: Instrumentación y Control NET. – Tipos de Variadores de Frecuencia*

### **2.3.3. Beneficios**

Los VFD son muy usados en el control de bombas, ventiladores y compresores, tan solo estos usos representan el 75% del total de aplicaciones a los que son sometidos a nivel global. Los VFD son utilizados para (Comisión Nacional de Energía Eléctrica, 2010):

#### **Disminuir el gasto energético y los costos energéticos**

Si tenemos un sistema el cual no requiere utilizar toda su velocidad, podemos disminuir los costos de energía teniendo un control del motor utilizando un convertidor de frecuencia. Al mismo tiempo, nos permite adaptar el valor de velocidad al equipo teniendo en cuenta el valor de la carga. No existe una manera diferente de controlar motores de CA que pueda hacer esto.

En la industria moderna, muchas de las aplicaciones de motores son las que demandan un aproximado de 65% del gasto de energía e incluso más. Al optimizar el sistema de control para un motor a través del montaje o cambio de variadores, el gasto de energía dentro de las plantas a nivel

industrial puede disminuirse en un 70%. Por otro lado, el uso de estos aumenta la calidad del artefacto y disminuye costos destinados a producción.

### **Aumentar el nivel de producción mediante un control más estricto en el proceso**

Cuando se opera un motor a una velocidad eficiente acorde a su aplicación, los errores disminuyen esto conlleva a que aumente el grado de producción, a su vez, esto genera más ingresos en las compañías. Por ejemplo, las cintas transportadoras suprimen las sacudidas cuando arrancan, esto da como resultado una eficacia mucho mayor.

### **Extender la vida útil del equipo y disminuir el mantenimiento**

El dispositivo no posee mucho tiempo en estado inactivo y dura mucho más a causa del mantenimiento cuando el control se realiza mediante VDF, esto nos da una garantía en la velocidad óptima que se aplica al motor. Como consecuencia del control óptimo para la tensión y frecuencia del motor, se obtiene una protección mucho mayor contra sobrevoltaje, sobrecargas electrotérmicas, subvoltaje, protección de fase, etc.

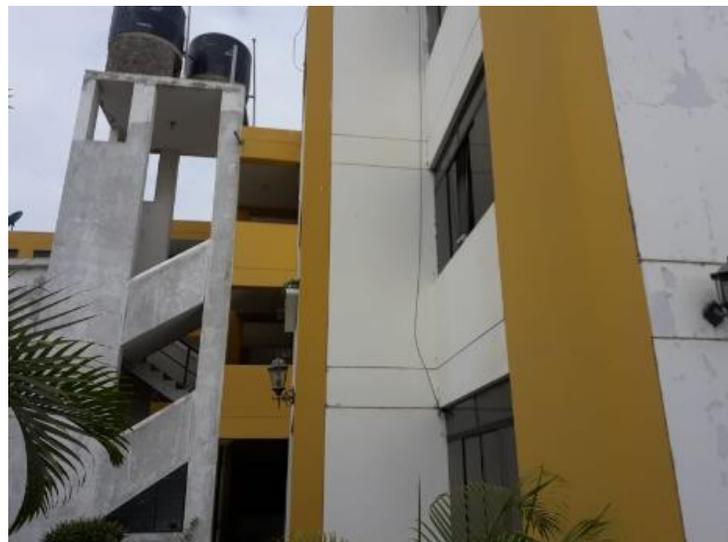
## **CAPÍTULO III**

### **ESTUDIO TÉCNICO – ECONÓMICO**

#### **3.1. Estudio Técnico**

En este capítulo se aplicará la metodología para determinar la viabilidad de la aplicación de variadores de frecuencia en el arranque de motores en sistemas de bombeo residencial. Para lograrlo, se realizará un estudio técnico-económico de ahorro de energía y eficiencia energética, que contemplará la implementación de un prototipo para controlar una bomba centrífuga de 3 HP con arranque directo y con tres variadores de frecuencia de diferente marca: Schneider Electric, Siemens y Delta. Como caso de estudio se tomará el sistema de bombeo que abastece a 12 familias del Bloque B de la residencial San Pedro formada por tres pisos, ubicada en la dirección Ca. 2 de mayo #321 en la región Lambayeque. El estudio técnico contemplará las visitas de campo a la residencial para determinar el estado del sistema de bombeo, la cantidad de viviendas y miembros por familia, teniendo en cuenta que la cantidad mínima de agua que utiliza una persona para cumplir sus necesidades básicas tanto de higiene como de consumo son de aproximadamente 100 litros, según lo señala OMS. El estudio técnico también abarcará las pruebas realizadas en el prototipo para determinar cuál de los variadores de frecuencia utilizados ofrece el mejor rendimiento y el menor consumo de energía. Por su parte, el estudio económico será útil para determinar los costos por adquisición e instalación del variador de frecuencia y el retorno de inversión. De esta manera se demostrará que es más eficiente adaptar el valor de velocidad en motores eléctricos de acuerdo a los requisitos de la aplicación o proceso y, como consecuencia de esto, se reduce el consumo de energía, lo cual, a su vez, mejora la eficiencia energética y reduce el consumo de energía del motor.

**Figura 27** Bloques de Residencial San Pedro



*Fuente: Residencial San Pedro*

### **3.1.1. Abastecimiento de Agua**

Como se ha mencionado antes, la residencial San Pedro está formada por tres pisos, cuenta con siete viviendas en cada piso divididos en dos Bloques (A y B), dónde tres viviendas pertenecen al Bloque A y cuatro viviendas pertenecen al Bloque B. Es decir, nueve viviendas pertenecen al Bloque A y 12 pertenecen al Bloque B.

El abastecimiento de agua se realiza mediante el sistema de bombeo que funciona con arranque directo y con cuatro tanques de 2500 litros, dos tanques para cada bloque. El agua se obtiene de un pozo de 2 m de profundidad.

**Figura 28** *Tanques de Abastecimiento de Agua*



*Fuente: Residencial San Pedro*

A continuación, se muestran las características del sistema de bombeo y de los tanques de abastecimiento de agua del Bloque B.

**Figura 29** *Bombas de Abastecimiento de Agua*



*Fuente: Pedrollo*

**Figura 30** Características de Bombas de Abastecimiento de Agua

MODELO		POTENCIA (P <sub>2</sub> )			Q	H metros															
Monofásica	Trifásica	kW	HP	▲		m <sup>3</sup> /h	0	0.6	1.2	2.4	3.6	4.8	5.4	6.0	6.6	7.2	7.8	9.0	9.6		
						l/min	0	10	20	40	60	80	90	100	110	120	130	150	160		
CPm 600	CP 600	0.37	0.50	IE2		22	21	20	18	15	11										
CPm 610	CP 610	0.60	0.85			28.5	28	27	25	22	19	17									
CPm 620	CP 620	0.75	1			35	34	33	31	28.5	25.5	23.5	21								
CPm 650	CP 650	1.1	1.5			40	-	39	38	36	33.1	31.2	28.8	26							
CPm 660	CP 660	1.5	2			48	-	47.5	46	44	41	39.5	37.5	35	32						
<b>CPm 670</b>	<b>CP 670</b>	<b>2.2</b>	<b>3</b>	<b>IE3</b>		<b>56</b>	<b>-</b>	<b>55.5</b>	<b>54.5</b>	<b>52.5</b>	<b>50</b>	<b>48.5</b>	<b>46.5</b>	<b>44</b>	<b>41.5</b>	<b>38</b>					
CPm 650M	CP 650M	1.1	1.5			33	-	-	32	31	30	29	28	26.5	25	23	19				
CPm 660M	CP 660M	1.5	2			44	-	-	43	42	40	39	38	37	35.5	34	29.5	27			
CPm 670M	CP 670M	2.2	3			53	-	-	52	51	49.5	48.5	47.5	46.5	45	43.5	39	36			

Q = Caudal H = Altura manométrica total HS = Altura de aspiración

Tolerancia de las curvas de prestación según EN ISO9906 Grado 3B.

▲ Clase de rendimiento del motor trifásico (IEC 60034-30-1)

Fuente: Pedrollo

**Figura 31** Características de Tanques de Abastecimiento de Agua



Capacidad	Altura	Diámetro	Personas
350 L <sup>2</sup>	1.052 m	0.716 m	2
600 L	1.11 m	0.969 m	4
1100 L	1.42 m	1.082 m	7
<b>2500 L</b>	<b>1.62 m</b>	<b>1.52 m</b>	<b>15</b>

Fuente: eternit

### 3.1.2. Consumo de Agua Bloque B

Para calcular el consumo de agua por familia, se tendrá en cuenta que una persona necesita como mínimo 100 l/día, de acuerdo con la OMS. Entonces, para una familia formada por cuatro miembros (número máximo de miembros por familia en Bloque B) el consumo diario será: de 400 l/día.

$$Q_{familia} = Q_{persona} \times N_{miembros}$$

$$Q_{familia} = 100 \text{ l/día} \times 4 = 400 \text{ l/día} = 16,67 \text{ l/h}$$

Ahora que conocemos el consumo total por familia, calcularemos el consumo total del Bloque B asumiendo que las familias restantes también tienen un consumo de 400 l/día.

$$Q_{BloqueB} = Q_{familia} \times N_{familia}$$

$$Q_{familia} = 16,67 \text{ l/h} \times 12 = 200,04 \text{ l/h}$$

### 3.1.3. Cálculo de Tiempo de Vaciado de Tanques

Para calcular el tiempo que demora en vaciarse el tanque, asumiremos que el consumo total del Bloque B se reduce en un 90%, esto debido a que es poco probable que todas las familias consuman agua al mismo tiempo, además no todos los miembros de la familia están presentes durante gran parte del día.

Ahora que conocemos el consumo total por familia, calcularemos el tiempo que demoran en vaciarse los tanques del Bloque B.

$$Q_{BloqueB} = V_{tanque} / T_{vaciado}$$

$$T_{vaciado} = V_{tanque} / Q_{BloqueB}$$

$$T_{vaciado} = 5000 \text{ l} / 180,036 \text{ l/h}$$

$$T_{vaciado} \approx 27,77 \text{ h}$$

### 3.1.4. Cálculo de Tiempo de Llenado de Tanques

Como se observa en la Fig. 30, el caudal para una altura 38 m de cada bomba es de 130 l/min, sin embargo, se recomienda restar el 20% por tema de antigüedad del sistema de bombeo. Conociendo el caudal y el volumen, podemos calcular el tiempo que demora en llenarse el tanque de la siguiente manera:

$$Q_{bomba} = V_{tanque} / T_{llenado}$$

$$T_{llenado} = V_{tanque} / Q_{bomba}$$

$$T_{llenado} = 2500 \text{ l} / 104 \text{ l/min}$$

$$T_{llenado} \approx 24 \text{ min}$$

### 3.1.5. Cálculo del Tiempo de Operación de las Bombas

**Tabla 2** Días y Tiempo de Operación de la Bomba

Horas	Estado Tanque	Estado Bomba	Tiempo Encendido
0	Vacío	Encendida	24 min
0.4	Lleno	Apagada	-
28.17	Vacío	Encendida	24 min
28.57	Lleno	Apagada	-
56.34	Vacío	Encendida	24 min
56.74	Lleno	Apagada	-
84.51	Vacío	Encendida	24 min
84.91	Lleno	Apagada	-
112.68	Vacío	Encendida	24 min
113.08	Lleno	Apagada	-
140.85	Vacío	Encendida	24 min
141.25	Lleno	Apagada	-
169.02	Vacío	Encendida	24 min
169.42	Lleno	Apagada	-
197.19	Vacío	Encendida	24 min
197.59	Lleno	Apagada	-
225.36	Vacío	Encendida	24 min
225.76	Lleno	Apagada	-
253.53	Vacío	Encendida	24 min
253.93	Lleno	Apagada	-

281.7	Vacío	Encendida	24 min
282.1	Lleno	Apagada	-
309.87	Vacío	Encendida	24 min
310.27	Lleno	Apagada	-
338.04	Vacío	Encendida	24 min
338.44	Lleno	Apagada	-
366.21	Vacío	Encendida	24 min
366.61	Lleno	Apagada	-
394.38	Vacío	Encendida	24 min
394.78	Lleno	Apagada	-
422.55	Vacío	Encendida	24 min
422.95	Lleno	Apagada	-
450.72	Vacío	Encendida	24 min
451.12	Lleno	Apagada	-
478.89	Vacío	Encendida	24 min
479.29	Lleno	Apagada	-
507.06	Vacío	Encendida	24 min
507.46	Lleno	Apagada	-
535.23	Vacío	Encendida	24 min
535.63	Lleno	Apagada	-
563.4	Vacío	Encendida	24 min
563.8	Lleno	Apagada	-
591.57	Vacío	Encendida	24 min
591.97	Lleno	Apagada	-
619.74	Vacío	Encendida	24 min
620.14	Lleno	Apagada	-
647.91	Vacío	Encendida	24 min
648.31	Lleno	Apagada	-
676.08	Vacío	Encendida	24 min
676.48	Lleno	Apagada	-
704.25	Vacío	Encendida	24 min
704.65	Lleno	Apagada	-
732.42	Vacío	Encendida	24 min

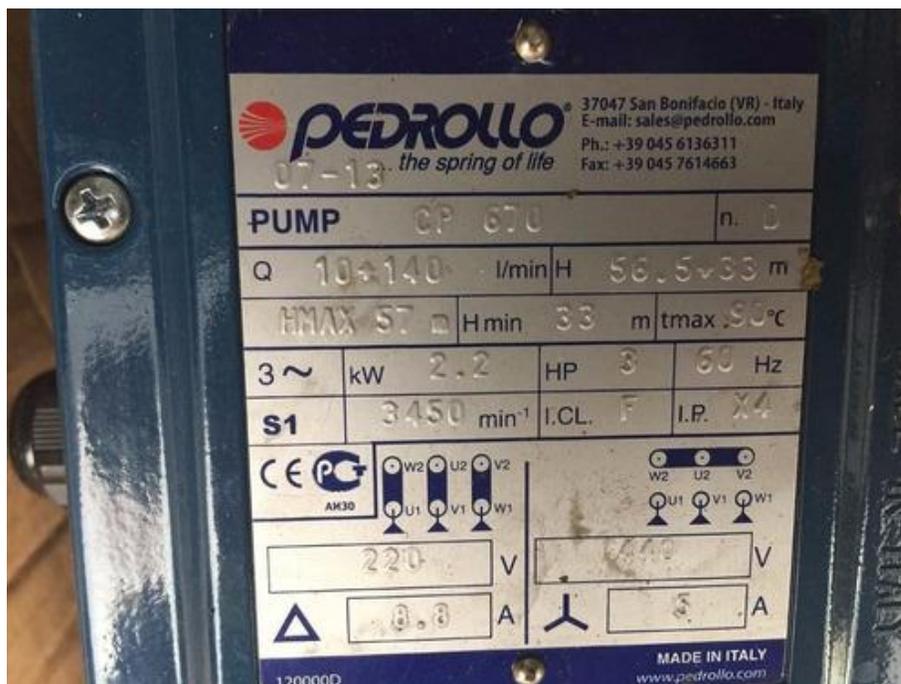
*Fuente: Elaboración propia*

De la Tabla 2 podemos concluir que las bombas estarán encendidas 27 veces al mes haciendo un total de 10,8 horas aproximadamente de operación.

### 3.1.6. Cálculo de Energía Consumida a Velocidad Constante

En la Fig. 32 se muestran la placa de características eléctricas de las bombas.

**Figura 32** Características Eléctricas de Bombas de Abastecimiento de Agua



Fuente: Pedrollo

Utilizaremos la siguiente fórmula para calcular la energía consumida al mes:

$$\text{Energía} = \text{Potencia (kW)} \times \text{Horas (h)}$$

$$\text{Energía} = 2,2 \text{ kW} \times 10,8 \text{ h} = 23,76 \text{ kW/h}$$

Se considera que este tipo de arranque tiene una eficiencia del 60% aproximadamente, por lo tanto:

$$\text{Energía} = 23,76 \text{ kW/h} / 0,6 = 39,6 \text{ kW/h}$$

La energía consumida por las dos bombas al mes será:

$$\text{Energía Total} = 39,6 \text{ kW/h} \times 2 = 79,2 \text{ kW/h}$$

Para hallar el pago mensual y anual a realizar debemos conocer el pago por kW/h en el país:

Perú precios de la electricidad	Casa, kWh
Peruvian New Sol	0.728

$$\text{Costo Mensual} = 79,2 \text{ kW/h} \times 0,728 \text{ S//kW/h} = \text{S/ } 57,66$$

$$\text{Costo Anual} = \text{S/ } 57,66 \times 12 = \text{S/ } 691,92$$

### 3.1.7. *Calculo de Energía a Velocidad Variable*

#### **Variador ATV32:**

De acuerdo Schneider Electric, la eficiencia de los variadores de velocidad ATV32 cambia en función del estado de carga. El fabricante muestra en la tabla adjunta las eficiencias para los estados de carga del 50%, 70% y 100%.

**Figura 33** VFD ATV 32



*Fuente: Schneider Electric*

**Tabla 3** Eficiencia de Variadores de Frecuencia ATV32

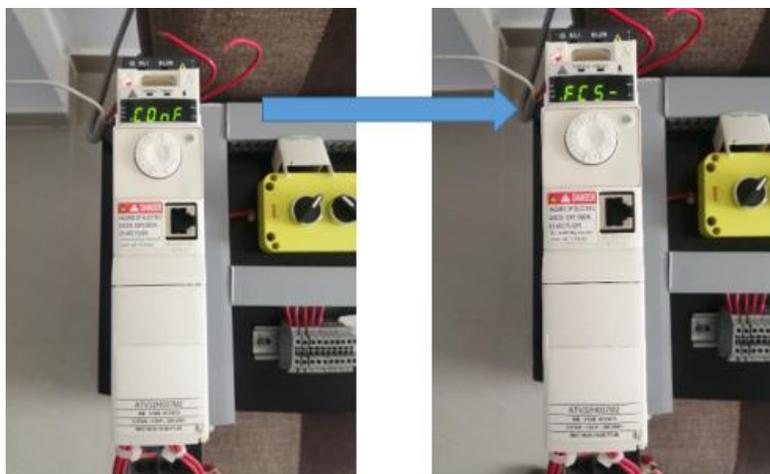
Voltage 200-240	Calibre (kW) rating	Watt			Rendement (Fonction du taux de charge) Efficiency (function of load)		
		Ptotale (en Fonction du taux de charge) loss (function of the load)			Efficiency (function of load)		
		100%	70%	50%	100%	70%	50%
	0.37	46	39	34	88.9%	86.9%	84.4%
	0.75	66	53	44	91.9%	90.9%	89.5%
	1.5	101	78	62	93.7%	93.1%	92.4%
	2.2	122	94	75	94.7%	94.2%	93.6%
	3	154	115	89	95.1%	94.8%	94.4%
	4	191	141	108	95.4%	95.2%	94.9%
	5.5	293	216	163	94.9%	94.7%	94.4%
	7.5	363	265	199	95.4%	95.2%	95.0%
	11	566	404	296	95.1%	95.0%	94.9%
	15	620	441	322	96.0%	96.0%	95.9%
	18.5	799	605	463	95.9%	95.5%	95.2%
	22	865	638	489	96.2%	96.0%	95.7%

Fuente: Schneider Electric

Antes de configurar la unidad, se recomienda realizar una configuración de fábrica. Ir a:

- **[CONFIGURATION] (CO nF)**
- **[FACTORY SETTINGS] (FCS-)**

**Figura 34** Configuración de Fábrica de ATV32

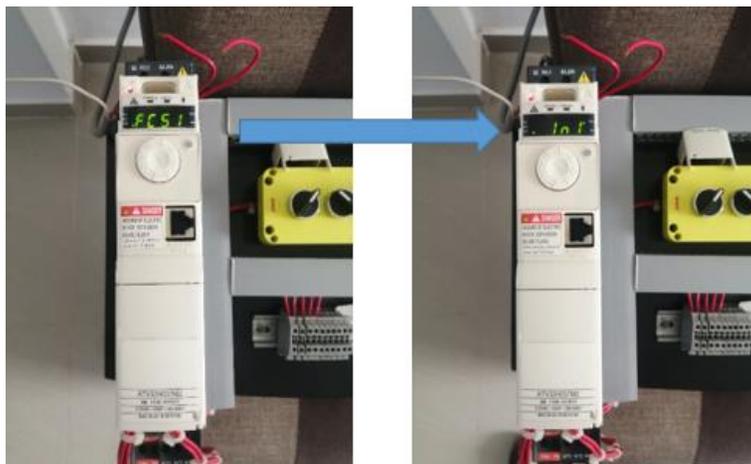


Fuente: Elaboración propia

Luego configurar los siguientes parámetros:

- **[Config. Source]** (FCSI) = **[Macro-Conf]** (InI)

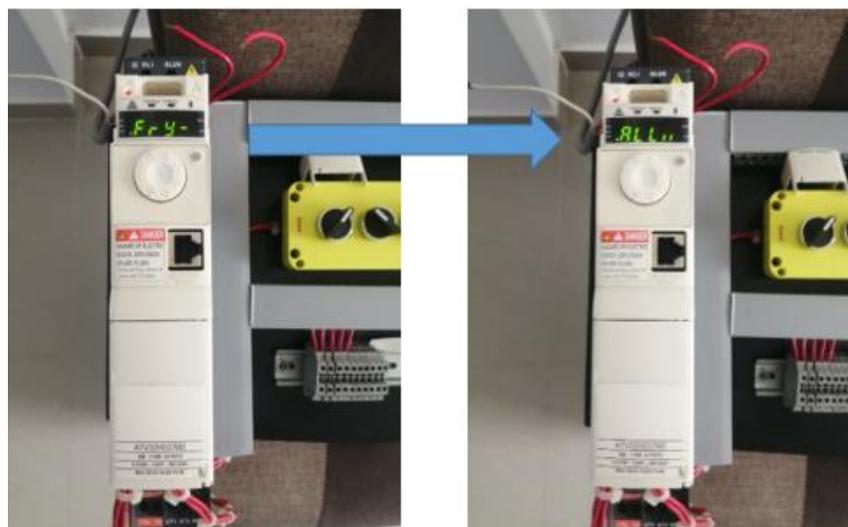
*Figura 35* Parámetro FCSI de ATV32



*Fuente: Elaboración propia*

- **[PARAMETER GROUP LIST]** (FrY-) = **[All]** (All)

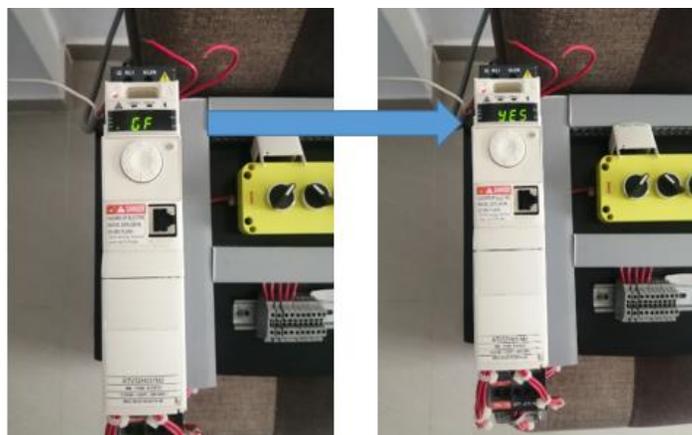
*Figura 36* Parámetro FrY de ATV32



*Fuente: Elaboración propia*

- [Goto FACTORY SETTINGS] (GFS) = [Yes] (Yes)

**Figura 37** Parámetro GFS de ATV32

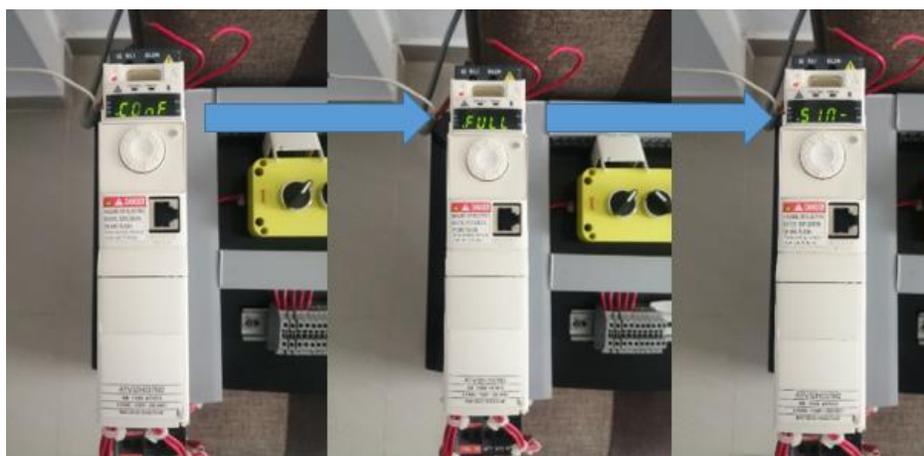


Fuente: Elaboración propia

Luego, seguir la siguiente ruta para modificar los parámetros preajustados de fábrica de acuerdo a la placa de características la bomba:

- [CONFIGURATION] (ConF)
- [FULL] (FULL)
- [ARRANQUE RÁPIDO] (Sin-)

**Figura 38** Configuration de Arranque Rápido de ATV32



Fuente: Elaboración propia

Luego configurar los siguientes parámetros:

**Tabla 4** Eficiencia de Variadores de Frecuencia ATV32

Código	Descripción	Modificación
bFr	[Standar mot. freq]	
nPr	[Rated motor power]	
UnS	[Rated motor volt.]	
NCr	[Rated mot. current]	

FrS	[Rated motor freq.]	 A digital display on a control panel showing the value '60'. The display is green and located on a white panel with a rotary knob below it. A red 'DANGER' warning label is visible below the display.
Nsp	[Rated motor speed]	 A digital display on a control panel showing the value '3450'. The display is green and located on a white panel with a rotary knob below it. A red 'DANGER' warning label is visible below the display.
ItH	[I Térmica motor]	 A digital display on a control panel showing the value '8.8'. The display is green and located on a white panel with a rotary knob below it. A red 'DANGER' warning label is visible below the display.
ACC	[Rampa aceleración]	 A digital display on a control panel showing the value '3.0'. The display is green and located on a white panel with a rotary knob below it. A red 'DANGER' warning label is visible below the display.
Dec	[Rampa deceleración]	 A digital display on a control panel showing the value '3.0'. The display is green and located on a white panel with a rotary knob below it. A red 'DANGER' warning label is visible below the display.

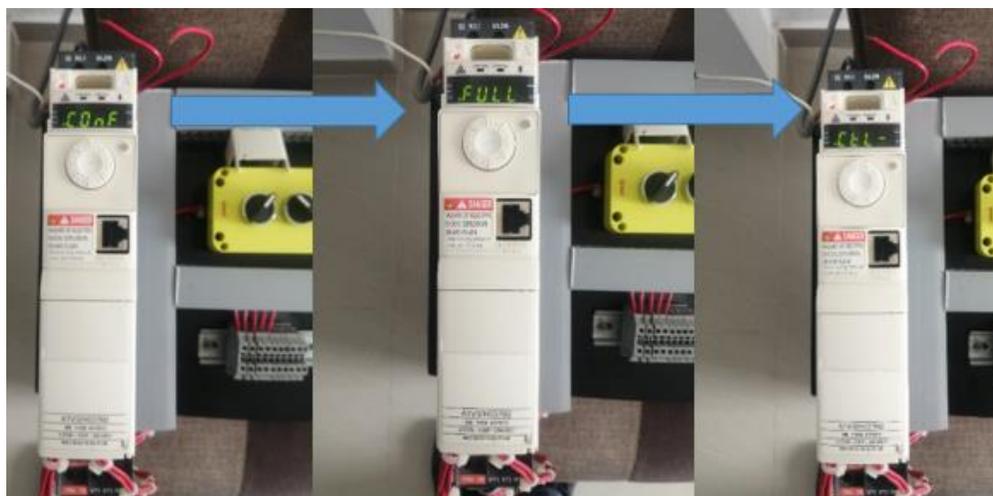
LSP	[Velocidad Mínima]	
HSP	[Velocidad Máxima]	

Fuente: Elaboración propia

Referencia y orden de marcha:

- [CONFIGURACIÓN] (ConF)
- [FULL] (FULL)
- [CONTROL] (Ctl-)

**Figura 39** Referencia y Orden de Marcha de ATV32



Fuente: Elaboración propia

Luego configure los siguientes parámetros:

**Tabla 5** Eficiencia de Variadores de Frecuencia ATV32

Código	Descripción	Modificación	Foto
Fr1	[Ref. Frecuencia]	[Potenciómetro] (AI1)	
CHCF	[Perfil]	[Separado] (SEP)	
Cd1	[Canal de Control 1]	[Terminales] (tEr)	

Fuente: Elaboración propia

Para calcular la potencia requerida para las condiciones de carga, emplearemos la siguiente formula:

$$HP_2 = \frac{HP_1 \times \left(\frac{N_1 \times Q_2}{Q_1}\right)^3}{(N_1)^3}$$

Dónde:

N1 = Velocidad nominal en RPM

Q1 = Caudal nominal en l/min

HP1 = Potencia nominal en HP

Q2 = Caudal requerido en l/min

HP2 = Potencia requerida en HP

### **Cálculo de energía consumida al 50%**

Primero calculamos la potencia:

$$HP_2 = \frac{HP_1 \times \left(\frac{N_1 \times Q_2}{Q_1}\right)^3}{N_1^3}$$

$$HP_2 = \frac{3 \times \left(\frac{3450 \times 52}{104}\right)^3}{3450^3}$$

$$HP_2 = 0,375 \text{ HP}$$

Luego se convierte a kW:

$$Potencia_{50\%} = 0,375 \text{ HP} \times 0,746 \text{ kW/HP} = 0,28 \text{ kW}$$

Cuando se realizó la prueba real bajo estas condiciones de carga se obtuvo una potencia de 0,3 kW como se muestra en la Fig. 40.

**Figura 40** Prueba al 50% con el ATV32



Fuente: Elaboración propia

La potencia calculada se ve afectada por la eficiencia del variador:

$$Potencia_{50\%} = 0,3 \text{ kW} / 0,936 = 0,32 \text{ kW}$$

Ahora se calcula la energía: Se debe tener en cuenta que al reducir al 50% el caudal, el nuevo tiempo de actividad de la bomba al mes será de 21,6 h.

$$Energía_{50\%} = 0,32 \text{ kW} \times 21,6 \text{ h} = 6,912 \text{ kW/h}$$

La energía consumida por las dos bombas será:

$$Energía_{50\%} = 6,912 \text{ kW/h} \times 2 = 13,824 \text{ kW/h}$$

Para hallar el pago mensual y anual a realizar debemos conocer el pago por kW/h en el país

Perú precios de la electricidad	Casa, kWh
Peruvian New Sol	0.728

$$Costo \text{ Mensual} = 13,824 \text{ kW/h} \times 0,728 \text{ S//kW/h} = \text{S/ } 10,063$$

$$Costo \text{ Anual} = \text{S/ } 10,063 \times 12 = \text{S/ } 120,756$$

### Cálculo de energía consumida al 70%

Primero calculamos la potencia:

$$HP2 = \frac{HP1 \times \left(\frac{N1 \times Q2}{Q1}\right)^3}{N1^3}$$

$$HP2 = \frac{3 \times \left(\frac{3450 \times 72,8}{104}\right)^3}{3450^3}$$

$$HP2 = 1,03 \text{ HP}$$

Luego se convierte a kW:

$$\text{Potencia}_{70\%} = 1,03 \text{ HP} \times 0,746 \text{ kW/HP} = 0,77 \text{ kW}$$

Cuando se realizó la prueba real bajo estas condiciones de carga se obtuvo una potencia de 0,8 kW como observamos en la Fig. 41.

**Figura 41** Prueba al 70% con el ATV32



Fuente: Elaboración propia

La potencia calculada se ve afectada por la eficiencia del variador:

$$\text{Potencia}_{70\%} = 0,8 \text{ kW} / 0,942 = 0,85 \text{ kW}$$

Ahora se calcula la energía: Se debe tener en cuenta que al reducir al 70% el caudal, el nuevo tiempo de actividad de la bomba al mes será de 15,43 h.

$$Energía_{70\%} = 0,85 \text{ kW} \times 15,43 \text{ h} = 13,12 \text{ kW/h}$$

La energía consumida por las dos bombas será:

$$Energía_{70\%} = 13,12 \text{ kW/h} \times 2 = 26,24 \text{ kW/h}$$

Para hallar el pago mensual y anual a realizar debemos conocer el pago por kW/h en el país

Perú precios de la electricidad	Casa, kWh
Peruvian New Sol	0.728

$$Costo \text{ Mensual} = 26,24 \text{ kW/h} \times 0,728 \text{ S//kW/h} = \text{S/ } 19,10$$

$$Costo \text{ Anual} = \text{S/ } 19,10 \times 12 = \text{S/ } 229,20$$

### Cálculo de energía consumida al 100%

Primero calculamos la potencia:

$$HP2 = \frac{HP1 \times \left(\frac{N1 \times Q2}{Q1}\right)^3}{N1^3}$$

$$HP2 = \frac{3 \times \left(\frac{3450 \times 104}{104}\right)^3}{3450^3}$$

$$HP2 = 3 \text{ HP}$$

Luego se convierte a kW:

$$Potencia_{100\%} = 3 \text{ HP} \times 0,746 \text{ kW/HP} = 2,23 \text{ kW}$$

Cuando se realizó la prueba real bajo estas condiciones de carga se obtuvo una potencia de 2,2 kW como observamos en la Fig. 42.

**Figura 42** Prueba al 100% con el ATV32



Fuente: Elaboración propia

La potencia calculada se ve afectada por la eficiencia del variador:

$$Potencia_{100\%} = 2,2 \text{ kW} / 0,947 = 2,323 \text{ kW}$$

Ahora se calcula la energía: Se debe tener en cuenta que al trabajar con el 100% del caudal, el tiempo de actividad de la bomba al mes será de 10,8 h.

$$Energía_{100\%} = 2,323 \text{ kW} \times 10,8 \text{ h} = 25,088 \text{ kW/h}$$

La energía consumida por las dos bombas será:

$$Energía_{100\%} = 25,088 \text{ kW/h} \times 2 = 50,176 \text{ kW/h}$$

Para hallar el pago mensual y anual a realizar debemos conocer el pago por kW/h en el país

Perú precios de la electricidad	Casa, kWh
Peruvian New Sol	0.728

$$Costo \text{ Mensual} = 50,176 \text{ kW/h} \times 0,728 \text{ S/kW/h} = \text{S/ } 36,528$$

$$Costo \text{ Anual} = \text{S/ } 36,528 \times 12 = \text{S/ } 438,336$$

## SINAMICS V20:

La eficiencia de los variadores de velocidad SINAMICS cambia en función del estado de carga. Sin embargo, se considera que la eficiencia promedio de este variador de velocidad es de 98%.

**Figura 43** VFD SINAMICS V20



Fuente: Siemens

Se procede a configurar la unidad tal como recomienda el fabricante:

**Figura 44** Configuración de SINAMICS V20

Parámetro	Descripción	Parámetro	Descripción
p0100	Selección de 50/60 Hz =0: Europa [kW], 50 Hz (valor predeterminado de fábrica) =1: Norteamérica [hp], 60 Hz =2: Norteamérica [kW], 60 Hz	p0309[0] •	Eficiencia nominal del motor [%]
p0304[0] •	Tensión nominal del motor [V]	p0310[0] •	Frecuencia nominal del motor [Hz]
p0305[0] •	Corriente nominal del motor [A]	p0311[0] •	Velocidad nominal del motor [RPM]
p0307[0] •	Potencia nominal del motor [kW/hp]	p1900	Seleccionar la identificación de datos del motor = 0: Desactivada = 2: Identificación de todos los parámetros en parada
p0308[0] •	Factor de potencia del motor (cosφ)		
P1080[0]	Frecuencia mínima del motor	P1001[0]	Consigna para la frecuencia fija 1
p1082[0]	Frecuencia máxima del motor	P1002[0]	Consigna para la frecuencia fija 2
P1120[0]	Tiempo de aceleración	p1003[0]	Consigna para la frecuencia fija 3
P1121[0]	Tiempo de deceleración	p2201[0]	Consigna para la frecuencia PID fija 1

Fuente: Siemens

Configuración de frecuencia a 60 Hz:

**Figura 45** Configuración de Frecuencia de SINAMICS V20



Fuente: Elaboración propia

Configuración de tensión nominal a 220V:

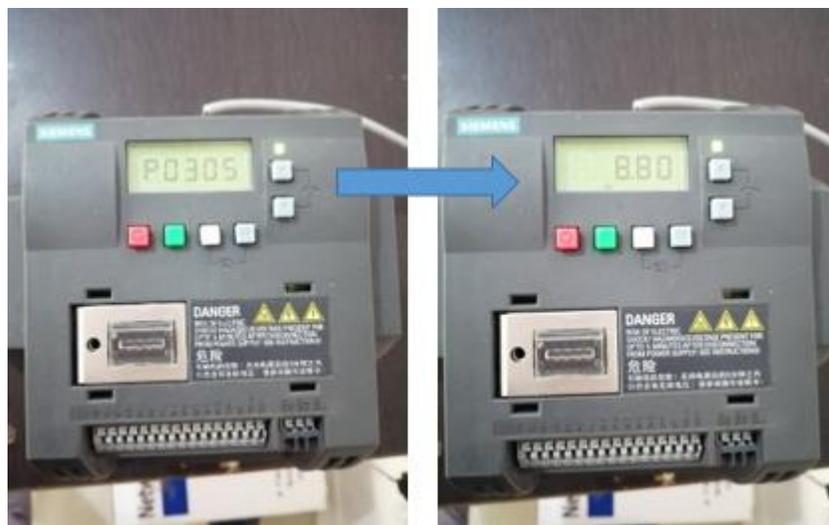
**Figura 46** Configuración de Tensión Nominal de SINAMICS V20



Fuente: Elaboración propia

Configuración de corriente nominal a 8,8A:

**Figura 47** Configuración de Corriente Nominal de SINAMICS V20



Fuente: Elaboración propia

Configuración de potencia nominal a 3HP:

**Figura 48** Configuración de Potencia Nominal de SINAMICS V20



Fuente: Elaboración propia

Configuración de frecuencia nominal del motor a 60 Hz:

**Figura 49** Configuración de Frecuencia Nominal del Motor en SINAMICS V20



Fuente: Elaboración propia

Configuración de frecuencia mínima del motor a 0 Hz:

**Figura 50** Configuración de Frecuencia Mínima del Motor en SINAMICS V20



Fuente: Elaboración propia

Configuración de frecuencia máxima del motor a 60 Hz:

**Figura 51** Configuración de Frecuencia Máxima del Motor en SINAMICS V20



Fuente: Elaboración propia

Configuración de rampa de aceleración del motor a 3 s:

**Figura 52** Configuración de Rampa de Aceleración del Motor en SINAMICS V20



Fuente: Elaboración propia

Configuración de rampa de deceleración del motor a 3 s:

**Figura 53** Configuración de Rampa de Deceleración del Motor en SINAMICS V20



Fuente: Elaboración propia

Para calcular la potencia requerida para las condiciones de carga, emplearemos la siguiente formula:

$$HP_2 = \frac{HP_1 \times \left(\frac{N_1 \times Q_2}{Q_1}\right)^3}{(N_1)^3}$$

Dónde:

N1 = Velocidad nominal en RPM

Q1 = Caudal nominal en l/min

HP1 = Potencia nominal en HP

Q2 = Caudal requerido en l/min

HP2 = Potencia requerida en HP

### Cálculo de energía consumida al 50%

Primero calculamos la potencia:

$$HP2 = \frac{HP1 \times \left(\frac{N1 \times Q2}{Q1}\right)^3}{N1^3}$$

$$HP2 = \frac{3 \times \left(\frac{3450 \times 52}{104}\right)^3}{3450^3}$$

$$HP2 = 0,375 \text{ HP}$$

Luego se convierte a kW:

$$\text{Potencia}_{50\%} = 0,375 \text{ HP} \times 0,746 \text{ kW/HP} = 0,28 \text{ kW}$$

Cuando se realizó la prueba real bajo estas condiciones de carga se obtuvo una potencia de 0,29 kW como se muestra en la Fig. 54.

**Figura 54** Prueba al 50% con el SINAMICS V20



Fuente: Elaboración propia

La potencia calculada se ve afectada por la eficiencia del variador:

$$Potencia_{50\%} = 0,29 \text{ kW} / 0,98 = 0,3 \text{ kW}$$

Ahora se calcula la energía: Se debe tener en cuenta que al reducir al 50% el caudal, el nuevo tiempo de actividad de la bomba al mes será de 21,6 h.

$$Energía_{50\%} = 0,3 \text{ kW} \times 21,6 \text{ h} = 6,48 \text{ kW/h}$$

La energía consumida por las dos bombas será:

$$Energía_{50\%} = 6,48 \text{ kW/h} \times 2 = 12,96 \text{ kW/h}$$

Para hallar el pago mensual y anual a realizar debemos conocer el pago por kW/h en el país

Perú precios de la electricidad	Casa, kWh
Peruvian New Sol	0.728

$$Costo \text{ Mensual} = 12,96 \text{ kW/h} \times 0,728 \text{ S//kW/h} = \text{S/ } 9,435$$

$$Costo \text{ Anual} = \text{S/ } 9,435 \times 12 = \text{S/ } 113,22$$

### Cálculo de energía consumida al 70%

Primero calculamos la potencia:

$$HP2 = \frac{HP1 \times \left(\frac{N1 \times Q2}{Q1}\right)^3}{N1^3}$$

$$HP2 = \frac{3 \times \left(\frac{3450 \times 72,8}{104}\right)^3}{3450^3}$$

$$HP2 = 1,03 \text{ HP}$$

Luego se convierte a kW:

$$Potencia_{70\%} = 1,03 \text{ HP} \times 0,746 \text{ kW/HP} = 0,77 \text{ kW}$$

Cuando se realizó la prueba real bajo estas condiciones de carga se obtuvo una potencia de 0,79 kW como se muestra en la Fig. 55.

**Figura 55 Prueba al 70% con el SINAMICS V20**



Fuente: Elaboración propia

La potencia calculada se ve afectada por la eficiencia del variador:

$$Potencia_{70\%} = 0,79 \text{ kW} / 0,98 = 0,81 \text{ kW}$$

Ahora se calcula la energía: Se debe tener en cuenta que al reducir al 70% el caudal, el nuevo tiempo de actividad de la bomba al mes será de 15,43 h.

$$Energía_{70\%} = 0,81 \text{ kW} \times 15,43 \text{ h} = 12,5 \text{ kW/h}$$

La energía consumida por las dos bombas será:

$$Energía_{70\%} = 12,5 \text{ kW/h} \times 2 = 25 \text{ kW/h}$$

Para hallar el pago mensual y anual a realizar debemos conocer el pago por kW/h en el país

Perú precios de la electricidad	Casa, kWh
Peruvian New Sol	0.728

$$Costo Mensual = 25 \text{ kW/h} \times 0,728 \text{ S/kWh} = \text{S/ } 18,2$$

$$Costo Anual = \text{S/ } 18,2 \times 12 = \text{S/ } 218,4$$

## Cálculo de energía consumida al 100%

Primero calculamos la potencia:

$$HP2 = \frac{HP1x\left(\frac{N1xQ2}{Q1}\right)^3}{N1^3}$$

$$HP2 = \frac{3x\left(\frac{3450x104}{104}\right)^3}{3450^3}$$

$$HP2 = 3 HP$$

Luego se convierte a kW:

$$Potencia_{100\%} = 3 HP \times 0,746 kW/HP = 2,23 kW$$

Cuando se realizó la prueba real bajo estas condiciones de carga se obtuvo una potencia de 2,21 kW como se muestra en la Fig. 56.

**Figura 56** Prueba al 0% con el SINAMICS V20



Fuente: Elaboración propia

La potencia calculada se ve afectada por la eficiencia del variador:

$$Potencia_{100\%} = 2,21 \text{ kW} / 0,98 = 2,26 \text{ kW}$$

Ahora se calcula la energía: Se debe tener en cuenta que al trabajar con el 100% del caudal, el tiempo de actividad de la bomba al mes será de 10,8 h.

$$Energía_{100\%} = 2,26 \text{ kW} \times 10,8 \text{ h} = 24,408 \text{ kW/h}$$

La energía consumida por las dos bombas será:

$$Energía_{100\%} = 24,408 \text{ kW/h} \times 2 = 48,816 \text{ kW/h}$$

Para hallar el pago mensual y anual a realizar debemos conocer el pago por kW/h en el país

Perú precios de la electricidad	Casa, kWh
Peruvian New Sol	0.728

$$Costo \text{ Mensual} = 48,816 \text{ kW/h} \times 0,728 \text{ S/kW/h} = \text{S/ } 35,54$$

$$Costo \text{ Anual} = \text{S/ } 35,54 \times 12 = \text{S/ } 426,48$$

### DELTA VFD-L:

La eficiencia de los variadores de velocidad DELTA cambia en función del estado de carga.

Sin embargo, se considera que la eficiencia promedio de un variador de velocidad es de 98%.

**Figura 57 DELTA VFD-L**



Fuente: Delta Electronics

Se procede a configurar la unidad tal como recomienda el fabricante:

**Figura 58** *Parámetros Básicos de DELTA VFD-L*

	Parámetros	Funciones	Ajuste	Ajuste fábrica
	1-00	Frecuencia de operación máxima.	50.0 ~ 400Hz	60.0
	1-01	Máximo límite de frecuencia.	10.0 ~ 400Hz	60.0
	1-02	Voltaje máximo de salida.	2.0 ~ 255V	220
	1-03	Punto medio de la frecuencia.	1.0 ~ 400Hz	1.0
	1-04	Punto medio del voltaje.	2.0 ~ 255V	12.0
	1-05	Frecuencia de salida mínima.	1.0 ~ 60.0Hz	1.0
	1-06	Voltaje de salida mínimo.	2.0 ~ 255V	12.0
	1-07	Límite de la frecuencia superior.	1 ~ 110%	100
	1-08	Límite de la frecuencia inferior.	0 ~ 100%	0.0
	1-09	Tiempo de aceleración 1 (Tacc1).	0.1 ~ 600Seg.	10.0
	1-10	Tiempo de desaceleración 1 (Tdec1).	0.1 ~ 600Seg.	10.0
	1-11	Tiempo de aceleración 2.	0.1 ~ 600Seg.	10.0
	1-12	Tiempo de desaceleración 2.	0.1 ~ 600Seg.	10.0
	1-13	Tiempo de aceleración de punteo.	0.1 ~ 600Seg.	10.0
	1-14	Tiempo de desaceleración de punteo.	0.0 ~ 600Seg.	10.0
	1-15	Frecuencia de punteo.	1.0Hz ~ 400Hz	6.0
	1-16	Modo de aceleración y desaceleración.	0: Aceleración y desaceleración lineal. 1: Aceleración automática y desaceleración lineal.	0

Fuente: Delta Electronics

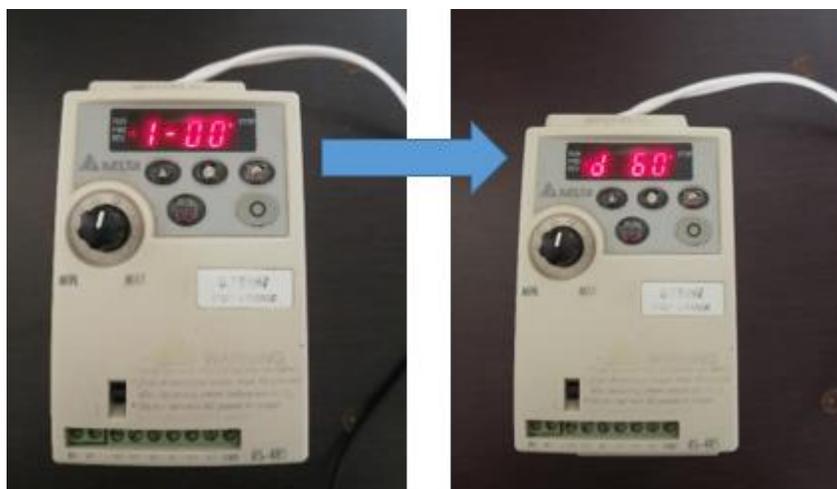
**Figura 59** Parámetros de Operación de DELTA VFD-L

Parámetros	Funciones	Ajuste	Ajuste Fábrica
2-00	Fuente de comando de la frecuencia.	0: Teclado digital frontal. 1: Entrada analógica (AVI) de 0 ~ 10V. 2: Entrada analógica (AVI) de 4 ~ 20mA. 3: Control por potenciómetro frontal. 4: Puerto de comunicación RS-485.	0
2-01	Fuente de comando de operación.	0: Por teclado digital frontal. 1: Por borneras externas, el botón de STOP está habilitado. 2: Por borneras externas, el botón de STOP está deshabilitado. 3: Por el puerto de comunicaciones RS-485, el botón de STOP está habilitado. 4: Por el puerto de comunicaciones RS-485, el botón de STOP está deshabilitado.	0

Fuente: Delta Electronics

Configuración de frecuencia de operación a 60 Hz.

**Figura 60** Frecuencia de Operación en DELTA VFD-L



Fuente: Elaboración propia

Configuración de límite máximo frecuencia de operación a 60 Hz.

**Figura 61** Límite de Frecuencia Máximo de Operación en DELTA VFD-L



Fuente: Elaboración propia

Configuración de voltaje máximo de salida a 220 V.

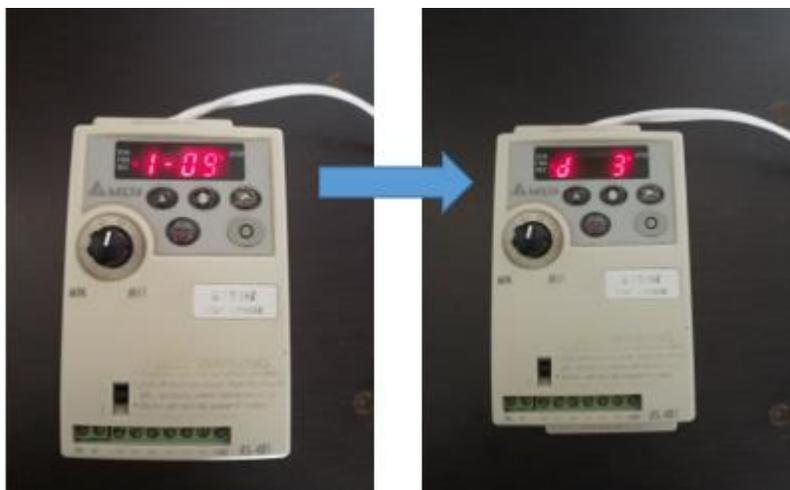
**Figura 62** Voltaje Máximo de Salida en DELTA VFD-L



Fuente: Elaboración propia

Configuración de tiempo de aceleración a 3 s.

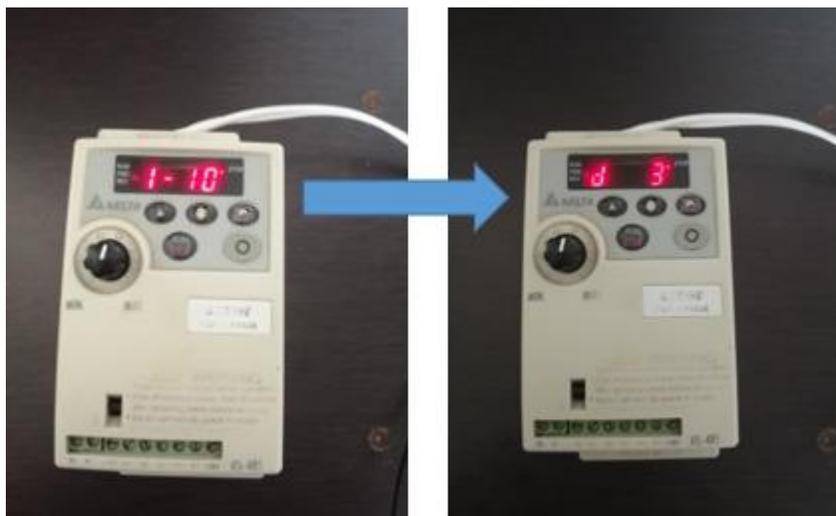
**Figura 63** Tiempo de Rampa de Aceleración en DELTA VFD-L



*Fuente: Elaboración propia*

Configuración de tiempo de desaceleración a 3 s.

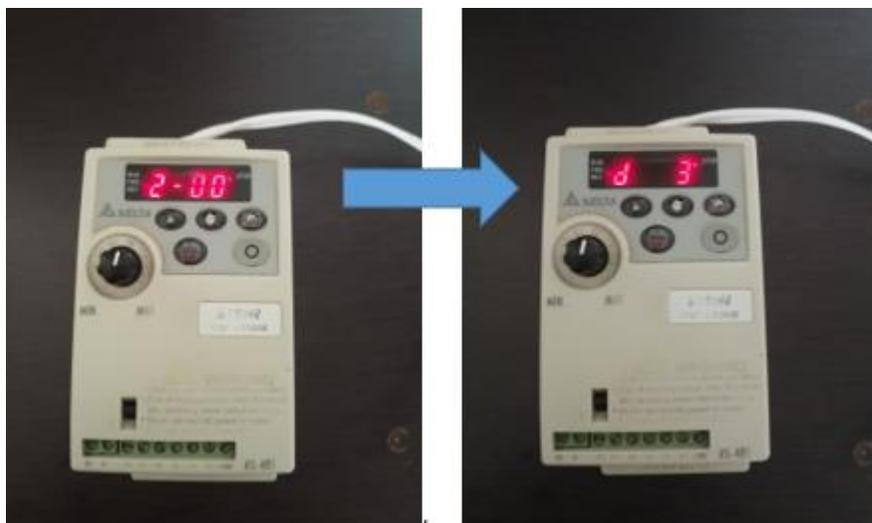
**Figura 64** Tiempo de Rampa de Desaceleración en DELTA VFD-L



*Fuente: Elaboración propia*

Configuración de fuente de comando de la frecuencia por potenciómetro.

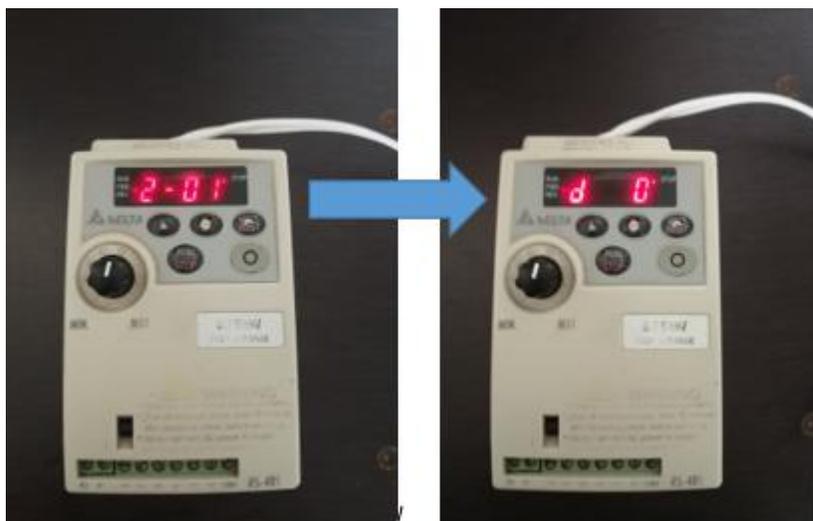
**Figura 65** Fuente de Comando de la Frecuencia en DELTA VFD-L



Fuente: Elaboración propia

Configuración de fuente de comando de operación por teclado digital frontal.

**Figura 66** Fuente de Comando de Operación en DELTA VFD-L



Fuente: Elaboración propia

Para calcular la potencia requerida para las condiciones de carga, emplearemos la siguiente formula:

$$HP_2 = \frac{HP_1 \times \left(\frac{N_1 \times Q_2}{Q_1}\right)^3}{(N_1)^3}$$

Dónde:

N1 = Velocidad nominal en RPM

Q1 = Caudal nominal en l/min

HP1 = Potencia nominal en HP

Q2 = Caudal requerido en l/min

HP2 = Potencia requerida en HP

### **Cálculo de energía consumida al 50%**

Primero calculamos la potencia:

$$HP_2 = \frac{HP_1 \times \left(\frac{N_1 \times Q_2}{Q_1}\right)^3}{N_1^3}$$

$$HP_2 = \frac{3 \times \left(\frac{3450 \times 52}{104}\right)^3}{3450^3}$$

$$HP_2 = 0,375 \text{ HP}$$

Luego se convierte a kW:

$$Potencia_{50\%} = 0,375 \text{ HP} \times 0,746 \text{ kW/HP} = 0,28 \text{ kW}$$

Cuando se realizó la prueba real bajo estas condiciones de carga se obtuvo una potencia de 0,3 kW como se muestra en la Fig. 67.

**Figura 67** Prueba al 50% con el DELTA VFD-L



Fuente: Elaboración propia

La potencia calculada se ve afectada por la eficiencia del variador:

$$Potencia_{50\%} = 0,3 \text{ kW} / 0,98 = 0,306 \text{ kW}$$

Ahora se calcula la energía: Se debe tener en cuenta que al reducir al 50% el caudal, el nuevo tiempo de actividad de la bomba al mes será de 21,6 h.

$$Energía_{50\%} = 0,306 \text{ kW} \times 21,6 \text{ h} = 6,61 \text{ kW/h}$$

La energía consumida por las dos bombas será:

$$Energía_{50\%} = 6,61 \text{ kW/h} \times 2 = 13,22 \text{ kW/h}$$

Para hallar el pago mensual y anual a realizar debemos conocer el pago por kW/h en el país

Perú precios de la electricidad	Casa, kWh
Peruvian New Sol	0.728

$$Costo Mensual = 13,22 \text{ kW/h} \times 0,728 \text{ S//kW/h} = \text{S/ } 9,624$$

$$Costo Anual = \text{S/ } 9,624 \times 12 = \text{S/ } 115,488$$

### Cálculo de energía consumida al 70%

Primero calculamos la potencia:

$$HP2 = \frac{HP1 \times \left(\frac{N1 \times Q2}{Q1}\right)^3}{N1^3}$$

$$HP2 = \frac{3 \times \left(\frac{3450 \times 72,8}{104}\right)^3}{3450^3}$$

$$HP2 = 1,03 \text{ HP}$$

Luego se convierte a kW:

$$\text{Potencia}_{70\%} = 1,03 \text{ HP} \times 0,746 \text{ kW/HP} = 0,77 \text{ kW}$$

Cuando se realizó la prueba real bajo estas condiciones de carga se obtuvo una potencia de 0,8 kW como se muestra en la Fig. 68.

**Figura 68** Prueba al 70% con el DELTA VFD-L



Fuente: Elaboración propia

La potencia calculada se ve afectada por la eficiencia del variador:

$$Potencia_{70\%} = 0,8 \text{ kW} / 0,98 = 0,82 \text{ kW}$$

Ahora se calcula la energía: Se debe tener en cuenta que al reducir al 70% el caudal, el nuevo tiempo de actividad de la bomba al mes será de 15,43 h.

$$Energía_{70\%} = 0,82 \text{ kW} \times 15,43 \text{ h} = 12,66 \text{ kW/h}$$

La energía consumida por las dos bombas será:

$$Energía_{70\%} = 12,66 \text{ kW/h} \times 2 = 25,32 \text{ kW/h}$$

Para hallar el pago mensual y anual a realizar debemos conocer el pago por kW/h en el país

Perú precios de la electricidad	Casa, kWh
Peruvian New Sol	0.728

$$Costo \text{ Mensual} = 25,32 \text{ kW/h} \times 0,728 \text{ S/kW/h} = \text{S/ } 18,434$$

$$Costo \text{ Anual} = \text{S/ } 18,434 \times 12 = \text{S/ } 221,208$$

### Cálculo de energía consumida al 100%

Primero calculamos la potencia:

$$HP2 = \frac{HP1 \times \left(\frac{N1 \times Q2}{Q1}\right)^3}{N1^3}$$

$$HP2 = \frac{3 \times \left(\frac{3450 \times 104}{104}\right)^3}{3450^3}$$

$$HP2 = 3 \text{ HP}$$

Luego se convierte a kW:

$$Potencia_{100\%} = 3 \text{ HP} \times 0,746 \text{ kW/HP} = 2,23 \text{ kW}$$

Cuando se realizó la prueba real bajo estas condiciones de carga se obtuvo una potencia de 2,21 kW como se muestra en la Fig. 69.

**Figura 69** Prueba al 100% con el DELTA VFD-L



Fuente: Elaboración propia

La potencia calculada se ve afectada por la eficiencia del variador:

$$Potencia_{100\%} = 2,21 \text{ kW} / 0,98 = 2,26 \text{ kW}$$

Ahora se calcula la energía: Se debe tener en cuenta que al trabajar con el 100% del caudal, el tiempo de actividad de la bomba al mes será de 10,8 h.

$$Energía_{100\%} = 2,26 \text{ kW} \times 10,8 \text{ h} = 24,408 \text{ kW/h}$$

La energía consumida por las dos bombas será:

$$Energía_{100\%} = 24,408 \text{ kW/h} \times 2 = 48,816 \text{ kW/h}$$

Para hallar el pago mensual y anual a realizar debemos conocer el pago por kW/h en el país

Perú precios de la electricidad	Casa, kWh
Peruvian New Sol	0.728

$$Costo \text{ Mensual} = 48,816 \text{ kW/h} \times 0,728 \text{ S/kW/h} = \text{S/ } 35,54$$

$$Costo \text{ Anual} = \text{S/ } 35,54 \times 12 = \text{S/ } 426,48$$

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS

#### 4.1. Resultados del Estudio Técnico

Como se ha demostrado en el capítulo anterior, con velocidad constante se obtienen los siguientes resultados de energía consumida:

##### VELOCIDAD CONSTANTE:

$$\text{Energía Total} = 79,2 \text{ kW/h}$$

Ahora mostraremos los resultados del consumo de energía con velocidad variable:

##### VELOCIDAD VARIABLE:

*Tabla 6 Consumo de Energía a Velocidad Variable*

Carga	Consumo de energía mensual			Consumo de energía anual		
	ATV32	SINAMICS V20	DELTA VFD-L	ATV32	SINAMICS V20	DELTA VFD-L
50%	13,824 kW/h	12,96 kW/h	13,22 kW/h	165,888 kW/h	155,52 kW/h	158,64 kW/h
70%	26,24 kW/h	25 kW/h	25,32 kW/h	314,88 kW/h	300 kW/h	303,84 kW/h
100%	50,176 kW/h	48,816 kW/h	48,816 kW/h	602,112 kW/h	585,792 kW/h	585,792 kW/h

*Fuente: Elaboración propia*

#### 4.2. Resultados del Estudio Económico

Como se ha demostrado en el capítulo anterior, con velocidad constante se obtienen los siguientes resultados de costos económicos por energía consumida:

##### VELOCIDAD CONSTANTE:

$$\text{Costo Mensual} = S/ 57,66$$

$$\text{Costo Anual} = S/ 691,92$$

Ahora mostraremos los resultados de costos por consumo de energía con velocidad variable:

**VELOCIDAD VARIABLE:****Tabla 7 Costo Económico por Consumo de Energía**

Carga	Costo por energía consumida mensual			Costo por energía consumida anual		
	ATV32	SINAMICS V20	DELTA VFD-L	ATV32	SINAMICS V20	DELTA VFD-L
50%	S/ 10,063	S/ 9,435	S/ 9,624	S/ 120,756	S/ 113,22	S/ 115,488
70%	S/ 19,10	S/ 18,2	S/ 18,434	S/ 229,20	S/ 218,40	S/ 221,208
100%	S/ 36,528	S/ 35,54	S/ 35,54	S/ 438,336	S/ 426,48	S/ 426,48

Fuente: Elaboración propia

También se muestra el precio de cada variador.

**Tabla 8 Costo de Variadores de Frecuencia**

VFD	PRECIO
ATV32	S/ 1717.48
SINAMICS V20	S/ 928.49
DELTA VFD-L	S/ 763.00

Fuente: Elaboración propia

## CAPÍTULO V

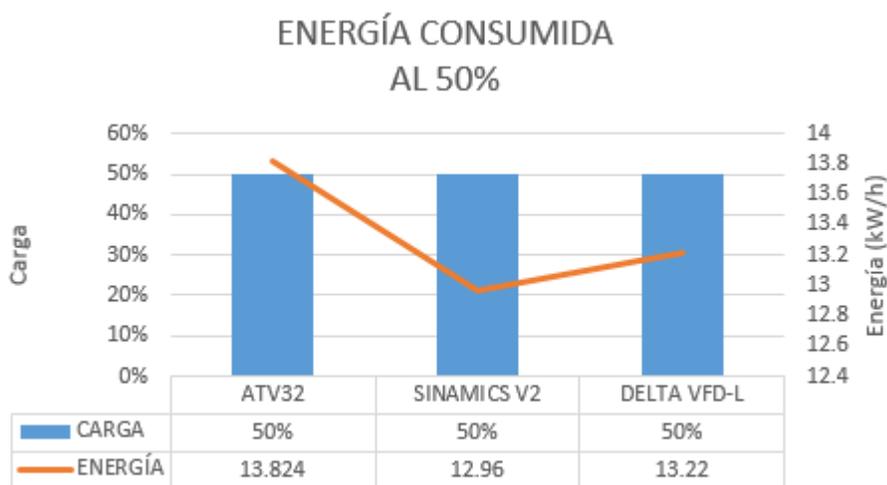
### CONSLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

Para todas las condiciones de carga, los variadores de frecuencia SINAMICS V20 y DELTA VFD-L tienen menor consumo de energía mensual que el variador de frecuencia ATV32. Esto se debe principalmente a la eficiencia de cada variador de frecuencia.

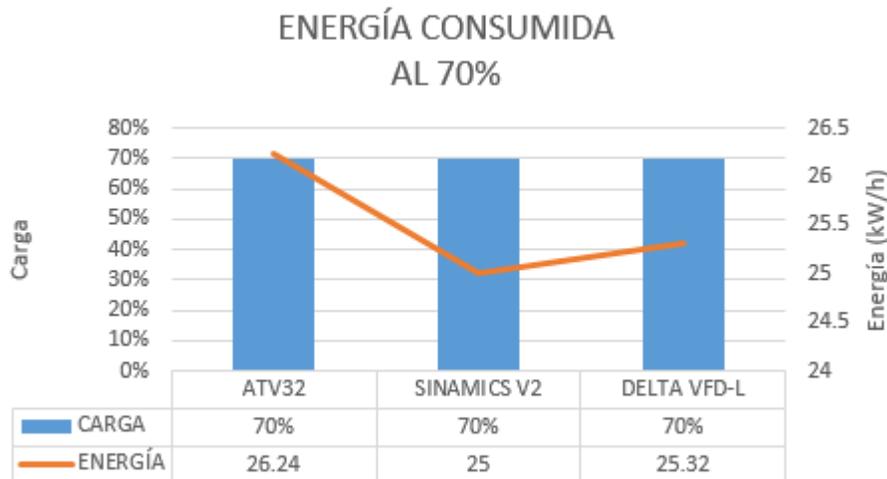
En las Figs. 70, 71 y 72 podemos apreciar la cantidad de energía consumida por los tres variadores de frecuencia para el 50%, 70% y 100% respectivamente.

**Figura 70** Energía Consumida al 50% de Carga



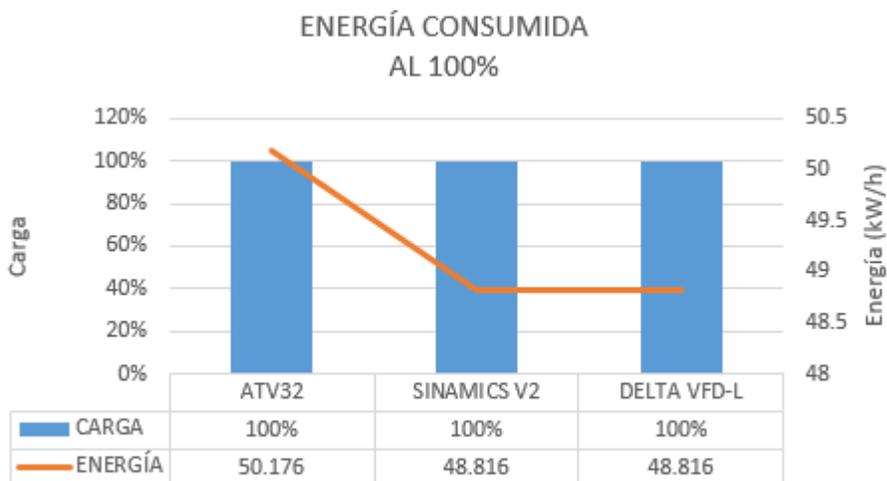
*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 71** Energía Consumida al 70% de Carga



Fuente: Elaboración propia

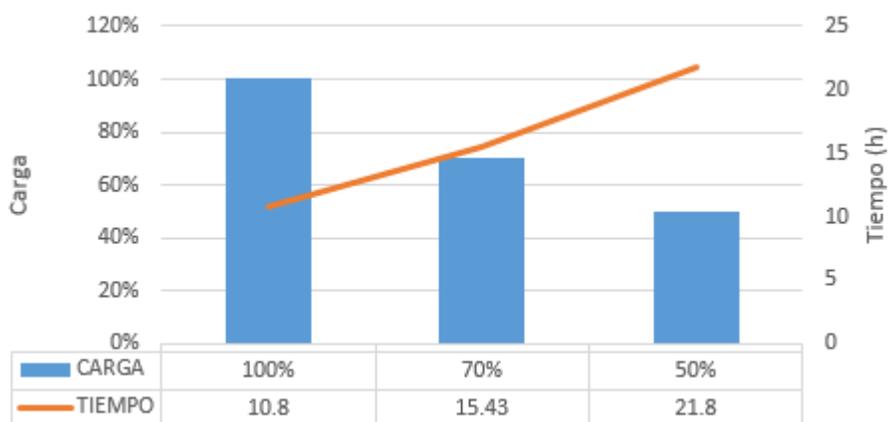
**Figura 72** Energía Consumida al 100% de Carga



Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, si se optará por trabajar al 50% y 70% de carga, aumentaría el tiempo de llenado del tanque a 21,6 h y 15,43 h respectivamente.

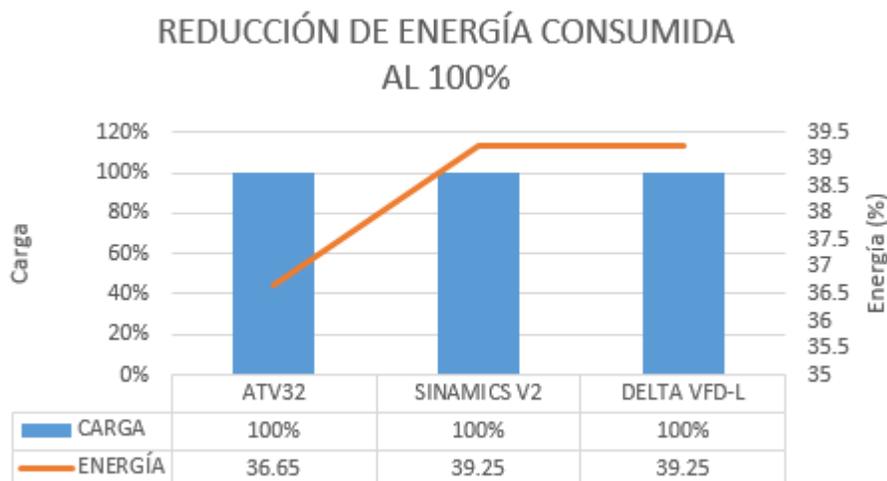
**Figura 73** Variación del Tiempo de Llenado para el 50%, 70% y 100% de Carga



Fuente: Elaboración propia

Para un régimen del 100% de carga y con respecto al consumo de energía anual a velocidad constante (950,4 kW/h), el variador de frecuencia ATV32 representa una reducción en el gasto de energía el cual fue 348,288 kW/h o 36,65%, mientras que los variadores de frecuencia SINAMICS V20 y DELTA VFD-L representan una reducción en el gasto de energía el cual fue 373,008 kW/h o 39,25%.

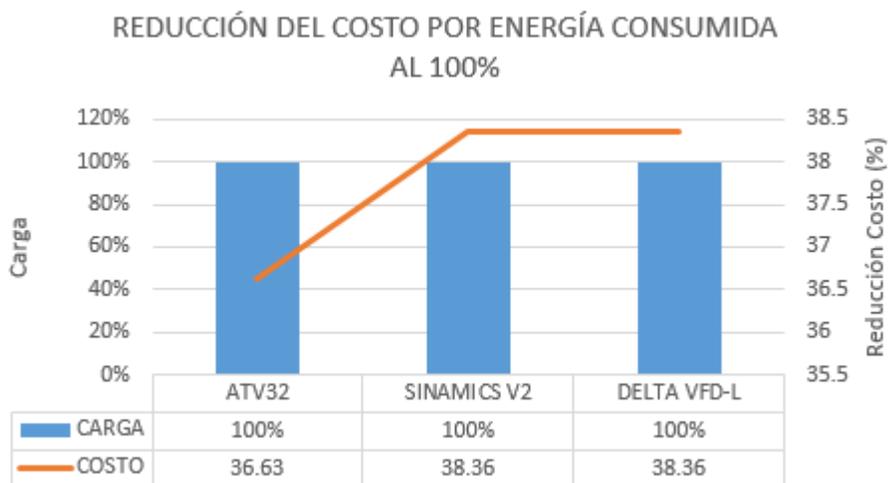
**Figura 74 Reducción de Energía Consumida Anual al 100% de Carga**



Fuente: Elaboración propia

Para un régimen del 100% de carga y con respecto al costo económico anual por energía consumida a velocidad constante (S/ 691,92), el variador de frecuencia ATV32 representa una disminución en el costo de S/ 253,484 o 36,63%, mientras que los variadores de frecuencia SINAMICS V20 y DELTA VFD-L representan una disminución en el costo de S/ 265,44 o 38,36%.

**Figura 75 Reducción de Costos por Energía Consumida Anual al 100% de Carga**



Fuente: Elaboración propia

Después de realizar el estudio técnico y económico, podemos concluir que el variador que ofrece la mejor relación entre ahorro de consumo de energía y precio (S/ 763.00) para este ejemplo de aplicación es el modelo DELTA VFD-L.

**Tabla 9 Consumo Mensual de Energía DELTA VFD-L**

Carga	Consumo de energía mensual			Consumo de energía anual		
	ATV32	SINAMICS V20	DELTA VFD-L	ATV32	SINAMICS V20	DELTA VFD-L
50%	13,824 kW/h	12,96 kW/h	13,22 kW/h	165,888 kW/h	155,52 kW/h	158,64 /h
70%	26,24 kW/h	25 kW/h	25,32 kW/h	314,88 kW/h	300 kW/h	303,84 kW/h
100%	50,176 kW/h	48,816 kW/h	48,816 kW/h	602,112 kW/h	585,792 kW/h	585,792 kW/h

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 10 Costo Económico por Consumo de Energía Mensual y Anual DELTA VFD-L**

Carga	Costo por energía consumida mensual			Costo por energía consumida anual		
	ATV32	SINAMICS V20	DELTA VFD-L	ATV32	SINAMICS V20	DELTA VFD-L
50%	S/ 10,063	S/ 9,435	S/ 9,624	S/ 120,756	S/ 113,22	S/ 115,488
70%	S/ 19,10	S/ 18,2	S/ 18,434	S/ 229,20	S/ 218,40	S/ 221,208
100%	S/ 36,528	S/ 35,54	S/ 35,54	S/ 438,336	S/ 426,48	S/ 426,48

Fuente: Elaboración propia

## 5.2. Recomendaciones

### Medir la presión del sistema:

Se recomienda la instalación de un manómetro y un transmisor de presión en la tubería de distribución de agua a las viviendas del Bloque B. El manómetro para indicar la presión de la tubería de forma local y el transmisor para obtener una señal de salida que sirva como referencia de velocidad del variador. De esta manera, se realiza un ajuste acorde a las condiciones de carga.

### Utilizar bombas múltiples:

Se recomienda trabajar con bombas en paralelo para adecuarse los requisitos de carga o demanda al momento de distribuir agua en las viviendas del Bloque B para lograr ahorros de energía significativos. Se estima que el uso de bombas operando simultáneamente, según se requiera, genera un ahorro del 50% del consumo total de energía del sistema de bombeo.

**Control y monitoreo remoto:**

Se recomienda implementar un sistema automatizado que sea capaz de calcular la carga o demanda para encender y/o apagar las bombas según se requiera. Este tipo de sistemas ofrecen muchas ventajas en comparación con los sistemas de control de bombeo convencionales, su aplicación resulta en una disminución considerable del consumo de energía, disminuye el desgaste de las bombas y por ende su mantenimiento, lo cual a su vez genera ahorro económico.

## BIBLIOGRAFÍA

- ABB. (2016). *Ahorro energético y Eficiencia con variadores de frecuencia*. Obtenido de <https://new.abb.com/drives/es/eficiencia-energetica#:~:text=Los%20variadores%20de%20frecuencia%20ABB,un%2020%20y%20un%2070%25>.
- ABB. (2018). *¿Por qué la eficiencia energética?* Obtenido de <https://new.abb.com/es/eficiencia-energetica>
- ABB. (2018). *El gasto energético en la industria*. Obtenido de <https://new.abb.com/drives/es/eficiencia-energetica/gasto-energetico-industria>
- Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (Marzo de 2010). *PROGRAMA INTEGRAL DE ASISTENCIA TÉCNICA Y CAPACITACIÓN PARA LA FORMACIÓN DE ESPECIALISTAS EN AHORRO Y USO EFICIENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE GUATEMALA*". Obtenido de [http://www.cnee.gov.gt/EficienciaEnergetica/FIDE/004%20Módulo%20IV%20\(AEE%20Motores%20de%20Inducción\).pdf](http://www.cnee.gov.gt/EficienciaEnergetica/FIDE/004%20Módulo%20IV%20(AEE%20Motores%20de%20Inducción).pdf)
- Guevara, C. (2010). *La Eficiencia Energética del Conjunto Motor-Variador de Frecuencia*. Obtenido de <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo/eficiencia-energetica-del-conjunto-motor-variador-de-frecuencia>
- Legrand. (2013). *COMPENSACIÓN DE ENERGÍA REACTIVA Y FILTRADO DE ARMÓNICOS*. Obtenido de <https://www.legrand.es/documentos/catalogo-eficiencia-energetica-calidad-energia-2013-legrand.pdf>
- Minem. (Julio de 2014). *Guía de Orientación del Uso Eficiente de la Energía y de Diagnóstico Energético*. Obtenido de

- <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGEE/eficiencia%20energetica/publicaciones/guias/Guía%2014-Edificios%20Publicos.pdf>
- Perea, F. (2014). *Estrategia de Medición de Variables eléctricas para la Gestión de la Eficiencia Energética en el Sector Petrolero*. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/77274818.pdf>
- Philips Lighting. (2019). *Eficiencia Energética* . Obtenido de <https://www.lighting.philips.es/sistemas/temas/luz-blanca-led/eficiencia-energetica>
- Sandoval, A. (2015). *Beneficios de los Variadores de Velocidad*. Obtenido de <http://www.cenytec.com/Publicaciones/VARIADORES-TECNOLOGIA.pdf>
- Schneider Electric. (2012). *Guía de Soluciones de Eficiencia Energética*. Obtenido de [https://download.schneider-electric.com/files?p\\_enDocType=Catalog&p\\_File\\_Id=3165812&p\\_File\\_Name=EEFED108010ES.pdf&p\\_Reference=EEFED108010ES](https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Catalog&p_File_Id=3165812&p_File_Name=EEFED108010ES.pdf&p_Reference=EEFED108010ES)
- Schneider Electric. (2018). *Soluciones y Servicios de Eficiencia Energética*. Obtenido de [https://download.schneider-electric.com/files?p\\_enDocType=Catalog&p\\_File\\_Name=servicios-eficiencia-energetica.pdf&p\\_Doc\\_Ref=110001D09\\_](https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Catalog&p_File_Name=servicios-eficiencia-energetica.pdf&p_Doc_Ref=110001D09_)
- Schneider Electric España, S.A. (2015). *Soluciones y Servicios de Eficiencia Energética*. Obtenido de <http://www.schneiderelectric.es/eficienciaenergetica>
- Serrano, L., & Martínez, J. (2017). *Máquinas Eléctricas 4a Edición*. Valencia: Universitat Politècnica de València.