



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



**“AHORRO DE ENERGÍA EN UNA BOMBA SUMERGIBLE MEDIANTE UN VARIADOR
DE FRECUENCIA”**

REPORTE TÉCNICO

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN

PRESENTA:
LIA FERNANDA SOSA CASTILLO

ASESORES:
ING. RENÉ TOLENTINO NESLAVA
M. EN C. GUILIBALDO TOLENTINO ESLAVA

Ciudad de México, ABRIL 2022

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

REPORTE TÉCNICO

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN
POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN CURRICULAR
DEBERA (N) DESARROLLAR C. LIA FERNANDA SOSA CASTILLO

“AHORRO DE ENERGÍA EN UNA BOMBA SUMERGIBLE MEDIANTE UN VARIADOR DE FRECUENCIA”

DETERMINAR EL AHORRO DE ENERGÍA EN UNA BOMBA SUMERGIBLE EN LA QUE SE TIENE DOS MÉTODOS DE REGULACIÓN EN LAZO ABIERTO (VELOCIDAD VARIABLE Y VELOCIDAD CONSTANTE)

- ❖ DEMANDA DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA Y ELEMENTOS FINALES DE CONTROL
- ❖ INSTALACIÓN Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL
- ❖ RESULTADOS Y ANÁLISIS

CIUDAD DE MÉXICO, A 29 DE ABRIL DE 2022.

ASESORES


ING. RENÉ TOLENTINO
ESLAVA


M. EN C. GUILIBALDO
TOLENTINO ESLAVA

M. EN C. MIRIAM GÓMEZ ÁLV
JEFA DE LA CARRERA DE INGENIERÍA
CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN



IPN
JEFATURA ICA

Instituto Politécnico Nacional

Presente

Bajo protesta de decir verdad la que suscribe **LIA FERNANDA SOSA CASTILLO**, manifiesto ser autora y titular de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada **“AHORRO DE ENERGÍA EN UNA BOMBA SUMERGIBLE MEDIANTE UN VARIADOR DE FRECUENCIA”** en adelante **"La Tesis"** y de la cual se adjunta copia en dos CD's, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgo al **INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**, en adelante **EL IPN**, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales o en cualquier otro medio para consulta , aportación del desarrollo de proyecto, etc. de **"La Tesis"** por un periodo de **2 años** contado a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso a **EL IPN** de su terminación.

En virtud de lo anterior, **EL IPN** deberá reconocer en todo momento mi calidad de autora de **"La Tesis"**.

Adicionalmente, y en mi calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales de **"La Tesis"**, manifiesto que la misma es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por el suscrito respecto de **"La Tesis"**, por lo que deslindo de toda responsabilidad a **EL IPN** en caso de que el contenido de **"La Tesis"** o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Ciudad de México., a 13 de Mayo de 2022

Atentamente



Lia Fernanda Sosa Castillo

CONTENIDO.

	Pág.
RESUMEN	I
INTRODUCCIÓN	II
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	III
OBJETIVOS	V
JUSTIFICACIÓN	VI
ALCANCE	VII
RELACIÓN DE FIGURAS	VIII
RELACIÓN DE TABLAS	X
ANTECEDENTES	1
CAPÍTULO 1.DEMANDA DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA Y ELEMENTOS FINALES DE CONTROL.....	13
1.1 ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA INDUSTRIA	14
1.1.1 Consumo de energía de motores eléctricos	15
1.1.2 Consumo de energía en México por sectores	15
1.1.3 Impacto ambiental del aumento en la demanda de la energía eléctrica	17
1.2 AHORRO DE ENERGÍA EN SISTEMAS DE BOMBEO	18
1.2.1 Válvulas	18
1.2.2 Variadores de frecuencia	20
1.2.3 Ventajas y desventajas de válvula y variador de frecuencia.....	22
1.3 APLICACIONES EN LA INDUSTRIA.....	23
1.3.1 Válvulas en la industria	23
1.3.2 Aplicaciones de los variadores de frecuencia en la industria.....	23
1.4 BOMBAS CENTRÍFUGAS	24
1.4.1 Curvas características	25
1.4.2 Leyes de afinidad.....	29
1.5 PARÁMETROS MECÁNICOS Y ELÉCTRICOS EN BOMBAS	29
1.5.1 Flujo y presión	29
1.5.2 Potencia eléctrica.....	33
CAPÍTULO 2. INSTALACIÓN Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	35
2.1 DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL	36
2.2 EQUIPO DE MÓDULO DIDÁCTICO.....	37
2.2.1 Tanque atmosférico	38
2.2.2 Bomba sumergible	38
2.2.3 Sistema de tuberías	39

2.3 INSTRUMENTACIÓN	40
2.3.1 Transmisores de presión	41
2.3.2 Transmisor de flujo magnético	42
2.3.3 Analizador de energía	42
2.3.4 Pinza amperimétrica	43
2.4 GABINETE DE CONTROL	45
2.4.1 Variador de frecuencia	45
2.4.2 Controlador lógico programable	47
2.4.3 Protecciones	48
2.5 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	49
2.5.2 Consumo energético a velocidad variable (variador de frecuencia)	52
2.5.3 Consumo energético a velocidad constante (válvula)	52
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	54
3.1 EVALUACIÓN DE LA BOMBA SUMERGIBLE	55
3.2 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LA BOMBA	57
3.3 POTENCIA CONSUMIDA CON VÁLVULA	57
3.4 POTENCIA CONSUMIDA CON VARIADOR DE FRECUENCIA	59
3.5. COMPARACIÓN DE POTENCIAS	59
3.6. ANÁLISIS ECONÓMICO	62
3.7 REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO ₂	65
CONCLUSIONES	67
BIBLIOGRAFÍA	69
ANEXOS	74

RESUMEN

En este trabajo se determinó el ahorro de energía en una bomba sumergible que forma parte de un módulo de medición y control de flujo, para lo cual se evalúa la energía consumida por los dos métodos de regulación de flujo con que cuenta la instalación, estos son a velocidad constante (válvula) y a velocidad variable (variador de frecuencia). Todas las mediciones se realizaron con el módulo operando a lazo abierto.

Se realizó una metodología para determinar el ahorro energético a velocidad variable (variador de frecuencia) y velocidad constante (válvula). En el módulo de flujo que se ubica en el laboratorio B02, del Laboratorio de Pesados I, del Departamento Ingeniería en Control y Automatización de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Zacatenco. El módulo tiene integrado un transmisor de flujo magnético, un tanque atmosférico, dos transmisores de presión absoluta, un variador de frecuencia, una bomba centrífuga sumergible y una válvula esférica manual. Para la metodología de velocidad variable, la frecuencia se modificó iniciando en 60 Hz, disminuyendo con decrementos de 10% (6 Hz) hasta 24 Hz, dando tiempo al módulo para estabilizarse en cada frecuencia y en cada variación se realizaron mediciones de flujo, potencia, presión, tensión y corriente. Para la metodología a velocidad constante, se inició la bomba a flujo máximo, igualando los flujos obtenidos con el variador de frecuencia y en cada variación se realizaron mediciones de flujo, potencia, presión, tensión y corriente.

Con base en los datos obtenidos, se hizo una comparación entre la potencia consumida y las emisiones de CO₂ en cada método de regulación de flujo. El porcentaje de ahorro energético varió entre el 95% al 24% dependiendo del flujo con el que trabaje el módulo. De igual modo, las emisiones de CO₂ tuvieron una variación de ahorro de 157 g CO₂ a 43 g CO₂, según el flujo implementado. Demostrando que la implementación de un variador de flujo en un sistema de bombeo genera ahorros de energía representativos, así como las reducciones de emisiones contaminantes, contribuyendo a la disminución de gases de efecto invernadero.

INTRODUCCIÓN

El consumo de energía a nivel mundial se incrementa constantemente. En el 2018 aumentó casi el doble de la tasa de crecimiento promedio desde 2010. La demanda de energía eléctrica aumentó un 4%, aproximadamente dos veces más rápido que la demanda total de energía. Las energías renovables y la energía nuclear aumentaron en más del 7%, cubrieron parte del aumento de la demanda; sin embargo, no fue suficiente. Por lo que se requirió la generación a partir de centrales eléctricas alimentadas con combustibles fósiles, aumentando las emisiones de CO₂ del sector en un 2.5% [19].

El sector industrial es el mayor consumidor con alrededor del 54% del consumo total de energía mundial. Los sistemas de bombeo representan aproximadamente el 20% de la energía mundial utilizada en motores eléctricos y entre el 25% y el 50% del uso total de la energía eléctrica en determinadas instalaciones industriales. Las bombas centrífugas son utilizadas ampliamente en la industria en variedad de aplicaciones, como suministro de agua, suministro de energía, entre otras. [9].

Las bombas centrífugas se han estudiado continuamente para incrementar la eficiencia de las máquinas de fluidos comúnmente utilizado en la industria. El método de velocidad variable se ha estudiado para reducir la energía entre 15% y 30% en comparación con la operación a velocidad constante. Este método puede aumentar la eficiencia, el ahorro de energía y fiabilidad de las bombas.

En base a lo anterior, el objetivo de este trabajo es determinar el ahorro de energía en una bomba centrífuga sumergible en la que se tienen dos métodos de regulación de flujo como son el variador de frecuencia (velocidad variable) y una válvula (velocidad constante). Para lo cual este trabajo está dividido en 3 capítulos.

En el primer capítulo se definen porcentajes del consumo energético por sectores, así como el impacto ambiental de la demanda energética. La definición funcionamiento, aplicaciones, ventajas y desventajas de las válvulas y variadores de frecuencia. Las curvas características, los parámetro mecánicos y eléctricos de las bombas centrífugas.

En el segundo capítulo se describe el módulo de flujo, el equipo que lo integra y las características de los instrumentos. La descripción de los elementos que forman parte del gabinete de control. De igual modo se describe la metodología implementada a velocidad constante y velocidad variable para las pruebas realizadas al módulo.

En el tercer capítulo se presentan los resultados del ahorro de energía entre ambos métodos de regulación de flujo, así como el ahorro económico y de emisiones de CO₂. Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas durante el desarrollo de este trabajo.

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La demanda de energía aumenta día con día, debido a que es una necesidad indispensable en la vida cotidiana, pero con ella vienen algunos inconvenientes, tales como las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) al medio ambiente y en consecuencia el calentamiento global. Por otro lado, en la industria se requiere de la energía eléctrica para todas las actividades. Por ello, en la actualidad se necesitan diversas formas de controlar y mejorar los procesos para que estos posean la mayor eficacia, eficiencia, rentabilidad y reducir el impacto ambiental que éstos generan.

Por otra parte, en los procesos industriales se requiere de la implementación de elementos finales de control, con el objetivo de modificar alguna variable en éste, como presión, temperatura, flujo, nivel, entre otras. Un ejemplo de ello son las válvulas de control, que se emplean en los procesos variando la apertura de éstas, con el fin de obtener el flujo que demande el proceso, teniendo en cuenta distintos aspectos, pero en ocasiones la utilización de válvulas carece de soluciones para distintos problemas que se presentan en el proceso.

Por ello el variador de frecuencia se integra con el objetivo de ayudar en la solución de problemas que las válvulas por sí mismas no tienen la capacidad, ya que cuando se hace la variación de la apertura de las válvulas, éstas tienden a generar un aumento de presión, lo cual genera que las bombas demanden más energía para cumplir con la potencia que se les exige. De igual manera el variador de frecuencia ayuda a disminuir los armónicos que se generan y que traen consigo varios inconvenientes como el sobrecalentamiento de los conductores, disminución del factor de potencia, por mencionar algunos problemas.

De la energía eléctrica utilizada a nivel mundial, según la Agencia Internacional de la Energía (IEA, por sus siglas en inglés) el 20% recae en motores eléctricos que accionan bombas, por ello un ahorro energético en éstas sería de gran aportación para contribuir en las acciones para detener el cambio climático al que se enfrenta el mundo entero. Más del 50% de la energía eléctrica la utilizan motores eléctricos. El 75% de los variadores de frecuencia se utilizan en bombas, ventiladores y compresores. El consumo mundial de energía eléctrica podría reducirse en un 10% si se utilizasen variadores de frecuencia en todas las aplicaciones posibles.

Con base en los porcentajes de consumo de energía mencionados, se plantea en este proyecto la comparativa de dos métodos; velocidad variable (variador de frecuencia) y velocidad constante (válvula) con el fin de mostrar las ventajas y desventajas de estos métodos por medio de su aplicación en un módulo didáctico de medición y control de flujo, operando en un lazo abierto. En esta comparativa se pretende abarcar el impacto ambiental que se tendría en cada método, así como la reducción en el consumo de energía y de los costos de operación.

El cambio climático es la variación global del clima de la Tierra. Éste siempre ha existido, pero se ha acelerado en los últimos años como consecuencia del uso excesivo de energía por la sociedad moderna. Existen varios factores que contribuyen al deterioro del medio ambiente, uno de ellos es la generación y sobreexplotación del uso la energía eléctrica. Ya que la generación de energía necesita un proceso de combustión que produce enormes emisiones de gases de efecto invernadero.

Así mismo el ahorro de energía eléctrica trae consigo un ahorro en los costos de operación y en consecuencia en los productos que genera la industria, lo cual favorecería a las empresas que implementen variadores de frecuencia en sus procesos. Pero menos del 10% de los motores en la industria se encuentran equipados con un variador de frecuencia (VFD, por sus siglas en inglés). Es evidente que este porcentaje es bajo, por ello, se busca hacer conciencia de las ventajas de este método y de esta manera lograr un incremento en su utilización.

OBJETIVOS

GENERAL

Determinar el ahorro de energía en una bomba sumergible en la que se tienen dos métodos de regulación en lazo abierto (velocidad variable y velocidad constante).

PARTICULARES

- Obtener las curvas características y el comportamiento de las variables eléctricas de la bomba centrífuga sumergible.
- Evaluar el consumo energético regulando con la válvula.
- Determinar el consumo de energía regulando con un variador de frecuencia.
- Comparar el consumo energético de los métodos de regulación de flujo.
- Evaluar el impacto ambiental.

JUSTIFICACIÓN

El mundo presenta una crisis ambiental que va en crecimiento debido a la sobreexplotación de los recursos que se presenta día con día para satisfacer las necesidades de la sociedad. La energía eléctrica forma parte de este problema, a que es un servicio básico para la comunidad, que se integra en actividades comunes como el alumbrado de una casa, hasta actividades más complejas como el suministro eléctrico a la industria.

Debido al incremento del uso de la energía eléctrica, se requiere el uso excesivo de la quema de combustibles fósiles para su obtención y de esta forma satisfacer la demanda. De manera que representa una de las industrias de mayor producción de gases de efecto invernadero, gases responsables del cambio climático. Lo que tiene como consecuencia un impacto en los ámbitos: ambiental, social y económico, relacionadas con el aumento de temperatura, del nivel del mar, entre otros.

Por ello, se busca generar un ahorro en los sistemas de bombeo ya que representan aproximadamente el 20% de la energía mundial utilizada en motores eléctricos y con ello contribuir a frenar el cambio climático, integrando equipos como un variador de frecuencia, que no solo generarían un ahorro energético sino también a mejorar el rendimiento, aumentar la confiabilidad de los procesos y en la economía, representando ahorros económicos para las industrias. En definitiva, es más rentable invertir en eficiencia energética que en la producción de energía.

ALCANCE

Se realizará una evaluación experimental sobre regulación de flujo en función del consumo de energía. A velocidad variable, como es el variador de frecuencia y velocidad constante (válvula) para posteriormente comparar estos métodos y concluir las ventajas y desventajas de estos. De igual manera se requiere realizar pruebas en el módulo de flujo que se ubica en el laboratorio B02, localizado en el Laboratorio de Pesados I, del departamento ingeniería en Control y Automatización (ICA) de la ESIME Zacatenco.

El lazo de control de flujo está integrado por una bomba centrífuga sumergible de 550, un tanque atmosférico, un sistema de tuberías y transmisores de presión y flujo. En la tubería se tiene una válvula esférica de 50 mm (2 plg) de diámetro de PVC cédula 40, para regular el flujo a velocidad angular constante. Para el método de regulación de flujo a velocidad variable, el módulo cuenta con un variador de frecuencia Mitsubishi (FR-S520E-1.5K-NA). En ambas pruebas se efectuarán mediciones de las potencias (activa, reactiva y aparente) empleando un analizador de calidad de la energía Fluke 43B. En base en las mediciones de potencia y flujo se va a determinar el ahorro energético y económico que se produce.

RELACIÓN DE FIGURAS

	Pág.
0-1 MÓDULO EXPERIMENTAL.....	2
0-2 EFICIENCIA-FLUJO DISTRITO 1A	4
0-3 EFICIENCIA-FLUJO DISTRITO 1B.....	4
0-4 DIAGRAMA DE TUBERÍA E INSTRUMENTACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO.....	6
0-6 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS OPERANDO EN SERIE CON VÁLVULASSOLENOIDES.....	8
0-7 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS OPERANDO EN PARALELO SIN VÁLVULASSOLENOIDES	8
0-8 MÓDULO DIDÁCTICO DE FLUJO.....	9
0-10 EMISIONES DE CO ₂ PROCEDENTES DE LA COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLES (MT CO ₂)	11
1-1 – CONSUMO ENERGÉTICO POR COMBUSTIBLE.	14
1-2 DEMANDA DE ELECTRICIDAD POR SECTOR Y ESCENARIO A NIVEL MUNDIAL	15
1-3 CRECIMIENTO DE LA DEMANDA DE ELECTRICIDAD POR USO FINAL Y ESCENARIOS EN ECONOMÍAS AVANZADAS Y EN DESARROLLO 2018-2040	16
1-4 CONSUMO FINAL ENERGÉTICO POR SECTOR	16
1- 5 AHORROS DERIVADOS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN MÉXICO, 2014-2018	17
1- 6 VÁLVULA DE CONTROL TÍPICA.....	19
1-7 VÁLVULA ESFÉRICA	20
1-8 FUNCIONAMIENTO DE UN VARIADOR ALIMENTANDO UN MOTOR.....	21
1-9 CONFIGURACIÓN TÍPICA DE UN VARIADOR DE FRECUENCIA	21
1-10 IMPULSOR DE BOMBA CENTRÍFUGA	25

1-11 CURVA CARACTERÍSTICA CARGA-FLUJO DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA	26
1-12 CURVA CARACTERÍSTICA POTENCIA-FLUJO DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA	28
1-13 CURVA CARACTERÍSTICA EFICIENCIA-FLUJO DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA	28
1-14 FUNCIONAMIENTO DE UN TRANSMISOR MAGNÉTICO	31
1-15 TIPOS DE PRESIÓN	33
1-16. TRIÁNGULO DE POTENCIA.	34
2-1 DTI DEL MÓDULO DE MEDICIÓN Y CONTROL DE FLUJO	36
2-2 MÓDULO DIDÁCTICO DE FLUJO	37
2-3 CURVA CARGA-FLUJO DE LA BOMBA SUMERGIBLE 50WQ0.55-2P3V... ..	39
2-4 RECTIFICADOR DE FLUJO TIPO SPEARMAN.....	40
2-5 DISTRIBUCIÓN DE RECTIFICADORES DE FLUJO EN LA TUBERÍA, DIMENSIONES EN PLG	41
2-6 TRANSMISOR DE PRESIÓN ABSOLUTA.	42
2-7 TRANSMISOR DE FLUJO PROMAG 33F	43
2-8 ANALIZADOR DE ENERGÍA FLUKE 43B	44
2-9 PINZA AMPERIMÉTRICA FLUKE A3004	44
2-10 GABINETE DE CONTROL.....	46
2-11 VARIADOR DE FRECUENCIA MITSUBISHI FR-S520E-1.5L-NA.....	46
2-12 PLC SIEMENS S7-200 Y EL MÓDULO DE EXPANSIÓN EM 235	47
2-13 PROGRAMACIÓN EN ESCALERA DE ARRANQUE Y PARO DEL SISTEMA	48
2-14 INTERRUPTORES TERMOMAGNÉTICOS PARA PROTECCIÓN	48
2-15 DIAGRAMA DE FLUJO PARA OBTENER LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LA BOMBA	51
2-16 DIAGRAMA DE FLUJO DE METODOLOGÍA A VELOCIDAD VARIABLE Y VELOCIDAD CONSTANTE.....	53
3-1 GRÁFICA DE TENSIÓN-FRECUENCIA.....	55
3-2 GRÁFICA DE CORRIENTE CONTRA FRECUENCIA.....	56
3-3 GRÁFICA DE POTENCIA ACTIVA CONTRA FRECUENCIA.....	56
3-4 GRÁFICA DE CURVAS CARACTERÍSTICAS A 60 HZ.....	57

3-5 GRÁFICA DE POTENCIA CONSUMIDA A VELOCIDAD CONSTANTE.	58
3-6. GRÁFICA DE POTENCIA CONSUMIDA A VELOCIDAD VARIABLE.....	60
3-7. POTENCIA CONSUMIDA A VELOCIDAD VARIABLE Y VELOCIDAD CONSTANTE.	61
3-8. POTENCIA CONSUMIDA (VELOCIDAD VARIABLE Y VELOCIDAD CONSTANTE) Y AHORRO.....	61
3-8. TARIFAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA ESTABLECIDAS POR CFE.	62
3-9. COSTO POR KWH Y EL AHORRO DE ENERGÍA.....	63
3-10. REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO ₂	66

RELACIÓN DE TABLAS

	Pág.
1-1 TABLA COMPARATIVA ENTRE LOS ELEMENTOS FINALES DE CONTROL.	24
2-1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA BOMBA SUMERGIBLE 50WQ0.55- 2P3V.	38
2-2 PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN DEL VARIADOR DE FRECUENCIA.	45
3-1. DATOS DE POTENCIA A VELOCIDAD CONSTANTE.....	58
3-2. DATOS DE POTENCIA A VELOCIDAD VARIABLE	59
3-3. COMPARACIÓN DE POTENCIAS DE AMBOS MÉTODOS DE REGULACIÓN DE FLUJO.	60
3-4. CONVERSIÓN DE KW A KWH.....	62
3-5. PRECIO DEL CONSUMO POR KWH EN CADA MÉTODO DE REGULACIÓN DE FLUJO.	63
3-6. DATOS DE COMPARACIÓN DE EMISIONES DE G CO ₂	65



ANTECEDENTES

Estudio sobre la tasa de ahorro de energía en condiciones de velocidad variable de etapas múltiples de una bomba centrífuga

Sang-Ho Suh, Rakibuzzaman, Kyung-Wuk Kim, Hyoung-Ho Kim, En Sik Yoon y Min-Tae Cho [30], del departamento de mecánica de la Universidad Soongsil, Corea del Sur. Con el objetivo de determinar el ahorro de energía para una bomba centrífuga multietapa para el sistema de caudal y presión variable. Por lo que realizaron un set experimental para obtener tasas de ahorro energético (Figura 0-1) y un análisis numérico mediante una simulación para validar los datos obtenidos de la bomba centrífuga multietapa modelo DR 20-60. Se consideró un ciclo de trabajo del sistema para calcular la tasa de ahorro energético. Donde las velocidades variables fueron determinadas con base en la curva característica del sistema.

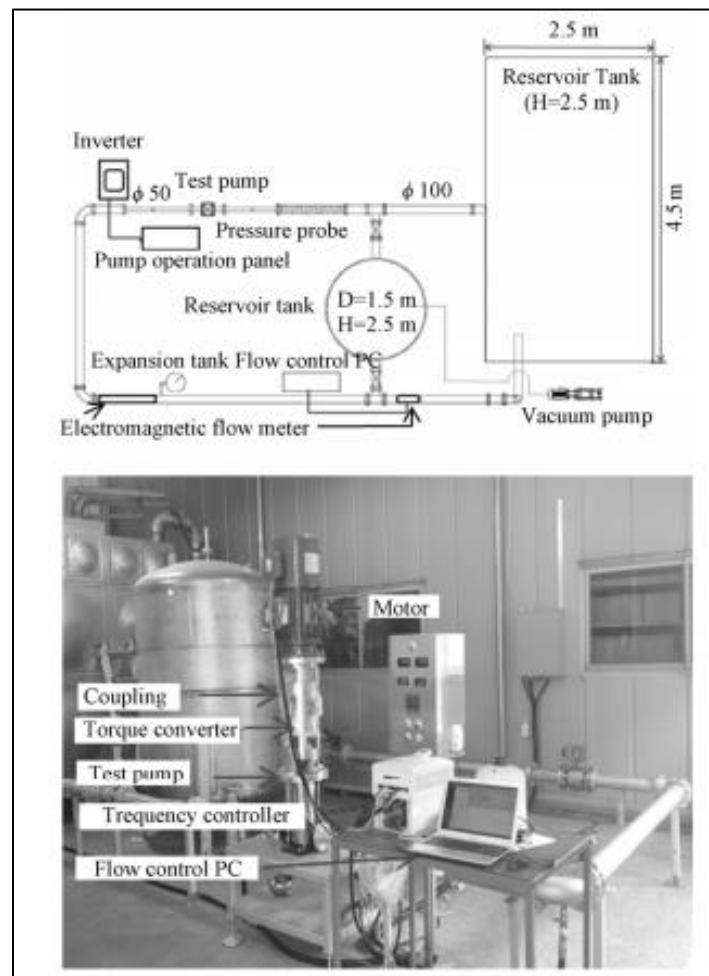


Figura 0-1 Módulo experimental [30].

Se realizaron pruebas experimentales en el módulo a diferentes velocidades de rotación para usar las mismas condiciones de funcionamiento, los datos fueron medidos con un transmisor de flujo electrónico, el cual está conectado al control de la computadora y el otro al medidor de flujo electromecánico convencional para mejorar la precisión. De igual modo, tenían dos transmisores de presión, uno a la entrada y el otro a la salida del sistema. Se calculó la potencia y la eficiencia del sistema, así como el ahorro energético que fue realizado por el producto del porcentaje del tiempo operando y la potencia de entrada del sistema. Por parte del método numérico de realizo una simulación por computadora, utilizando un método de malla por ANSYS ICEM-CFX-14.5 donde se hicieron tres suposiciones una bomba de tres dimensional incompresible, flujo de estado estable, y el flujo de turbulencia utilizando el modelo SST

El consumo energético a velocidad constante fue de 75, 770 kWh y a velocidad variable fue de 31,700 kWh. El ahorro total de energía fue de 44,070 kWh y el ahorro fue del 58,16% a un rango de funcionamiento de 24 m³/h a 2.4 m³/h. De esta forma se concluyó que las aplicaciones de los variadores de frecuencia pueden ser muy numerosas, por lo que el ahorro de energía se traduciría en una mejora del rendimiento y la vida útil del ciclo de la bomba.

Ahorro de energía con bombas de velocidad variable en riego bajo demanda sistemas

N. Lamaddalena y S. Khila [31]. El estudio se llevó a cabo en dos regadíos italianos, distritos gestionados por una organización de usuarios de agua, Consorcio de Capitanata. Llamados 1a (con un área de regadío de 564 ha) y 1b (que cubre un área de regadío de 445 ha) se ubican en la provincia de Foggia en la región de Puglia. Con el objetivo de analizar el ahorro energético en sistemas de riego por una estación de bomba de agua, para determinar el mejor modo de funcionamiento de la estación del bombeo. Fue implementado durante todo el periodo de riego.

Se implementaron tres tipos de regulación, la primera donde se instaló un inversor en la primera bomba, para una descarga de menos de 30 l/s, cuando la demanda supera esta descarga, la primera bomba comienza a operar a una velocidad variable proporcionando exactamente la descarga registrada por el medidor de flujo, el inversor garantiza la regulación del caudal modificando la frecuencia del motor. Para el segundo tipo de regulación se instálalo un inversor a cada bomba cuando la descarga a la red excede el máximo de carga de la primera bomba, la última trabaja a máxima velocidad y una segunda bomba comienza a funcionar a velocidad variable regulando por el segundo inversor. Y en el tercer tipo de regulación cada bomba está equipada con un inversor que regula la velocidad de rotación en función

de las necesidades del sistema (caudal y presión). Las bombas están reguladas de una manera que cada uno de ellos proporciona la misma descarga y el mismo cabezal de presión.

Por lo que al realizar las pruebas se demostró que el método de regulación tipo 3 era la mejor, ya que lograba un ahorro aproximado del 27% para el distrito 1a (Figura 0-2) y alrededor del 35% para el distrito 1b (Figura 0-3). Obteniendo más ahorro al implementar regulación de velocidad, ya que se proporciona exactamente la descarga y presión que requiere el sistema, de igual forma los valores de eficiencia son más altos que en los otros casos de estudio.

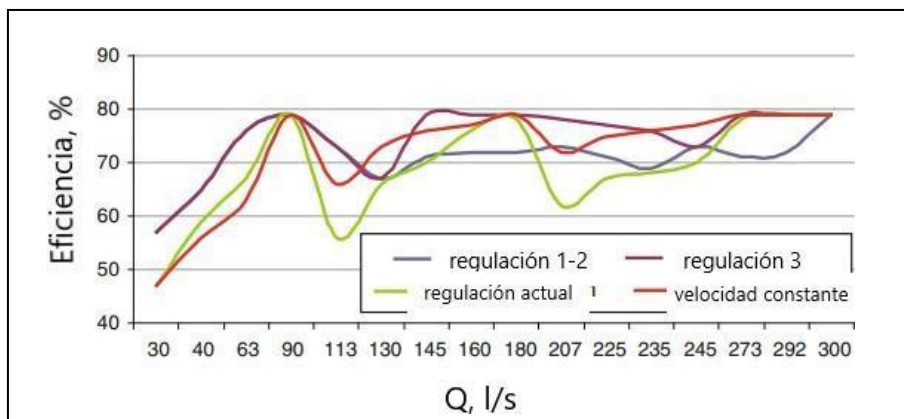


Figura 0-2 Eficiencia-flujo distrito 1a [31].

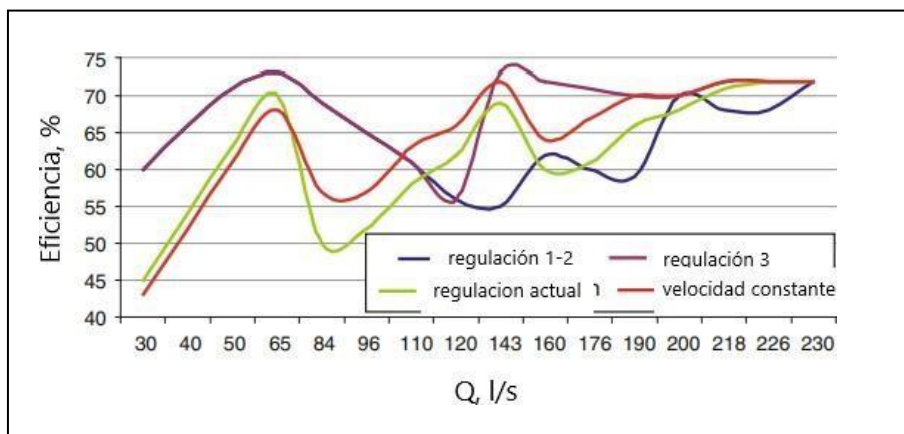


Figura 0-3 Eficiencia-flujo distrito 1b [31].

Válvula de control versus variador de velocidad para control de flujo

Muhammad H Al-Khalifah y Gregory K. McMillan [29]. Con el objetivo de proporcionar una introducción a las curvas de proceso, descripción general de los variadores de velocidad, leyes de afinidad, cuándo utilizar variadores de velocidad, ventajas de rendimiento.

Donde se abarcaron los temas de la bomba centrífuga, así como de sus curvas características que nos indica el comportamiento de la bomba en funcionamiento, el rendimiento de la bomba en términos de altura dinámica total, altura de succión positiva neta requerida) y eficiencia para el rango de capacidad del, de igual manera con base en esta curva se realiza la selección de la bomba. Mencionando ambos métodos de regulación de flujo, con el método de velocidad constante la más utilizada es la válvula y las válvulas de recirculación, que tienen desventajas como el mantenimiento constante, la energía desperdiciada debido a la caída de presión causada por la válvula de descarga y el reciclaje del flujo. Y de velocidad variable el variador de frecuencia, que suministra la presión y caudal que requiere el sistema, obteniendo ahorro de energía.

Concluyendo con que los variadores de velocidad pueden aumentar la eficiencia del proceso reduciendo el uso de energía. Lo ahorros son mayores para grandes caudales altas reducciones, procesos con fluidos difíciles y procesos extremadamente sensibles. Pero son necesarias las habilidades de control para garantizar que el diseño y la implementación serán de manera correcta y no se produzcan errores de ruidos y oscilaciones del proceso o sobrecalentamiento.

Sistema de control de presión para el suministro de agua en la central de servicios del centro médico nacional de la Raza

C.A. Solano, J.C. Reyes y U.T. Ortega [27], de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) Unidad Adolfo López Mateos, con el objetivo de desarrollar el sistema de control de presión del sistema de bombeo de agua de la Central del Centro Médico Nacional La Raza implementado variadores de frecuencia.

Aplicando una metodología basada en el ahorro de energía en las bombas centrífugas (Figura 0-4), con regulación de flujo a velocidad variable. Se calculó el punto de operación del sistema a los requerimientos de flujo, aplicando las leyes de afinidad para determinar la potencia consumida por el equipo. La propuesta de control se realizó con el punto de mayor de eficiencia de las bombas para que la bomba opere dentro de los límites de eficiencia, aprovechando la capacidad de operación de la bomba. Como resultado del consumo energético en el sistema fue de 806.17 kW, al implementar los variadores de frecuencia consumió 348.28 kW,

obteniendo un ahorro energético de 457.89 kW, es decir, un 57% menos. La magnitud del ahorro depende directamente del punto de operación del sistema, el cual está en función de la demanda del líquido del conjunto hospitalario.

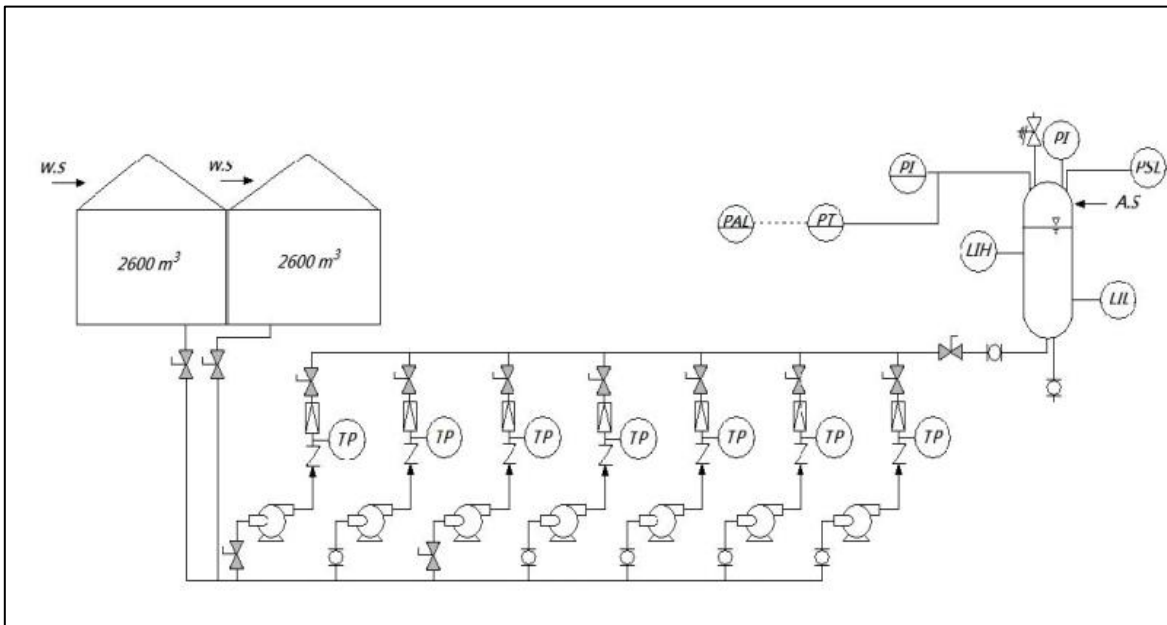


Figura 0-4 Diagrama de tubería e instrumentación del sistema de bombeo [27].

IMPLEMENTACIÓN DEL IIOT MEDIANTE COMUNICACIÓN GPRS EN UN MÓDULO DE FLUJO APLICANDO LA INDUSTRIA 4.0”

C. A. Uribe, E. A. Lara, J. L. Pérez [28], de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) Unidad Adolfo López Mateos, con el objetivo de implementar un sistema de monitoreo en un módulo didáctico de flujo, aplicando el IIOT hacia la industria 4.0 para la implementación de prácticas en el Departamento de Ingeniería en Control y Automatización

Se integró un gabinete con elementos para la industria 4.0; que son un controlador de flujo PLC S7-1200 además de dos módulos de expansión CP-1247 para comunicación GPRS y el SM-1234 de entradas y salidas analógicas para los transmisores del módulo de flujo, una antena para comunicación GPRS para envío de mensajes SMS para celular, de igual manera se integró un Router o Modem para conectar a la PC por vía Wireles y acceder al servidor Web desde el cual se monitorean las variables del módulo de flujo, COMO SE MUESTRA EN LA Figura 0-5. Se realizaron pruebas de continuidad, pruebas de forma local y remota,

arranque y paro de forma local y remota, gráficas de tendencias y paros del sistema al módulo de flujo.

Obteniendo como resultado la HMI y la página para el monitoreo con base en la norma ISA 101. Se podrá tener un monitoreo por medio de la página web solo si se tiene conexión con la red a la que esté conectado el PLC. Para los mensajes SMS siempre que el módulo de comunicación GPRS esté conectado a la red de telefonía y los teléfonos cuyos números estén registrados tengan cobertura de red, será posible el envío de mensajes de alarmas

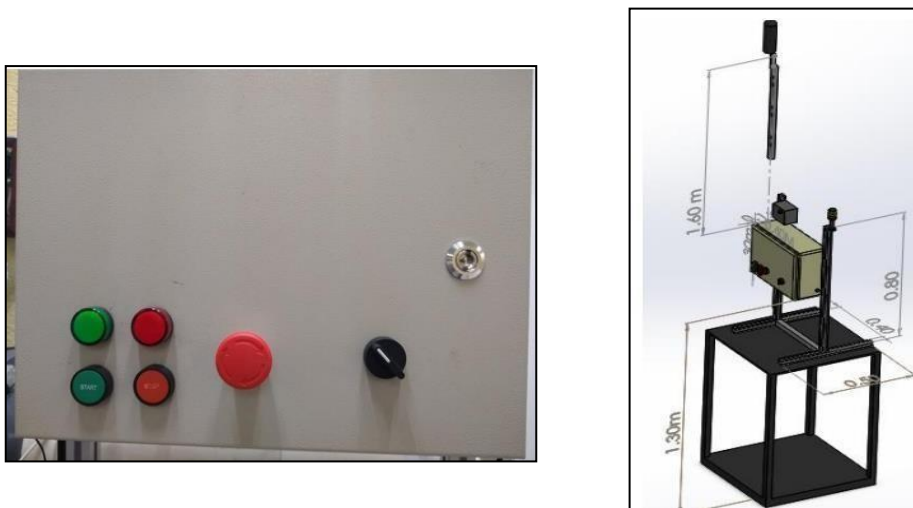


Figura 0-5 Gabinete integrado al módulo de flujo [28].

BANCO DE PRUEBAS PARA BOMBAS CENTRÍFUGAS CON PROTOCOLO IO-LINK

E Pérez, K. Osorio y M. A. Ortega [26], de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) Unidad Adolfo López Mateos, con el objetivo de desarrollar e implementar un banco de pruebas para bombas centrífugas trifásicas para obtener las curvas características mediante el uso del protocolo IO-Link y señales normalizadas de 4 mA – 20 mA.

Se realizó la configuración y programación del banco de pruebas para el protocolo IO-Link. Con los datos obtenidos en la HMI y empleando un analizador de potencia se pudieron trazar las curvas características carga/flujo, potencia/flujo y eficiencia/flujo de las bombas operando en serie, paralelo y de manera independiente.

Se obtuvieron las curvas características de las bombas de manera individual, operando en serie (Figura 0-6) y paralelo (Figura 0-7). Se comprobó de forma experimental y analítica que las pérdidas de carga dependen del tipo accesorio instalado, esto se debe a que cada accesorio tiene un coeficiente de pérdida K diferente.

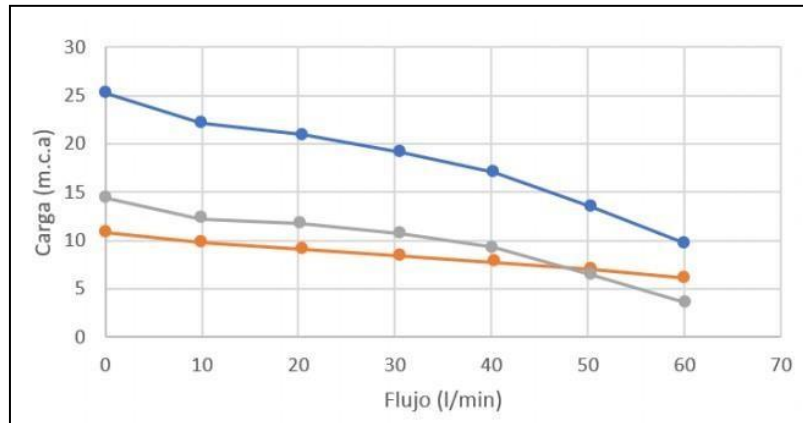


Figura 0-6 Curvas características de las bombas operando en serie con válvulas solenoides. [26].

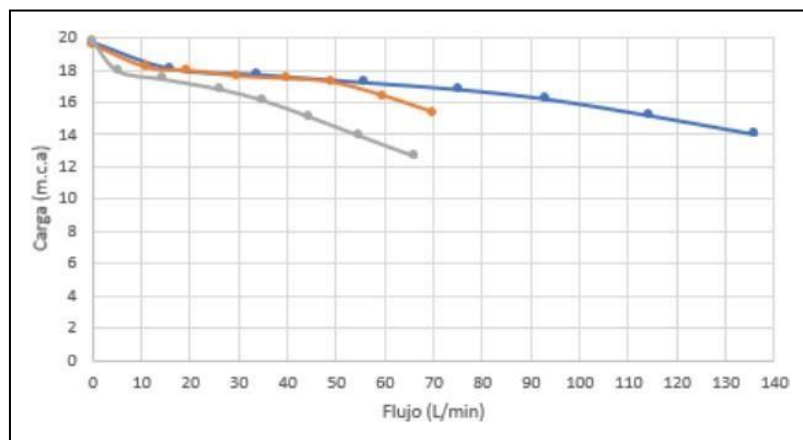


Figura 0-7 Curvas características de las bombas operando en paralelo sin válvulas solenoides [26].

IMPLEMENTACIÓN DE UN LAZO DE CONTROL DE FLUJO.

D. Alejo, C. I. Cruz [13], de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) Unidad Adolfo López Mateos, con el objetivo de implementar un lazo de control de flujo utilizando un medidor de flujo tipo magnético en un módulo didáctico para el Departamento de Ingeniería en Control y Automatización.

El módulo se generó a partir de un diseño para el uso de un transmisor de flujo magnético. Por lo que se diseñaron rectificadores de flujo que uniformizan el flujo, aplicando condiciones iniciales de operación que aseguren que la tubería este llena. Integraron transmisores de presión absoluta para monitorear la entrada y salida de la tubería de medición, para determinar la presión de la salida de la bomba.

Como resultado un módulo didáctico que contiene los elementos necesarios para visualizar las mediciones de los transmisores integrados al módulo de flujo por medio del HMI, además que es posible cambiar las ganancias del controlador PID y observar el comportamiento del flujo. Un módulo de control de flujo para que los alumnos puedan realizar prácticas reforzando el aprendizaje de Elementos Primarios de Medición y Elementos de Transmisión y Control.

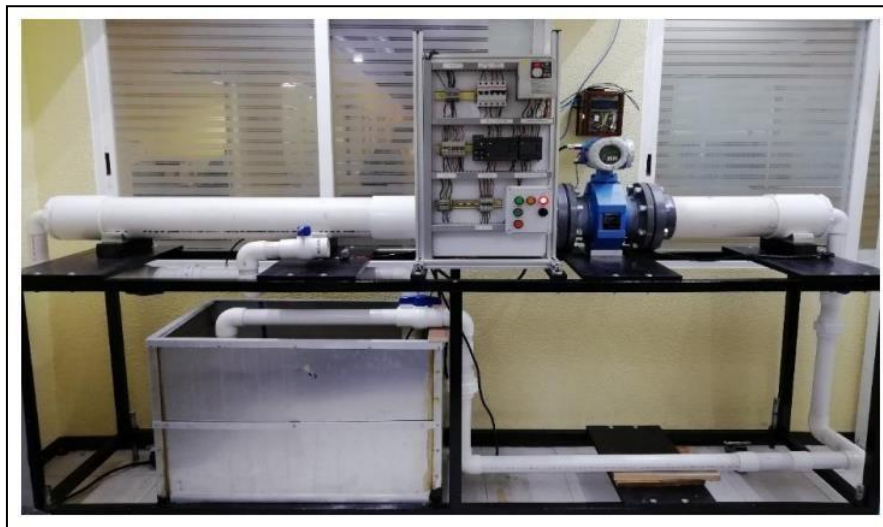


Figura 0-8 Módulo didáctico de flujo [13].

EMISIONES DE CO₂ POR PAÍS

El consumo energético mundial aumento en el 2018 casi el doble de la tasa promedio de crecimiento desde 2010. La energía con mayor demanda fue la electricidad, responsable de más de la mitad del crecimiento en las necesidades energéticas, mientras que la eficiencia energética tuvo una mejora pequeña. La demanda de electricidad aumentó un 4%, a más de 23000 TWh, casi dos veces más rápido que la demanda total de energía [19].

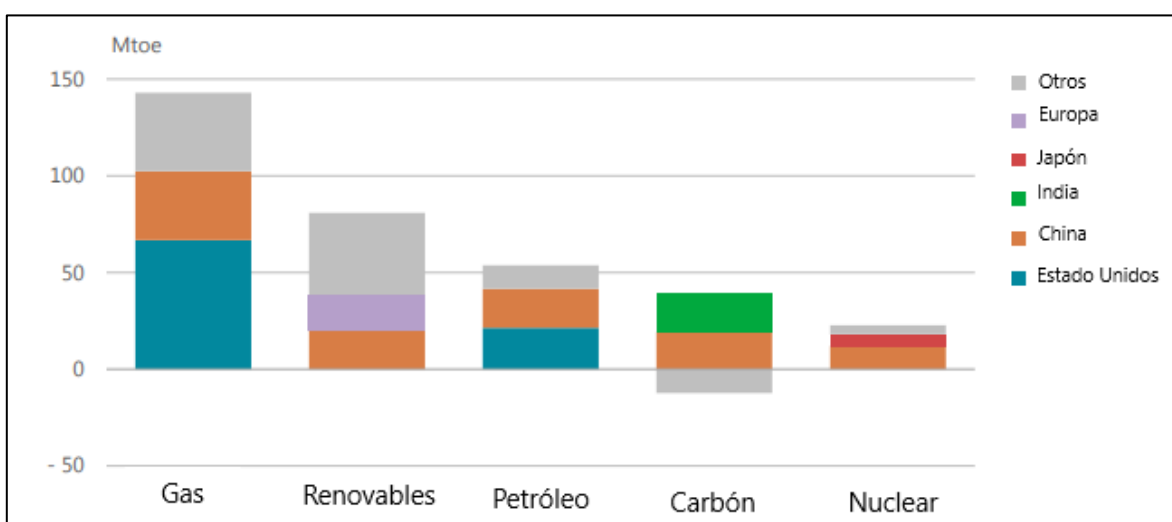


Figura 0-9 Crecimiento de la demanda mundial de energía primaria por combustible y regiones líderes, 2017-18 [19].

Las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía aumentaron en un 1.7%, hasta un máximo de 33.1 Gt de CO₂. Mientras que las emisiones de todos los combustibles fósiles aumentaron, el sector energético representó casi dos tercios del crecimiento de las emisiones. El uso de carbón en energía superó las 10 Gt de CO₂, principalmente en países como; Asia. China, India y Estados Unidos representaron el 85% del aumento neto de las emisiones, mientras que las emisiones disminuyeron en Alemania, Japón, México, Francia y Reino Unido. En la Figura 0-

10 se muestra el rango de emisiones CO₂ procedentes de la combustión de combustibles generado por cada país. En la figura 0-11 de igual modo se muestran las emisiones de CO₂ en cada continente del 2009 al 2019 [19].

El aumento de las emisiones fue impulsado por un mayor consumo de energía, así como de las condiciones climáticas en algunas partes del mundo, que llevaron al aumento de la demanda de energía para calefacción y refrigeración. En la Figura 0-12 se muestran los porcentajes de consumo de cada tipo de energía que generan emisiones de CO₂ [19].

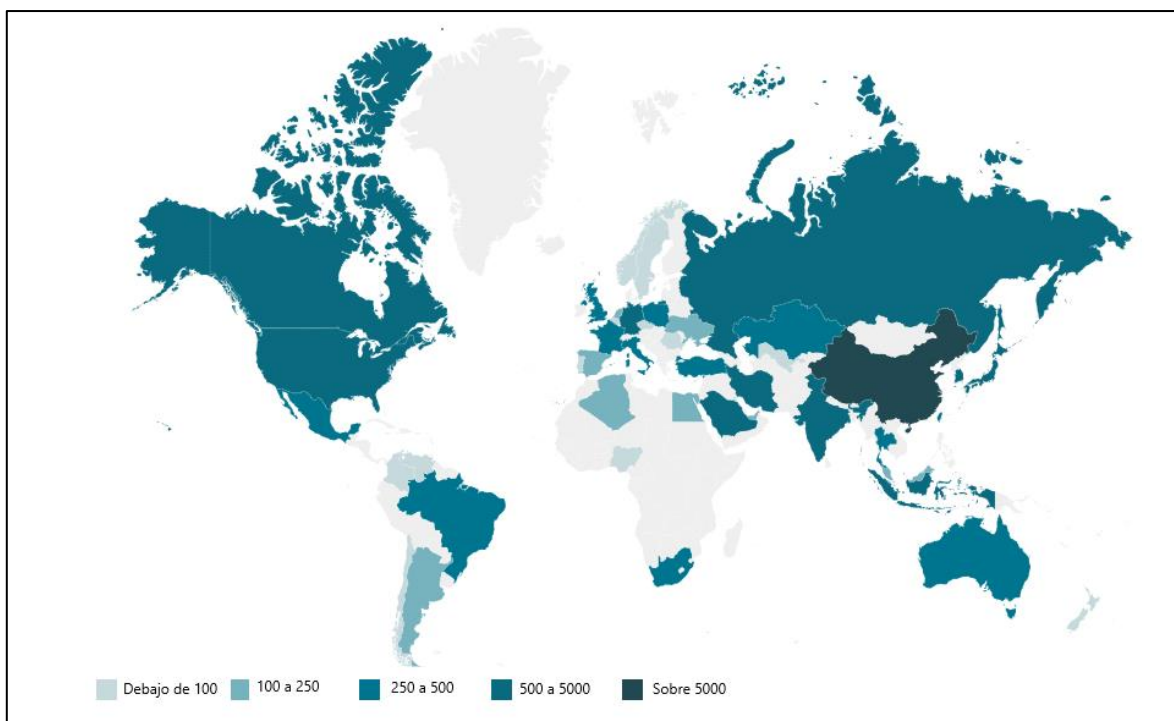


Figura 0-10 Emisiones de CO₂ procedentes de la combustión de combustibles (Mt CO₂) [32].

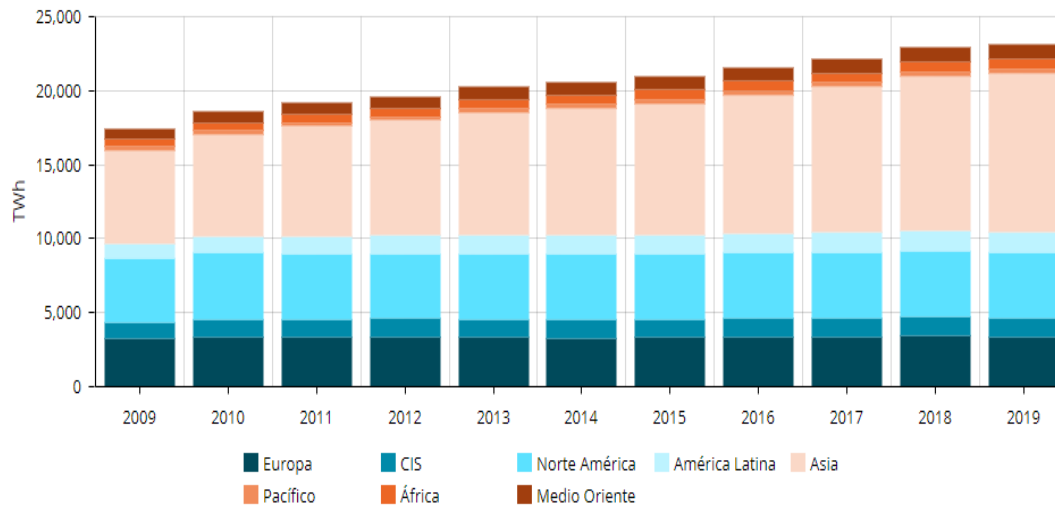


Figura 0-11 Emisiones de CO₂ 2009-2019 [32].

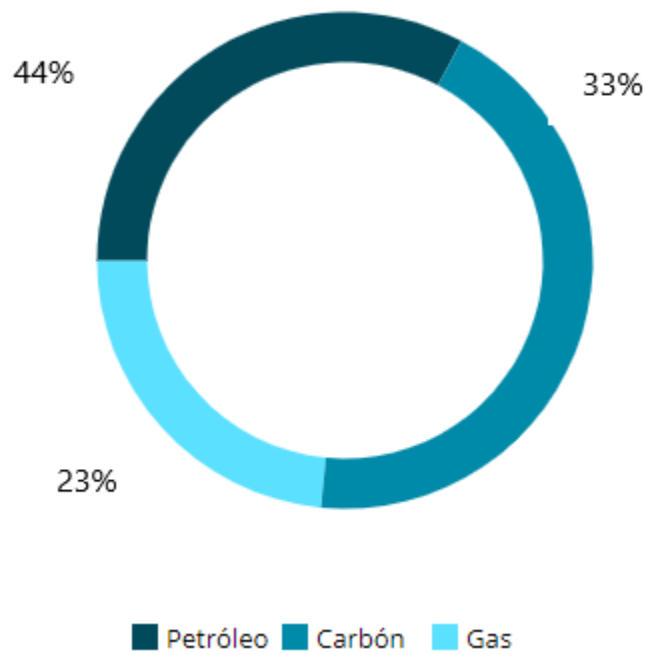


Figura 0-12 Desglose por tipo de energía 2019 [32].



CAPÍTULO 1.

DEMANDA DE LA ENERGÍA
ELÉCTRICA Y ELEMENTOS
FINALES DE CONTROL.

1.1 ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA INDUSTRIA

La energía eléctrica es un insumo primario, ya que es utilizada en la vida diaria de millones de habitantes en el mundo para actividades cotidianas o en la industria con actividades más sofisticadas y demandantes de energía, por lo que es un bien indispensable para los consumidores. Es necesario garantizar el suministro de electricidad de manera segura e ininterrumpida, para que los usuarios tengan acceso a bienes y servicios básicos, como: salud, educación, alimentación, promoviendo la calidad de vida y el bienestar de los habitantes.

Según la Secretaría de Energía (SENER), en su programa de desarrollo del sistema eléctrico nacional 2016-2030, la energía eléctrica es la segunda fuente de energía con mayor uso en México ocupando un 17.6% en el consumo energético nacional como se muestra en la Figura 1-1 [11].

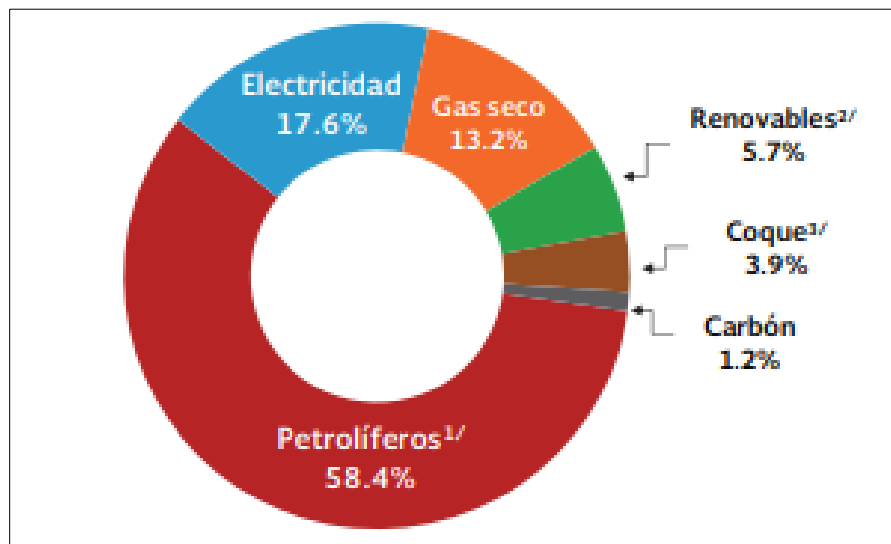


Figura 1-1 – Consumo energético por combustible [11].

Según la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) la industria es el principal consumidor de energía eléctrica a nivel mundial, expresado en la Figura 1-2, donde se comparan diferentes sectores y su consumo energético.

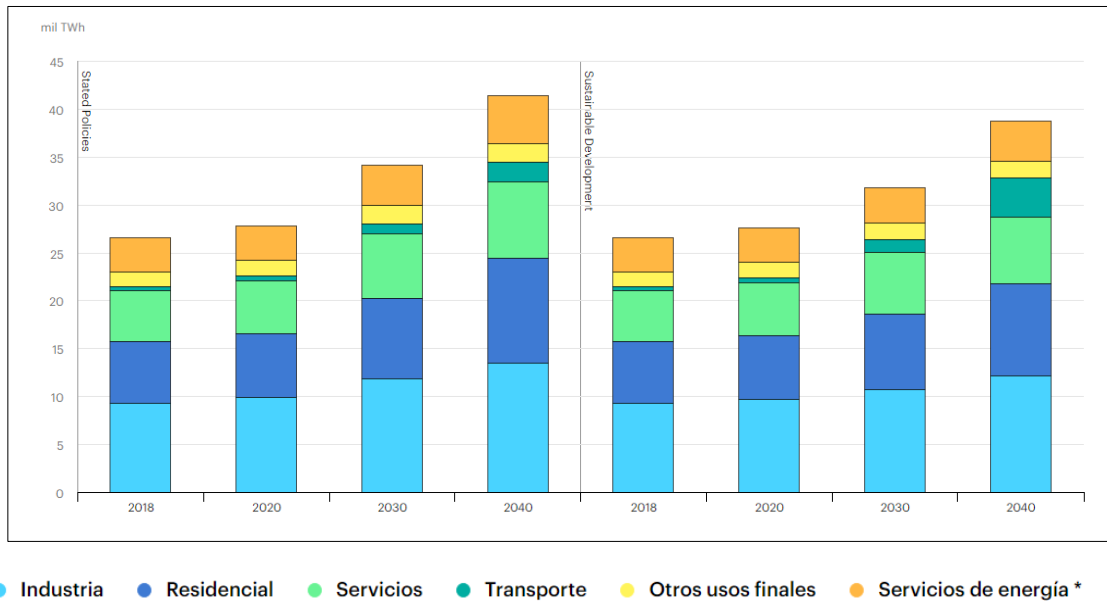


Figura 1-2 Demanda de electricidad por sector y escenario a nivel mundial [10].

1.1.1 Consumo de energía de motores eléctricos

En la industria el uso de motores eléctricos es habitual, debido a su función de transformar la energía eléctrica en energía mecánica, lo cual forma parte de diversos procesos, que requieren generar par y velocidad angular para hacer funcionar los dispositivos que estén conectados a él. Un motor eléctrico es más eficiente comparado con un motor de combustión interna, es más fácil de mantener debido a que requiere más sistemas auxiliares, es más fácil de adquirir y más extenso en sus aplicaciones [12].

Por su vasta aplicación en este sector, los motores eléctricos son los equipos que consumen un mayor porcentaje de la energía eléctrica industrial. Ocupando entre el 60% y el 70% (Figura 1-3) los equipos electromotrices, como los ventiladores, bombas, compresores, bandas transportadoras entre otras y que simultáneamente están acoplados a motores eléctricos [12].

1.1.2 Consumo de energía en México por sectores

Según la SENER, sector agropecuario consume un 22.6% de energía eléctrica del total de la energía requerida, por otro lado, el sector industrial consume un 33.4% de electricidad de su consumo energético total, el residencial consume un 34.4% de energía eléctrica, como se muestra en la siguiente imagen Figura 1-4 [11].

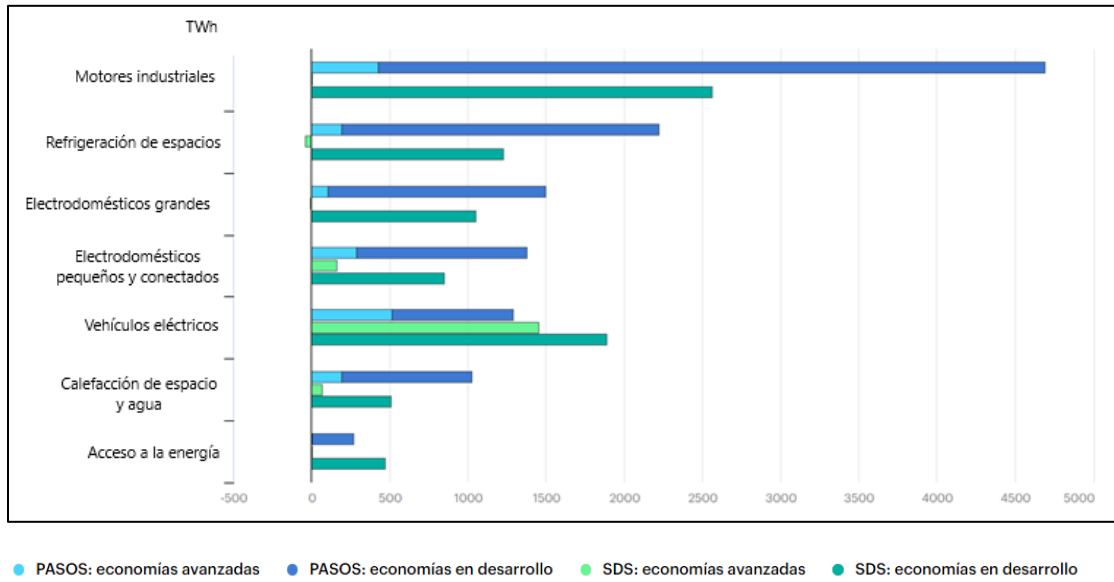


Figura 1-3 Crecimiento de la demanda de electricidad por uso final y escenarios en economías avanzadas y en desarrollo 2018-2040 [10].

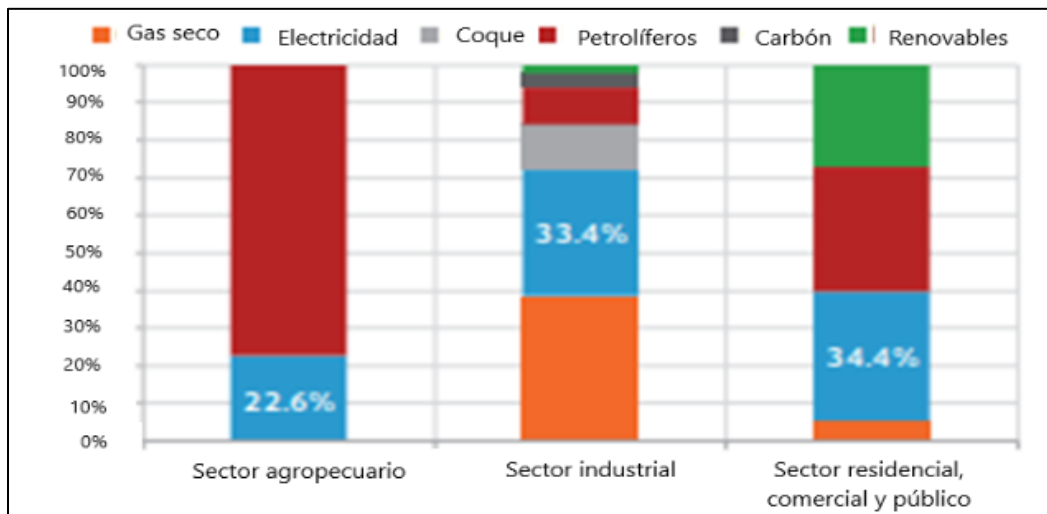


Figura 1-4 Consumo final energético por sector [11].

De acuerdo a datos de la IEA, los ahorros por eficiencia energética en el sector industrial es menor comparado con el transporte y edificios, por lo que se requieren implementar sistemas que reduzcan la demanda energética en este sector, aumentando el ahorro de energía y teniendo como consecuencia un beneficio mundial (Figura 1-5) [10].

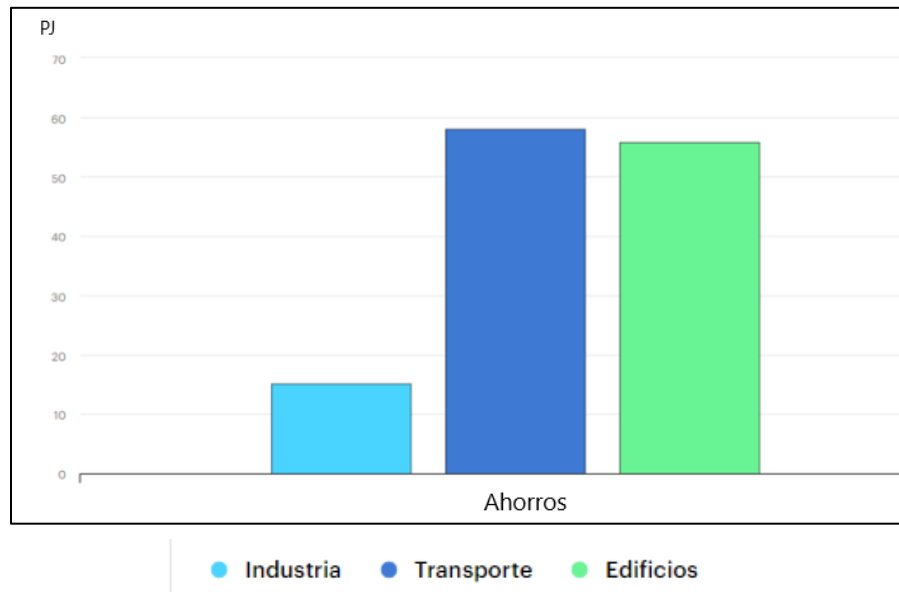


Figura 1- 5 Ahorros derivados de la eficiencia energética en México, 2014-2018 [10].

1.1.3 Impacto ambiental del aumento en la demanda de la energía eléctrica

El ser humano constantemente una mejora en su comodidad y bienestar. En consecuencia, de esta perseverante acción se ha originado un aumento desmesurado en el gasto de recursos naturales y energéticos capaces de generar impactos ambientales. Actualmente la huella ambiental es evidente, pues el cambio climático va en continuo incremento [20].

La exposición de contaminantes al medio ambiente que alteran la calidad del aire es generada por distintas fuentes, una de ellas es la producción de energía eléctrica, la industria, entre otras. Uno de los principales resultados de esta contaminación es el daño ambiental y el aumento de enfermedades respiratorias o cardiovasculares. Por ello se requieren acciones que ayuden con la reducción de la demanda energética y en consecuencia de gases contaminantes [20].

Importancia de reducir emisiones de CO₂ a la atmósfera

El dióxido de carbono (CO₂) es un gas que contamina al aglomerarse en las capas principales de la atmósfera terrestre. Los gases de efecto invernadero como el CO₂ permite que la radiación del sol pase a la atmósfera, donde la Tierra y los océanos absorben esta radiación lo que ocasiona que se calienten, para posteriormente reemitir la energía o radiación infrarroja, esta energía es absorbida por los gases de

efecto invernadero. De modo que la atmosfera se calienta y vuelve a emitir esta radiación en todos los sentidos, inclusive retorna a la superficie de la Tierra, la temperatura [19].

Referente a esta elevación de la temperatura, los océanos, los glaciares en los polos comienzan a derretirse. Además, el calentamiento global también trae consigo modificaciones en los ecosistemas y con ello la extinción de flora y fauna, entre otras cosas. Por lo que, se requiere de reducir la huella ambiental que el ser humano genera día con día. Según datos de la IEA en su informe de estado mundial de energía y CO₂ del 2019, 1 kWh consumido genera 475 g CO₂ [19].

1.2 AHORRO DE ENERGÍA EN SISTEMAS DE BOMBEO

Los sistemas de bombeo representan casi el 20% de la energía mundial utilizada por motores eléctricos y entre 25% y 50% del uso total de la energía eléctrica en el sector industrial. Por lo que existen diversas oportunidades para reducir su consumo energético a través de modernización y operaciones inteligentes. Los ahorros no solo se limitan a energía, también incluyen una mayor confiabilidad y una reducción de costos del ciclo de vida. La mayoría de los sistemas requieren un control de flujo, por lo que se utilizan válvulas de estrangulamiento, líneas de derivación o ajustes en la velocidad de la bomba [9].

1.2.1 Válvulas

Las válvulas son dispositivos mecánicos que estrangulan y/o controlan el paso de un flujo de un líquido, gas o vapor. Existen diversos tipos de válvulas, que se diferencian con base en el tipo de obturador y actuador que se emplee. El actuador es el encargado de convertir la señal del controlador en una señal para generar desplazamiento ya sea lineal o rotacional. La válvula de control tiene en la parte interna el obturador y los asientos y está preparada para conexión a la tubería roscada o bridada. El obturador se encarga del control de paso de fluido, está unido a un vástago que cruza a través de la tapa del cuerpo y es accionado por el servo motor. La posición entre el obturador y el asiento permite el paso del flujo, desde un caudal nulo (o casi nulo) hasta un máximo. [1].

La clasificación de las válvulas según el movimiento del obturador, son de movimiento lineal o rotativo.

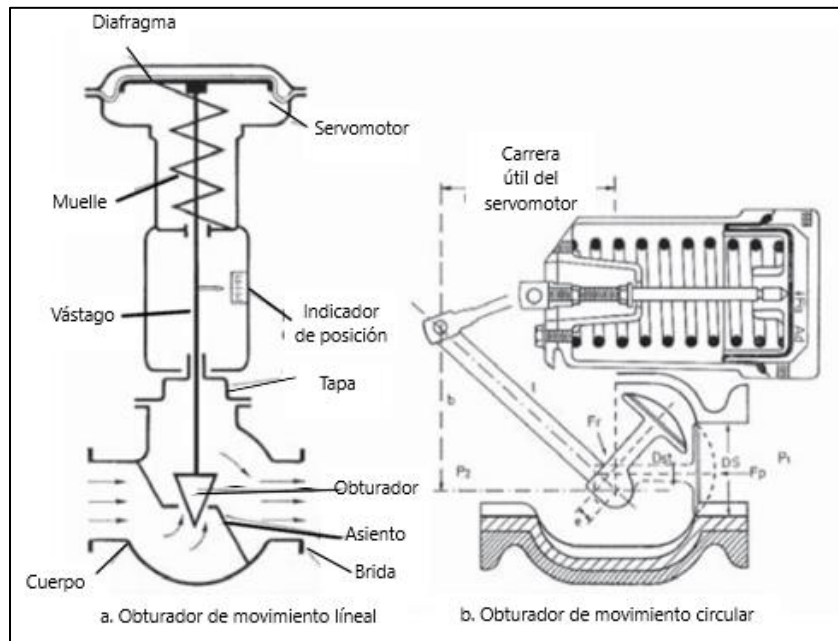


Figura 1- 6 Válvula de control típica [1].

Movimiento lineal

Las válvulas con movimiento lineal son las que su obturador se mueve en dirección de su propio eje, se clasifican en válvula de globo, válvula de ángulo, válvula de tres vías mezcladora o diversora, válvula de jaula, válvula de compuerta, válvula en Y, válvula de cuerpo partido, válvula Saunders y válvula de compresión [1].

Movimiento rotativo

Las válvulas con movimiento son: válvula de disco excéntrico rotativo (Camflex), válvula de obturador cilíndrico excéntrico, válvula de mariposa, válvula de bola, válvula de macho, válvula de orificio ajustable y válvula de flujo axial [1].

Válvulas esféricas manuales.

En el módulo de flujo se tiene una válvula manual esférica (Figura 1-7), estas válvulas esféricas tienen un mecanismo para regular el flujo de un fluido y se identifica por la forma de esfera perforada. Al iniciar la apertura el mecanismo interno gira unido al eje de la esfera, permitiendo el paso del fluido cuando se alinea la perforación con la entrada y la salida [1].

1.2.2 Variadores de frecuencia

En la industria los motores eléctricos juegan un papel importante, debido a que son empleados en diversas tareas. Funciona a base de energía eléctrica y requiere de una cantidad adecuada para generar el par y la velocidad angular requerida. Por ello, la tarea del variador de frecuencia es ajustar la velocidad de los motores eléctricos para que la energía eléctrica proporcionada al motor se acople a la demanda de la aplicación, obteniendo un ahorro energético del motor entre un 20% y un 70% [12].

Los variadores de frecuencia (Figura 1-8) se emplea para modificar la velocidad de bombas centrífugas, ventiladores y compresores. Varían el caudal de fluido y evitan la pérdida de energía que absorben las válvulas de control. El convertidor se alimenta con la potencia de la corriente alterna de la red convirtiéndola en una tensión o frecuencia variables de CA. Es controlada con la señal de 4 mA - 20 mA CC o 0 V- 10 V CC. La onda senoidal simulada que controla la velocidad de un motor de inducción asíncrono es la señal de salida del convertidor de frecuencia [1].

Los variadores de frecuencia están conformados por tres etapas, la primera llamada rectificador, donde se recibe la tensión alterna y se convierte a continua utilizando un puente de rectificadores, conformada por diodos y transistores. Posteriormente, en el circuito intermedio, se suaviza la onda y se produce un suministro de tensión continua limpio. Finalmente, el inversor convierte la tensión continua a un circuito de tensión y frecuencia variable por medio de pulsos generados, el variador calcula la tensión y corriente que necesita el motor (Figura 1-9) [2].

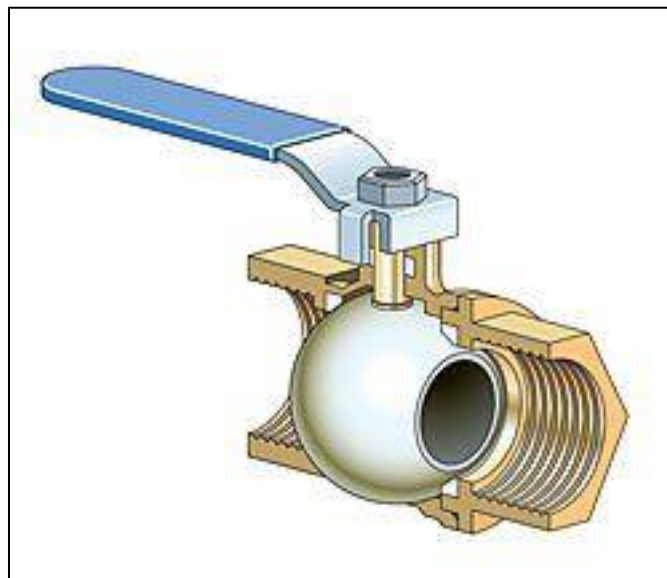


Figura 1-7 Válvula esférica [21].

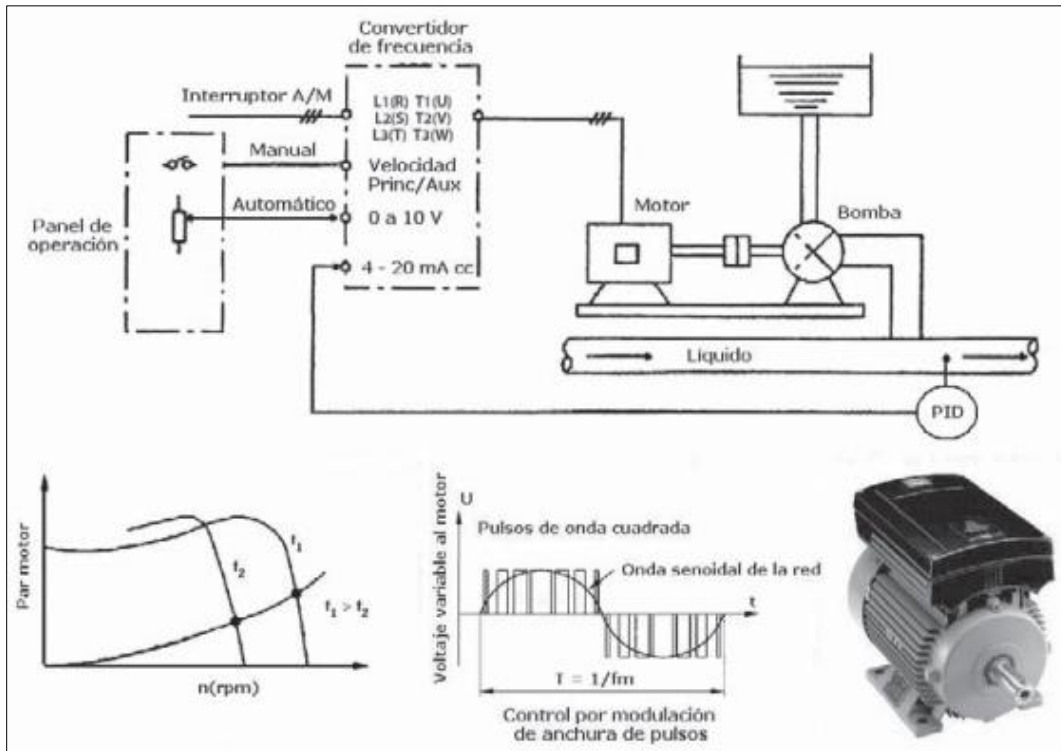


Figura 1-8 Funcionamiento de un variador alimentando un motor [1].

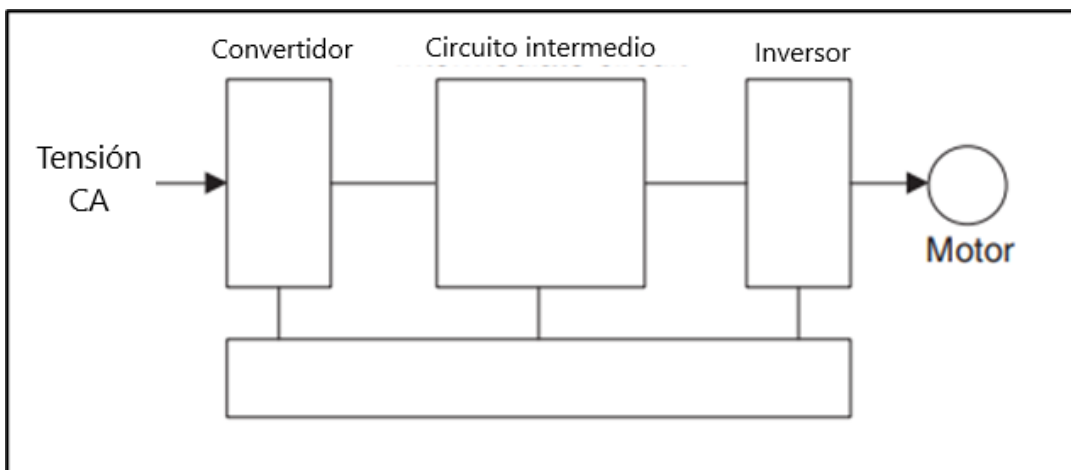


Figura 1-9 Configuración típica de un variador de frecuencia [2]

1.2.3 Ventajas y desventajas de válvula y variador de frecuencia

VÁLVULAS

Ventajas

Existe una gran diversidad de válvulas, por lo que deben ser bien seleccionadas para el tipo de proceso al que se van a implementar, para que cumplan con su propósito de manera satisfactoria.

Desventajas

Requieren un mantenimiento periódico debido al desgaste que se presenta en los sellos, al igual el sistema puede estar sujeto a aumentos repentinos de presión por lo que requiere más gasto energético

VARIADOR DE FRECUENCIA.

Ventajas

Una de las ventajas más notables es el ahorro energético que nos produce el variador de frecuencia ya que en algunas aplicaciones se ha logrado reducir entre el 30% y el 50% al implementarlo. De igual manera proporciona un control de proceso mejorado ya que las pequeñas variaciones de flujo se pueden corregir de manera más sencilla con un VFD que con otro control. Hay menos probabilidad de aumentos repentinos de flujo o presión cuando el dispositivo de control proporciona tasas de cambio [9].

Además, de la mejora de la fiabilidad del sistema ya que cada reducción de la velocidad que proporcione el variador de frecuencia repercute positivamente a reducir el desgaste de la bomba. Igualmente, los periodos de tiempo entre mantenimiento o averías son más prolongados [9].

Desventajas.

No en todos los procesos es posible suplir la válvula por variadores de frecuencia debido a que no se cuentan con ciertas especificaciones para hacerlo, como la falta de un motor o en ocasiones el flujo que maneja la bomba se manda a diversas partes, por lo que no es posible implementar este dispositivo. Además de que la inversión de estos equipos. llega a ser alta, incluso en ocasiones mayor al del motor, por lo que no es viable.

1.3 APLICACIONES EN LA INDUSTRIA

Cada proceso es diferente, por ello se busca seleccionar dispositivos que cumplan con las características que se requieran en el proceso. De forma que los instrumentos seleccionados deben contribuir a que el proceso sea eficaz y eficiente.

1.3.1 Válvulas en la industria

- Válvulas de compuerta: Debido a sus características y operación sencilla, es utilizada en diversos sectores como en petróleo, gas, líquidos espesos, vapor, líquidos corrosivos, entre otros.
- Válvulas de globo: Es utilizada en servicios en general, líquidos, gases y líquidos corrosivos.
- Válvula de bola: Servicios en general, en temperaturas altas y masas semilíquidas.
- Válvulas de mariposa: Servicios en general, líquidos, gases, líquidos con sólidos en suspensión.
- Válvulas de diafragma: Fluidos corrosivos, materiales pegajosos o viscoso, masas semilíquidas fibrosas, lodos, alimentos, farmacéutica.
- Válvulas Check: Son válvula de retención utilizadas en la industria de gas y petróleo, petroquímico, energético, en mar adentro en entornos severos.

1.3.2 Aplicaciones de los variadores de frecuencia en la industria

- Compresores y sopladores.
- Grúas.
- Ascensores y montacargas.
- Cabrestantes.
- Bombeo de agua.
- Torres de refrigeración
- Atmósferas potencialmente explosivas.
- Cemento, química, alimentación y bebidas.
- Marina.
- Dominio de par y velocidad.
- Regulación sin golpes mecánicos.

Tabla 1-1 Tabla comparativa entre los elementos finales de control.

Elemento final de control	Válvula	Variador de frecuencia
Inversión	Las válvulas de control requieren una gran inversión dependiendo del proceso.	Los variadores de frecuencia requieren una gran inversión dependiendo del proceso.
Integración al proceso	Al haber gran variedad de válvulas cumplen con su propósito de manera satisfactoria al ser bien seleccionadas.	Se deben cumplir con ciertas características en el proceso y una selección adecuando para integrarlo de manera satisfactoria.
Consumo energético	Tiende a consumir más energía eléctrica al variar su apertura ya que eleva la presión del sistema.	Representa un ahorro de energía eléctrica ya que solo suministra la que necesita el motor.
Ventajas para el proceso.	Gran variedad de válvulas de control.	Ahorro energético, prolongación de vida útil de los elementos donde se incorporen.
Mantenimiento	Debe ser periódico debido al desgaste que se presenta al variar su apertura.	Es reducido en comparación con una válvula.

1.4 BOMBAS CENTRÍFUGAS

Las bombas se utilizan para impulsar líquidos a través de sistemas de tuberías. Tienen como objetivo mover el flujo que se requiere y a la vez desarrollan la carga dinámica total, generada por los cambios de elevación, diferencias en las cargas de presión y de velocidad, y todas las pérdidas de energía en el sistema [4].

Una bomba centrífuga está conformada básicamente por elementos dinámicos y estáticos. Donde el líquido por parte de la presión atmosférica o la de proceso, es forzado a pasar por un conjunto de álabes en movimiento. Estos álabes forman un impulsor que genera velocidad, la cual se transforma en presión al descargar el líquido sobre el espacio disponible en la carcasa de la bomba [14].

En la Figura 1-10 se muestra el impulsor, donde se observan los dos componentes que imprimen velocidad al líquido. Una de las componentes posee dirección radial

y la otra tangencial, dando como resultado una velocidad absoluta, que pertenece a la del líquido [14].

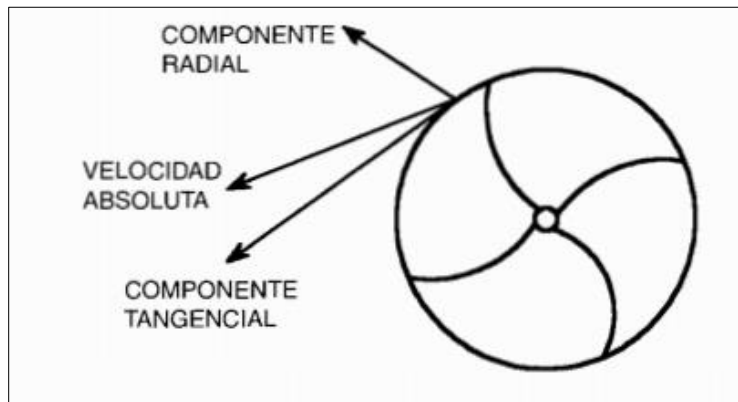


Figura 1-10 Impulsor de bomba centrífuga [14].

1.4.1 Curvas características

La carga de la bomba (H) es la energía mecánica transferida por la bomba al líquido que se está bombeando. Esta se presenta por la altura de la columna de líquido. La potencia (P) es la capacidad para realizar un trabajo, existen diferentes potencias en una bomba, la más utilizada es la potencia útil (PQ) que es la potencia que se transmite de la bomba al líquido. La otra es la potencia de entrada o potencia del eje (P) [5].

Para las curvas características existen diversas variables importantes que determinan las condiciones de funcionamiento de una bomba, estas variables se dividen en dos categorías. Las variables hidráulicas, siendo el flujo (Q) y la carga total (H). Las variables mecánicas, que son la velocidad de rotación angular (n) y la potencia del eje (P). Estas variables se relacionan por la eficiencia de la bomba [5].

Para determinar las curvas características de la bomba se debe seleccionar una variable hidráulica y una mecánica. Usualmente son utilizadas el caudal (Q) y la velocidad de rotación (n). Normalmente éstas son proporcionadas por el fabricante [5].

Curvas características H-Q

En las bombas centrífugas la curva característica de la carga contra flujo (Figura 1-11) posee una forma parabólica, donde el punto máximo usualmente está muy cerca

o en el eje vertical. La pendiente de la curva es dependiente del ángulo de los álabes. Cuando disminuye el ángulo de la salida del álabe, la pendiente de la curva incrementa. Cualquier cambio en el flujo repercute en un cambio agudo en la carga de la bomba [5].

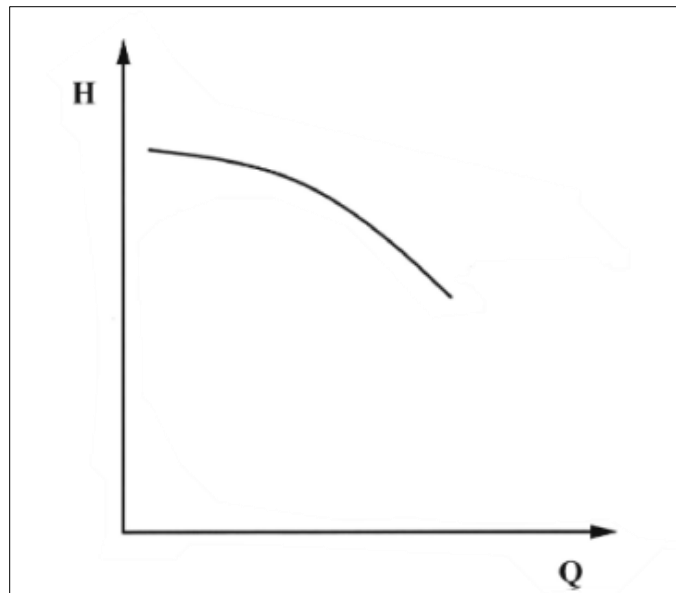


Figura 1-11 Curva característica carga-flujo de una bomba centrífuga [5].

La ecuación 1-1 se emplea para obtener la carga de la bomba:

$$H = \frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} - \frac{P_1}{\rho g} + z_2 - z_1 + H_f$$

(1-1)

Donde V_2 y V_1 son velocidades, mientras que P_1 y P_2 son las presiones de entrada y salida respectivamente, g es la aceleración de la gravedad, ρ corresponde a la densidad del fluido, H_f son las pérdidas hidráulicas en el impulsor y la bomba, Z_1 y Z_2 es la diferencia de alturas geométricas y se define a partir de un nivel de referencia establecido respecto al eje de la bomba.

Curvas características P-Q

La forma de la curva característica de la potencia (Figura 1-12) cambia con respecto a la velocidad. En bombas centrífugas donde se tienen velocidades específicas bajas, la pendiente de la curva aumenta cuando el flujo se incrementa. Inclusive tiene un punto máximo. Dependiendo de las condiciones de trabajo que tenga la bomba y la probabilidad de incremento del flujo, se puede elegir la potencia del motor, fundamentado en el punto máximo de la curva característica P-Q. La potencia del motor es el trabajo o la energía que desarrolla en la unidad de tiempo [5].

La siguiente ecuación (1-2) es para calcular la potencia hidráulica.

$$P_H = Q * H * \rho * g \quad (1-2)$$

Donde Q representa al flujo, H es la carga calculada de la bomba, ρ representa la densidad del fluido y g la aceleración de la gravedad.

Curvas características η -Q

La curva característica de la eficiencia (Figura 1-13) de la bomba generalmente posee una forma como la mostrada y se una con la coordenada Q en dos puntos, cuando $Q=0$ y $Q = Q_{\text{máx}}$. Entre estos puntos se encuentra la eficiencia máxima, la cual muestra la óptima condición de funcionamiento de la bomba. Se recomienda que las condiciones de trabajo de la bomba se seleccionen con base en este punto [5].

En la ecuación 1-3 se muestra la expresión de la eficiencia por medio de las potencias.

$$\eta = \frac{P[kW]}{P_H[kW]} \quad (1-3)$$

Donde η representa la eficiencia, P la potencia eléctrica y P_H la potencia hidráulica.

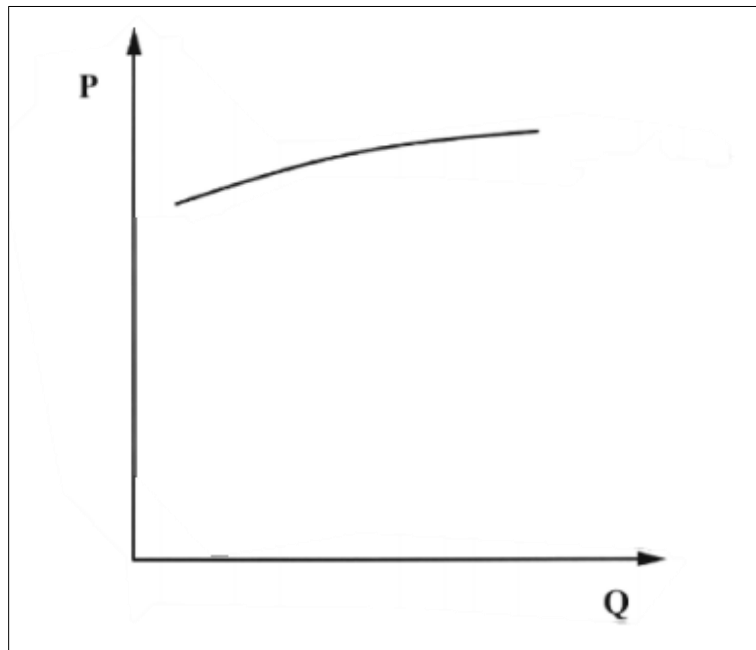


Figura 1-12 Curva característica potencia-flujo de una bomba centrífuga [5].

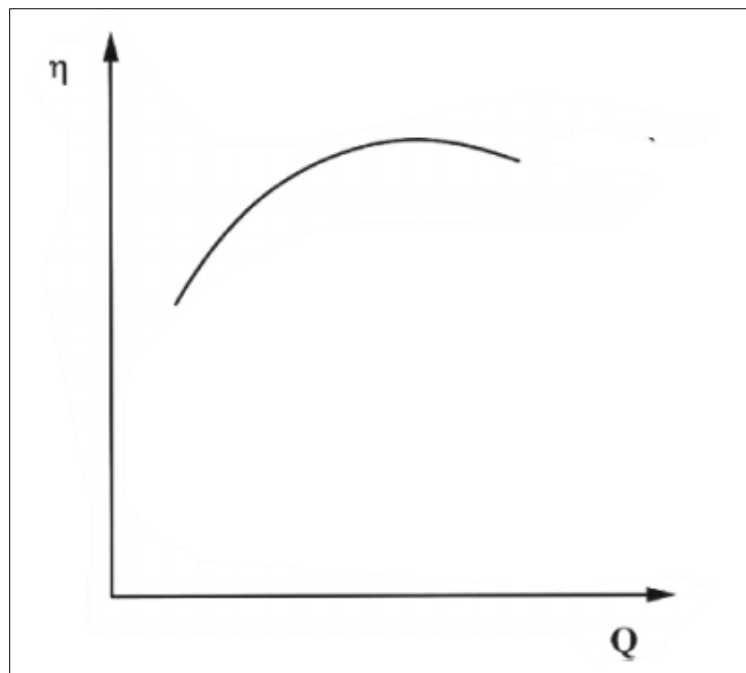


Figura 1-13 Curva característica eficiencia-flujo de una bomba centrífuga [5]

1.4.2 Leyes de afinidad

Las leyes de afinidad representan que las curvas características se comportan de la misma manera para bombas semejantes. Estas muestran la relación entre el flujo, carga y potencia referente a la velocidad angular [5]. Se expresan de la siguiente forma:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \frac{H_1}{H_2} = \left[\frac{N_1}{N_2} \right]^2 \quad \frac{P_1}{P_2} = \left[\frac{N_1}{N_2} \right]^3 \quad (1-4)$$

En la ecuación anterior, Q es el flujo, N es la velocidad angular, H representa la carga de la bomba, P representa la potencia proporcionada por el motor eléctrico. Los subíndices 1 y 2 representan las condiciones iniciales y finales.

1.5 PARÁMETROS MECÁNICOS Y ELÉCTRICOS EN BOMBAS

Existen dos tipos de parámetros que se emplean para determinar las curvas características de las bombas centrífugas, siendo estos los mecánicos y eléctricos. En los parámetros eléctricos se encuentra la tensión, la corriente, la potencia eléctrica, entre otros. Mientras que en los parámetros mecánicos se incluyen el flujo, carga o altura de la bomba, potencia hidráulica y eficiencia.

1.5.1 Flujo y presión

Las variables de proceso que se miden en una bomba centrífuga para determinar las curvas características son el flujo y presión, las cuales se mencionan a continuación:

Medición de flujo.

Se define como flujo a la cantidad de fluido que pasa a través de una sección transversal por unidad de tiempo [4]. Se tienen dos clasificaciones para el flujo de

un fluido, las cuales son: flujo volumétrico (q) que representa el volumen de un fluido que transita en un sector de un ducto o tubería por unidad de tiempo [1].

$$q = Av \tag{1-5}$$

Donde A corresponde al área transversal por donde circula el fluido y V indica la velocidad promedio del flujo.

El otro tipo es el flujo masico (q_m) a la masa de un fluido que transita en un sector por unidad de tiempo [1]

$$q_m = \rho Q \tag{1-6}$$

Existen diversos dispositivos que miden el flujo. Algunos la miden de forma directa, mientras que otros solo miden la velocidad promedio para después determinar el flujo volumétrico, algunos requieren calibración o emplear un coeficiente de descarga en la ecuación representativa del instrumento. La salida del medidor de flujo influye en la selección del instrumento medidor. La selección del tipo de medidor de flujo se basará en distintos factores como: alcance o intervalo de medición, exactitud requerida, pérdida de presión, tipo de indicación, tipo de fluido, calibración, entre otros [4].

Hay dos tipos de medidores de flujo, los volumétricos y los másicos. En la industria se emplean mayormente los dispositivos que manejan la presión diferencial al paso del fluido. Algunos de estos dispositivos son el tubo Venturi, el tubo Annubar, el tubo Pitot y la placa de orificio [1].

En el módulo didáctico se tiene instalado un transmisor de flujo magnético el cual tiene la ventaja de medir el flujo sin ninguna obstrucción, por lo que su caída de presión es mínima. Este trabaja bajo el principio de la ley de Faraday (Figura 1-14) que establece que “la tensión inducida en cualquier conductor mientras se mueva en ángulos rectos a través del campo magnético es proporcional a la velocidad de ese conductor”. Estos tipos de transmisores no tienen piezas móviles y son ideales para mediciones en aguas residuales, agua potable o cualquier líquido que sea conductor o tenga base de agua, igualmente son ideales para sistemas que requieran baja caída de presión y poco mantenimiento [15].

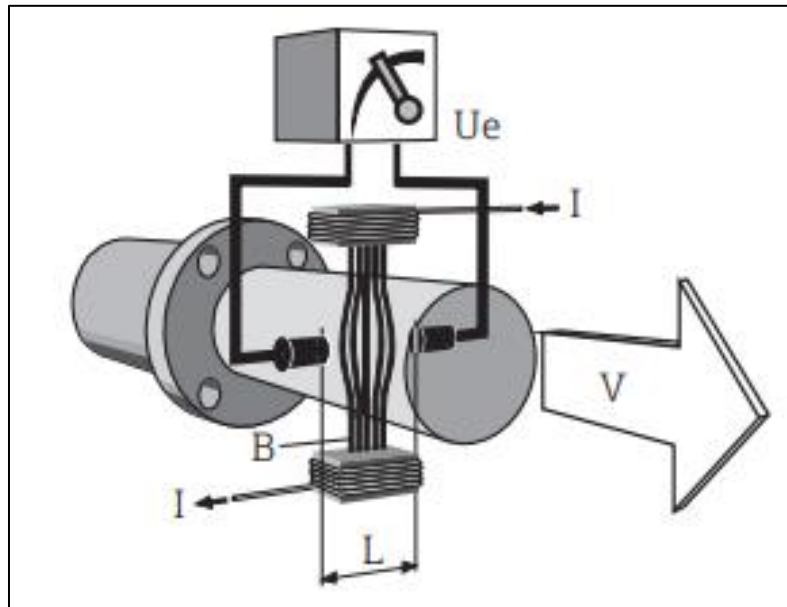


Figura 1-14 Funcionamiento de un transmisor magnético [15]

Donde U_e representa la tensión hidráulica inducida, B es la inducción magnética o campo magnético, L se refiere al espacio entre los electrodos, v la velocidad del flujo, Q es el flujo volumétrico, A la sección transversal de la tubería.

Medición de presión.

La presión es una fuerza por unidad de superficie, que puede ser expresada en unidades como kg/cm^2 , bar, atm y Pa. Se debe considerar que la medición de la presión puede ser absoluta, manométrica o diferencial [3].

$$P = \frac{F}{A} \quad (1-7)$$

Donde F representa a la fuerza y A representa el área.

Cuando se realizan cálculos que impliquen la presión se debe tener una presión de referencia, la cual es la presión atmosférica. En cambio, cuando la presión se mide con referencia al vacío se denomina presión absoluta. La siguiente ecuación corresponde a ambas escalas de medición de la presión [4].

$$P_{abs} = P_{man} + P_{atm} \quad (1-8)$$

La presión absoluta (P_{abs}) es medida con referencia al cero absoluto de presión. En la Figura 1-15 se representa en los puntos A y A' [1].

La presión atmosférica (P_{atm}) es la presión que ejerce la atmosfera terrestre, es medida con un barómetro a nivel del mar y corresponde aproximadamente a 760 mm (29.9 plg Hg) [1].

La presión diferencial es la diferencia entre dos presiones. En la Figura 1-15 se representa en los puntos C y C' [1].

La presión manométrica o relativa (P_{man}) es la diferencia entre la presión absoluta y la atmosférica. Cuando la presión absoluta es mayor a la atmosférica la presión relativa tendrá signo positivo. Por el contrario, la presión absoluta es menor a la atmosférica, la presión relativa tendrá signo negativo [1].

A la presión medida por debajo de la atmosférica se le conoce como vacío, es la diferencia entre la presión atmosférica y la absoluta. En la Figura 1-15 se representa en los puntos D, D' y D'' [1].

Existen diversos elementos para la medición de presión, divididos en elementos mecánicos, elementos electromecánicos y electrónicos de vacío.

Elementos electromecánicos.

Estos utilizan un elemento mecánico junto con un transductor eléctrico, el cual va a generar una señal eléctrica. Los elementos electromecánicos se clasifican según su funcionamiento, como: resistivo, magnético, capacitivo, extensométrico y piezométrico.

Elementos mecánicos.

Los elementos primarios de medida directa, los cuales miden la presión comparándola con un líquido de densidad y altura conocida, como pueden ser los barómetros, manómetro de tubo en U, manómetro de tubo inclinado, entre otros. Y por otra parte los elementos primarios elásticos los cuales se deforman con la presión interna del fluido que contienen, siendo algunos elementos mecánicos son, el tubo de Bourdon, el elemento en espiral, el diafragma y el fuelle

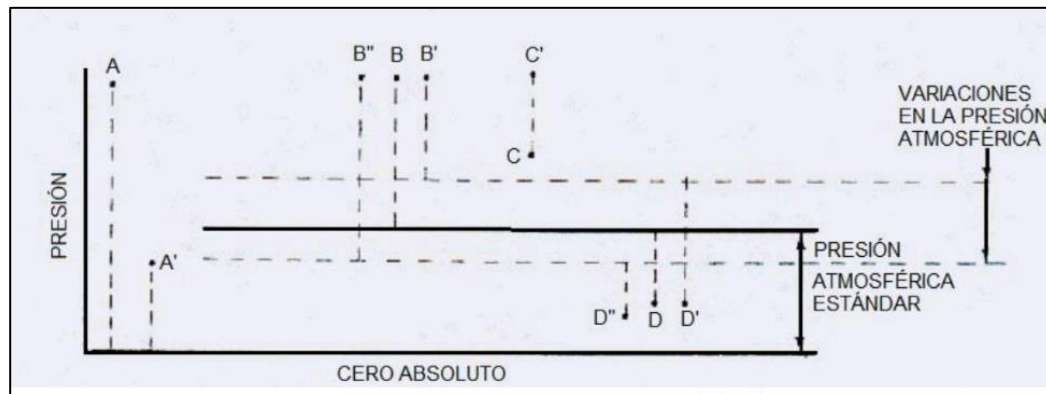


Figura 1-15 Tipos de presión [1].

1.5.2 Potencia eléctrica

La potencia (P) es la cantidad de energía utilizada en determinado tiempo, como se expresa en la siguiente ecuación:

$$P = \frac{W}{t} \quad (1-9)$$

Donde la P representa a la potencia en W, W representa la energía en J y la t es el tiempo en s.

La potencia aparente es la combinación fasorial de potencia resistiva (potencia real o activa) y potencia reactiva. Su unidad es el voltamper (VA).

$$P_a = P_r^2 + P_{real}^2 \quad (1-10)$$

La potencia reactiva es la rapidez a la cual la energía es guardada y regresada a la fuente por un capacitor o un inductor. Su unidad es el VAR.

$$P_{real} = P_a \cos\theta \quad (1-11)$$

La potencia real es la disipada en el circuito, casi siempre en forma de calor.

$$P_{real} = P_a \cos\theta$$

(1-12)

El triángulo de potencia (Figura 1-16) es la representación gráfica de la relación entre la potencia, aparente, potencia activa y potencia reactiva.

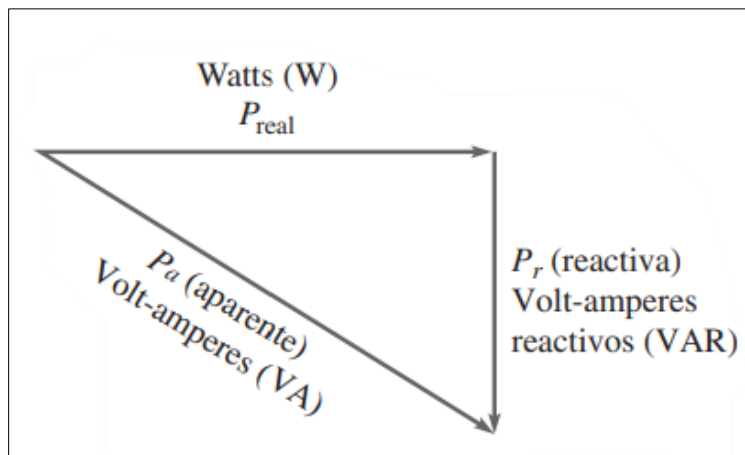


Figura 1-16. Triángulo de potencia [2].

La potencia nominal es la cantidad máxima de potencia que un resistor puede disipar sin ser dañado por la acumulación excesiva de calor.

El factor de potencia (PF) indica cuanto de la potencia aparente es potencia real.

$$PF = \cos\theta$$

(1-13)



CAPÍTULO 2.
**INSTALACIÓN Y METODOLOGÍA
EXPERIMENTAL**

2.1 DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

En el laboratorio B09 ubicado en el Laboratorio Pesados I, del Departamento de Ingeniería en Control y Automatización (ICA) de la ESIME Zacatenco, se cuenta con un equipo dedicado a la medición y control de flujo que está integrado de diversos equipos, tales como: un transmisor de flujo tipo magnético, dos transmisores de presión dedicados a la medición y alarmas por presión alta en el módulo, así como para establecerlos permisivos que no permiten poner a operar el módulo si se tiene una presión alta por una válvula cerrada en la descarga. También cuenta con rectificadores de flujo, dos corriente arriba del medidor de flujo y uno corriente abajo asegurando la medición correcta [13].

Al igual está integrado un controlador lógico programable (PLC), el cual recibe señales de los instrumentos y envía una acción de control al variador de frecuencia que en conjunto con el motor eléctrico de la bomba sumergible regula el flujo en la tubería. Se tiene una válvula check que impide el regreso del flujo en la salida de la bomba; también se dispone de cuatro válvulas esféricas, la válvula V2 genera perturbaciones en el módulo y también permite regular el flujo que circula por la instalación. En el DTI de la instalación (Figura 2-1) se muestran la instrumentación y el orden de estos instrumentos [13].

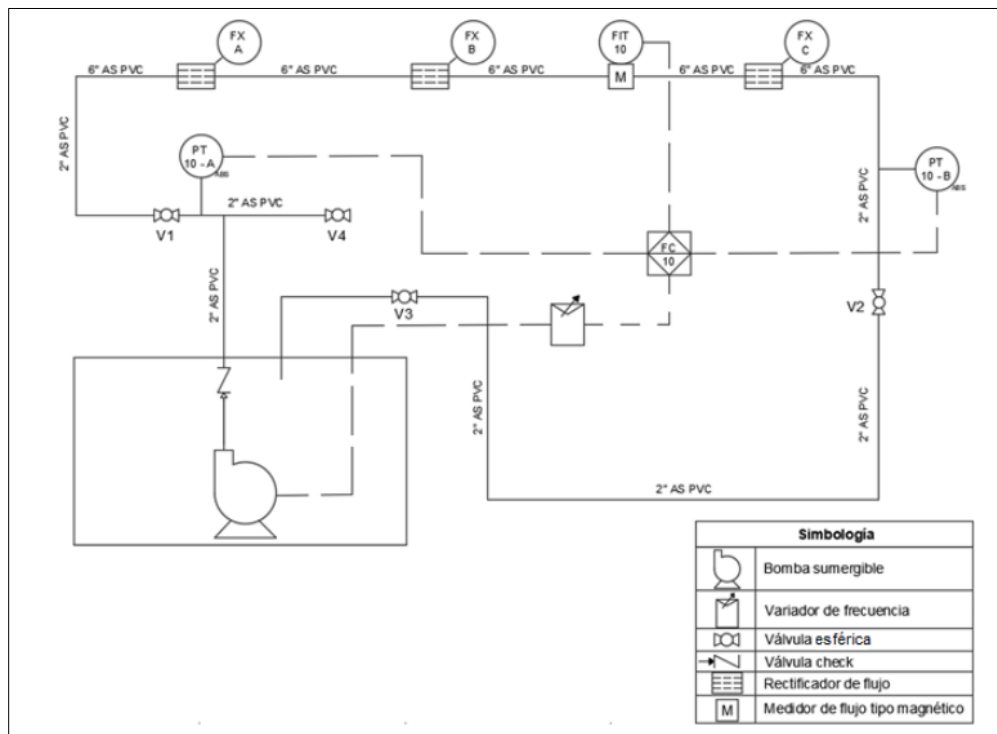


Figura 2-1 DTI del módulo de medición y control de flujo [13].

2.2 EQUIPO DE MÓDULO DIDÁCTICO

El módulo didáctico está colocado sobre una estructura hecha de PTR, el tanque de almacenamiento de agua se construyó con placa de aluminio y la bomba sumergible en su interior. El tubo de medición es de 150 mm (6 plg) de diámetro de PVC, cédula 40, que contiene dos rectificadores de flujo Spearman y un rectificador de tubos bundle. En este se acopló el transmisor de flujo tipo magnético mediante una conexión bridada clase 150 [13].

Para la recirculación del agua se acopló un tubo de 50 mm (2 plg) de diámetro de PVC cédula 40. Se instaló una válvula check en la salida de la bomba, con el fin de evitar que se vacíe la tubería de medición. Se integró una bifurcación con una terminación en válvula esférica de 50 mm (2 plg) de diámetro de PVC cédula 40, donde se puede conectar otros equipos. En la Figura 2-2 se muestra el módulo didáctico de flujo [13].

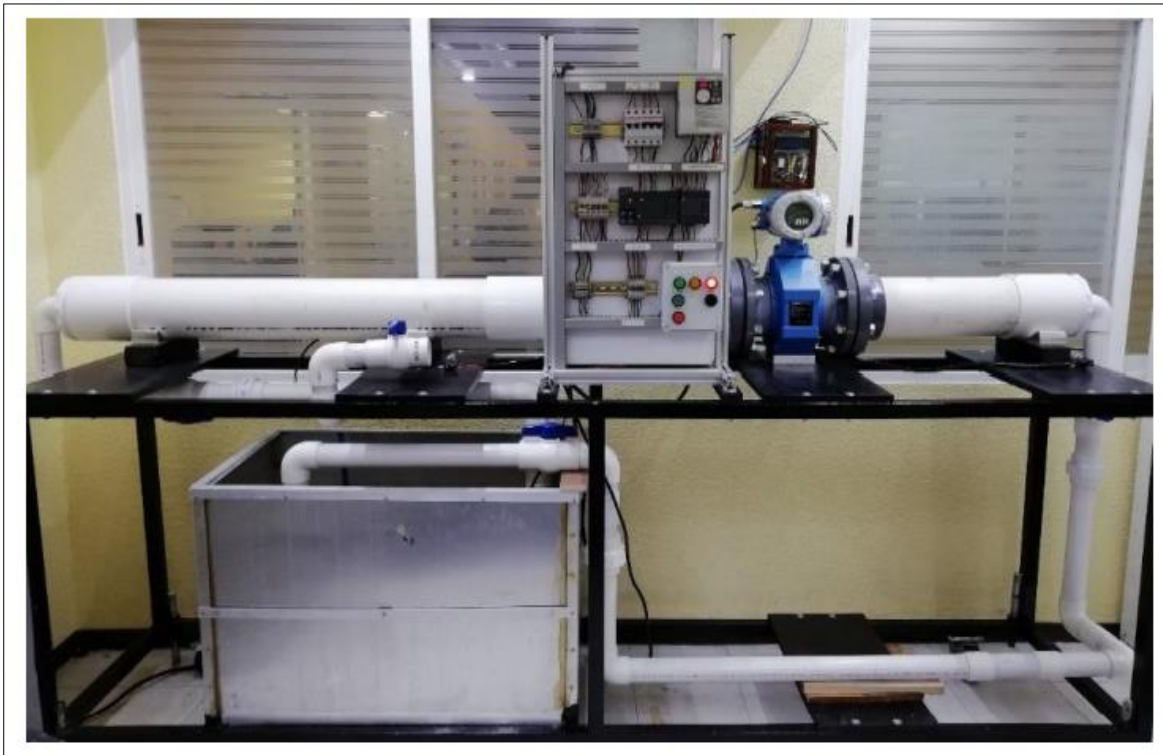


Figura 2-2 Módulo didáctico de flujo [13].

2.2.1 Tanque atmosférico

El tanque de almacenamiento atmosférico se diseñó con base en la altura máxima de la bomba centrífuga sumergible que es de 44 cm, ya que el manual de operación se indica que la bomba debe estar sumergida completamente y si es posible que se exceda su altura. El material con el que está construido el tanque es de aluminio, debido a que su oxidación es transparente. Las dimensiones del tanque son de 50 cm de ancho, 91 cm de largo, 60 cm de altura. Con las dimensiones mencionadas el volumen total del tanque es de 272 dm³ [13].

2.2.2 Bomba sumergible

La bomba sumergible es utilizada para generar el flujo en el módulo y realizar la medición o control de éste, el flujo debe cumplir con características afines al transmisor de flujo, además de que el flujo sea desarrollado. La bomba debe ser trifásica para poder implementar un variador de frecuencia [13].

El flujo debe cubrir un mínimo del 75% del span del transmisor para lograr la aplicación didáctica, el transmisor tiene un span ajustable en dos modos de operación que son:

- Configuración de fábrica de 0 m³/h a 159.0 m³/h a una velocidad de 2.5 m/s.
- Valor máximo de 0 m³/h a 636.2 m³/h a una velocidad de 10 m/s.

Con base en los valores anteriores se determinó que una bomba sumergible era la selección más adecuada. La bomba seleccionada es de la marca PUMPS F&Q, modelo 50WQ0.55-2P3V, la cual maneja un flujo de 466 LPM o 27.96 m³/h a una presión de 2.5 m H₂O. En la Tabla 2-1 se muestran las especificaciones técnicas de la bomba mencionada

Tabla 2-1. Especificaciones técnicas de la bomba sumergible 50WQ0.55-2P3V.

BOMBA DE AGUA SUMERGIBLE		
ISO9001 ISO14001 CE	Modelo: 50WQ0.55-2P3V	
550 W ¾ hp	220 V 3-60 Hz 4.2 A	
Flujo máx. 466 l/min	H máx. 8.5 m	
Descarga 50.8 mm (2")	Paso esfera 38.1 mm (1.5")	
Clase Aisl. B	3450 r/min	IP 68
Importador: PUMPS F&Q S.A DE C.V		

La curva característica de la bomba sumergible seleccionada de la Figura 2-3 es dada en la documentación proporcionada por el fabricante, donde se muestra graficada la carga contra el flujo.

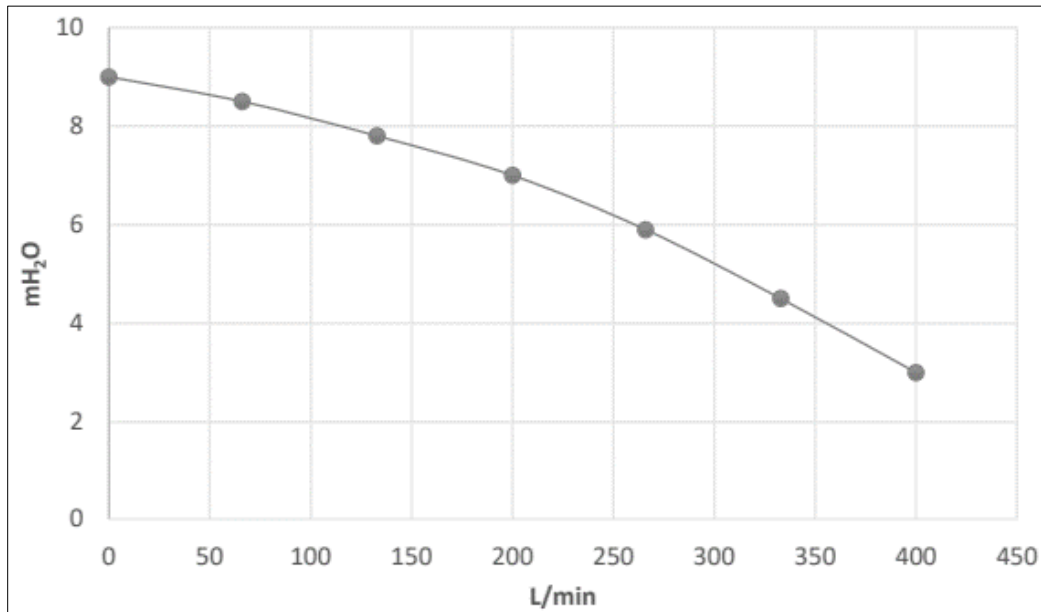


Figura 2-3 Curva carga-flujo de la bomba sumergible 50WQ0.55-2P3V [16].

2.2.3 Sistema de tuberías

El sistema de tuberías se diseñó con base en el medidor de flujo, para su instalación es necesario un mínimo de 10 diámetros antes del medidor y un mínimo de 5 diámetros después del medidor, para una medición adecuada. Por cuestiones de espacio el módulo didáctico presenta diversos accesorios que perturban el flujo desde la salida de la bomba hasta la entrada del tubo de medición en donde se encuentra instalado el transmisor [13].

Al implementar la expansión recta entre la tubería de 50 mm (2 plg) y 150 mm (6 plg) se genera turbulencia en el flujo por lo que es imprescindible tener una distancia mínima de 15 diámetros y una distancia después del transmisor de 8 diámetros. Para garantizar las mediciones correctas se implementaron rectificadores de flujo, dos rectificadores tipo Spearman y un rectificador de tubos bundle [13].

Rectificador tipo Spearman:

- Cuatro perforaciones de 0.10 D en un diámetro de 0.18 D

- Ocho perforaciones de $0.16 D$ a un diámetro de $0.48 D$
- Dieciséis perforaciones de $0.12 D$ en un diámetro de $0.86 D$
- Una placa de espesor de $0.12 D$

El rectificador tipo Spearman cuenta con las especificaciones mencionadas y se muestra en la Figura 2-4.



Figura 2-4 Rectificador de flujo tipo Spearman [13].

Rectificador de flujo tipo bundle.

Para el diseño de este rectificador se usó tubería de 12.7 mm ($1/2 \text{ plg}$) de diámetro de CPVC. El tubo de medición tiene una longitud de $11.5 D$ ($1752 \text{ mm} = 69 \text{ plg}$) antes del medidor de flujo y $3.5 D$ ($533.5 \text{ mm} = 21 \text{ plg}$) después del rectificador de flujo como se muestra en la Figura 2-5, más detalles del módulo de medición y control de flujo se muestran en [13].

2.3 INSTRUMENTACIÓN

Para evaluar la bomba sumergible del módulo de flujo y determinar el consumo de energía por ambos métodos de control, es necesario las características de los instrumentos que se encuentran instalados, así como de la instrumentación para medir las variables eléctricas; los cuales se describen a continuación.

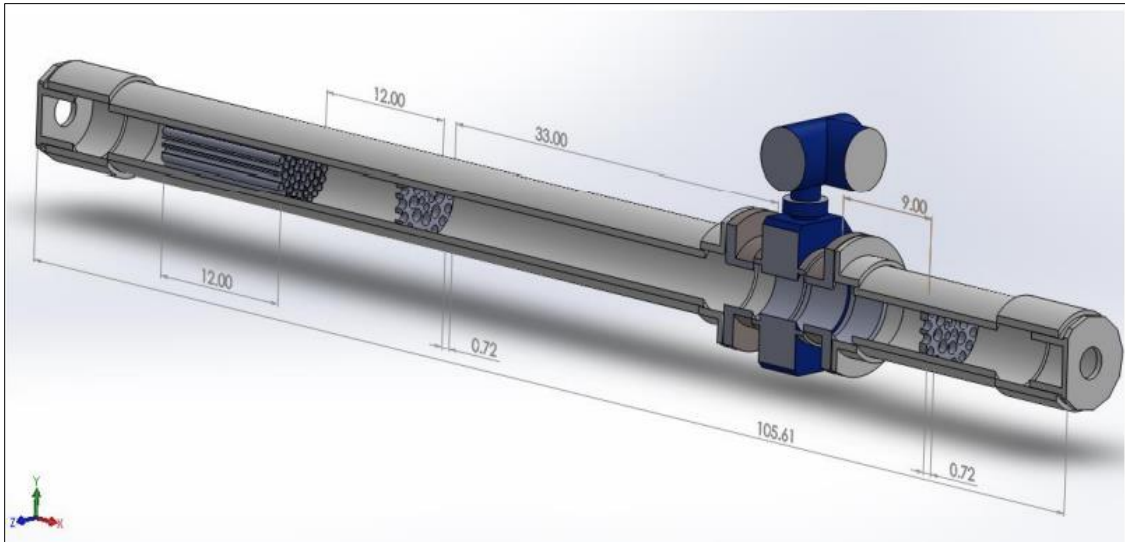


Figura 2-5 Distribución de rectificadores de flujo en la tubería, dimensiones en plg [13].

2.3.1 Transmisores de presión

En el lazo de control de flujo se integraron dos transmisores de presión absoluta como el mostrado en la Figura 2-6, uno en la entrada de tubo de medición y el otro en la salida de éste. Con estos transmisores se determina la caída de presión entre estos dos puntos, del tubo de medición y se determinan las condiciones de seguridad para proteger el módulo contra sobrepresiones.

Los transmisores son ciegos, por lo cual se debe tener una Interfaz Humano-Máquina (HMI, por sus siglas en inglés) para monitorear la presión. De igual modo se puede conocer la medición al conectar un amperímetro en serie con las clemas de la entrada de señal de los transmisores. Los transmisores son marca Noshok, serie 100 y tiene las siguientes características.

- Span 0 psia a 30 psia.
- Señal de salida 4 mA a 20 mA.
- Alimentación de 10 VCD a 30 VCD.
- Conexión a dos hilos.

Con conexión a proceso es roscada de $\frac{1}{4}$ NPT, se utilizó un adaptador en la entrada del transmisor y un adaptador en la tubería acoplado con una manguera de 6 mm de diámetro, la cual está llena de agua.



Figura 2-6 Transmisor de presión absoluta [17].

2.3.2 Transmisor de flujo magnético

El transmisor de flujo magnético (Figura 2-7) que se integró al módulo de flujo es de la marca Endress + Hauser, modelo Promag 33F, el cual incorpora el protocolo de comunicación HART así como una señal de 4 mA a 20 mA. El sistema de medición que posee el transmisor únicamente debe medir líquidos que posean una conductividad mayor o igual a $5\mu\text{S}/\text{cm}$, tales como: ácidos, pastas, pulpas, agua potable, aguas residuales, leche, cerveza, vino, entre otras [15]. Las siguientes son algunas características de este transmisor.

- Alimentación de 127 V de corriente alterna.
- Dos relevadores configurables.
- Alcance (span) ajustable 0 m³/h a 636.2 m³/h
- Protección IP 67
- Diámetro de 150 mm (6 plg)

2.3.3 Analizador de energía

Se utilizó el analizador de energía marca Fluke modelo 43B (Figura 2-8), para las mediciones de los parámetros eléctricos en el módulo didáctico. Algunas de sus

funciones son la medición continua de la tensión en línea y corriente durante un máximo de 16 días. Medición de resistencia y capacidad, potencia activa (W), coeficiente de potencia, coeficiente de la potencia reactiva (cos), potencia completa (BA) y potencia reactiva (BAP), así como las formas de onda de tensión y corriente, RMS real para tensión y corriente, frecuencia y medición de armónicos [18].



Figura 2-7 Transmisor de flujo Promag 33F [15].

2.3.4 Pinza amperimétrica

Se utilizó la pinza amperimétrica Fluke a3004 (Figura 2-9) para medir la corriente que entregan los transmisores de presión y flujo, la cual cuenta con las siguientes características:

- Señales de medición de 4 a 20 mA sin “interrumpir el circuito”
- Cámara infrarroja Fluke Ti200/300/400
- PC vía adaptador opcional pc3000 FC
- Aplicación móvil Fluke Connect



Figura 2-8 Analizador de energía Fluke 43B [18]



Figura 2-9 Pinza amperimétrica Fluke a3004 [22].

2.4 GABINETE DE CONTROL

En el gabinete de control (Figura 2-10) se encuentran las conexiones eléctricas de los instrumentos de control, el controlador lógico programable (PLC), las conexiones y accionamiento de la bomba sumergible, el variador de frecuencia. De igual manera se encuentra la estación de operación donde se tienen los botones de arranque y paro del sistema [13].

2.4.1 Variador de frecuencia

Para manipular el elemento final se implementó el variador de frecuencia FR-S520E-1.5L-NA, marca Mitsubishi, como el mostrado en la Figura 2-11 con las siguientes características:

- Alimentación: 200 V-240 V de CA, 50/60 Hz y 11.4 A
- Potencia: 1491.4 W (2 hp)
- Salida: 7 A (4 A por fase), 200 V- 240 V de CA, 0 Hz a 120 Hz.

El variador de frecuencia Mitsubishi tiene sus parámetros de configuración, los cuales varían en relación con el proceso que controla. En la Tabla 2-2 se muestran los parámetros básicos de configuración el variador FR-S520E-1.5K-NA, los cuales deben ser modificados directamente desde el equipo usando la interfaz integrada.

Tabla 2-2 Parámetros de configuración del variador de frecuencia.

Parámetro	Nombre	Indicación	Configuración de fábrica	Configuración usada
1	Frecuencia máxima	P 1	50 Hz	60 Hz
2	Frecuencia mínima	P 2	0 Hz	0 Hz
7	Tiempo de aceleración	P 7	5 s	0.5 s
8	Tiempo de desaceleración	P 8	5 s	0.5 s
9	Relé térmico	P 9	11.4	5.4
30	Selección de funciones extendida	P 30	0	1
14	Selección de patrón de carga	P 14	0	1
64	Selección de función para la terminal RUN	P 64	0	0

65	Selección de función para la terminal A, B, C	P 65	99	3
79	Selección de modo de operación	P 79	0	3



Figura 2-10 Gabinete de control [13].



Figura 2-11 Variador de frecuencia Mitsubishi FR-S520E-1.5L-NA [25].

2.4.2 Controlador lógico programable

Para el control del módulo se implementó un PLC S7-200 CPU 224XP AC/DC/RLY, marca SIEMENS (Figura 2-12), el cual tiene 14 entradas que pueden recibir una tensión de 24 VDC o un intervalo de 15 V a 30 V de CD, al igual cuenta con 10 salidas digitales a relevador, que soportan una tensión de 30 V de CD o bien 250 V de CA a 2 A máximo. Cuenta con un módulo de expansión EM 253 de 4 entradas analógicas y 1 salida analógica que se conecta a 24 V de corriente directa.

La programación en escalera del arranque y paro del sistema se encuentra en la Figura 2-13, en ésta se ven los elementos de protección como: la sobrecarga del variador (entrada I0.3) y un interruptor de seguridad por presión alta (marca M4.0); además se encuentran los botones de paro de la estación de operación (entrada I0.0) y de la HMI (marca M0.0). Para arrancar el sistema se cuenta con los botones de arranque de la estación de operación (entrada I0.1) y de la HMI (marca M0.1) estos activan la bobina de la salida conectada al variador de frecuencia (salida Q0.4), se tiene un enclave de la bobina y además se tiene en paralelo una bobina para el led indicador de arranque en la HMI (marca M1.3).



Figura 2-12 PLC SIEMENS S7-200 y el módulo de expansión EM 235 [24].

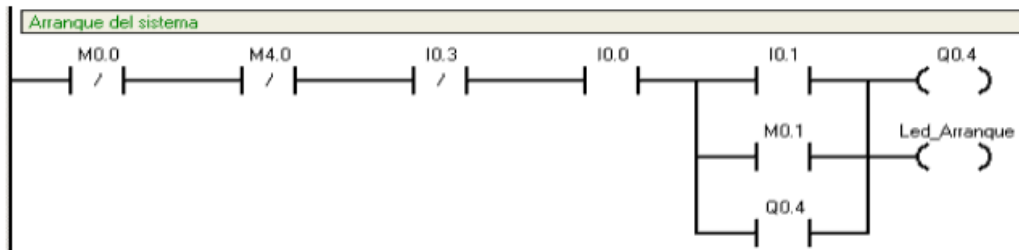


Figura 2-13 Programación en escalera de arranque y paro del sistema

2.4.3 Protecciones

Los elementos de protección integrados son interruptores termomagnéticos (Figura 2-14). Estos cortan la energía eléctrica en caso de que se exceda la corriente descrita en el interruptor. Los dispositivos que se protegen son la bomba sumergible son, variador de frecuencia, el PLC y el transmisor de flujo [13].

Para el variador de frecuencia de acuerdo con sus especificaciones se seleccionó un interruptor de 16 A. Para el PLC y el transmisor de flujo se seleccionó un interruptor de 6 A [13].



Figura 2-14 Interruptores termomagnéticos para protección [13].

2.5 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se describen las diferentes metodologías empleadas para obtener las curvas características de la bomba. Así como las metodologías utilizadas para la regulación de flujo a velocidad variable (variador de frecuencia) y regulación a velocidad constante (válvula), realizando el registro de los parámetros eléctricos para obtener la energía consumida con ambos métodos.

PUESTA A PUNTO EL MÓDULO DIDÁCTICO

Para comenzar con las pruebas del consumo energético a velocidad variable y a velocidad constante en el módulo didáctico se deben considerar varios puntos, para que su funcionamiento sea correcto. Las cuales se enlistan a continuación:

1. Conectar la clavija de alimentación trifásica en el contacto ubicado en la pared contraria al módulo.
2. En caso de arrancar el módulo y tener la bomba a flujo máximo (60 Hz), con la válvula V1 o V2 cerradas se cuenta con una condición de paro por presión alta de 23 psia del transmisor de presión A y 25 psia en el transmisor de presión B.
3. Accionar los interruptores termomagnéticos de alimentación del PLC, transmisor de flujo y variador de frecuencia.
4. Observar las luces piloto de la estación de operación y verificar que el indicador de frecuencia (variador) muestre 0 Hz, el del flujo (transmisor) muestre 0 l/min y la luz piloto de paro (rojo) se encuentre encendida (1).

APAGAR EL MÓDULO DIDÁCTICO

1. Para apagar el equipo se debe presionar el botón de paro (rojo) de la estación de operación o el botón OFF de la HMI
2. Se recomienda cerrar la válvula V2 del módulo. Se corta la alimentación de los interruptores termomagnéticos
3. Se desconecta la clavija de alimentación trifásica del contacto.

2.5.1 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LA BOMBA

Al realizar las pruebas para comprobar las curvas características de la bomba sumergible modelo 50WQ0.55-2P3V (Figura 2-5) dadas por el fabricante. Se empleó el transmisor de flujo magnético, los transmisores de presión absoluta, el

analizador de energía y dos pinzas amperimétricas. Registrando los datos de la presión de entrada (P_1), presión de salida (P_2), potencia (P), tensión (V), corriente (I) y flujo (q_v). Estas variables se emplean para determinar la carga de la bomba (H), Potencia consumida por la bomba (P) y la eficiencia (η).

Se inicia poniendo a punto el módulo didáctico y se toman las mediciones iniciales de la presión, flujo, tensión y corriente. Para posteriormente encender la bomba con el flujo máximo y volver a registrar los datos anteriores. De la ecuación (1-8) con los datos de la presión atmosférica y la presión absoluta se obtiene la presión manométrica. Posteriormente se calculó la carga de la bomba y se realizó la conversión pertinente para tener el resultado en mca. Para este caso se implementó el factor de conversión donde 10.3326 mca es igual a 14.696 psi.

A continuación, se calcula la potencia hidráulica para cada flujo implementando la ecuación (1-2), con la finalidad de obtener la eficiencia de la bomba. Para esta ecuación se utilizó el valor de densidad del agua a 20 °C, que tiene un valor de 998.29 kg/m³ y tomando de referencia la aceleración de la gravedad estándar con un valor de 9.81 m/s².

Finalmente se calcula la eficiencia de la bomba que es la relación de las potencias hidráulica y potencia eléctrica, mediante la ecuación (1-3). En la figura 2-15 se muestra la metodología implementada para la obtención de las curvas características de la bomba.

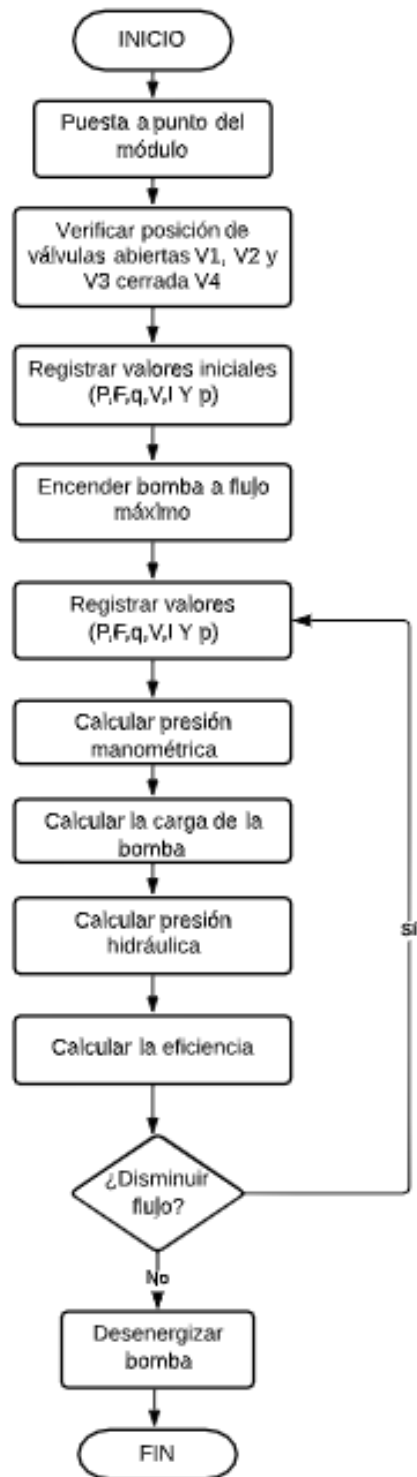


Figura 2-15 Diagrama de flujo para obtener las curvas características de la bomba

2.5.2 Consumo energético a velocidad variable (variador de frecuencia)

Para determinar el consumo energético a velocidad variable se debe poner a punto el módulo didáctico, para garantizar su funcionamiento adecuado durante la etapa experimental. Midiendo las condiciones ambientales en cada frecuencia que se encuentra el módulo.

En este caso la frecuencia inicial fue de 60 Hz, realizando reducciones cada 6 Hz hasta llegar a 24 Hz, permitiendo al sistema estabilizarse, con cada frecuencia con el fin de que las mediciones sean adecuadas. Una vez establecida la frecuencia se realizó un registro de mediciones con los valores de la presión, el flujo, tensión, corriente y potencia.

2.5.3 Consumo energético a velocidad constante (válvula)

Para determinar el consumo energético a velocidad constante se pone a punto el módulo didáctico como se mencionó anteriormente. Se deben tener en cuenta las condiciones ambientales como la presión atmosférica ya que al tener transmisores de presión absoluta este dato es importante para conocer la presión manométrica, así también como la temperatura ambiente y humedad relativa

En este caso la frecuencia de operación durante toda la evaluación con la válvula fue de 60 Hz. Se implemento la válvula esférica (V2) del módulo para reducir el flujo e igualar los flujos obtenidos con el variador de frecuencia, haciendo un registro de mediciones con los valores de la presión, el flujo, tensión, corriente y potencia en cada variación de la apertura de la válvula.

Posteriormente se determinará el ahorro energético, comparando la potencia consumida con el variador de frecuencia y la válvula. De igual manera, se calculará el costo de la energía consumida en cada método, para establecer el ahorro económico generado. Finalmente, se determinarán las emisiones de carbono a velocidad constante y velocidad variable y se calculara el ahorro de ellas.

En la Figura 2-16 se muestra el diagrama de flujo de la metodología implementada para determinar el consumo energético de ambos métodos de regulación de flujo.

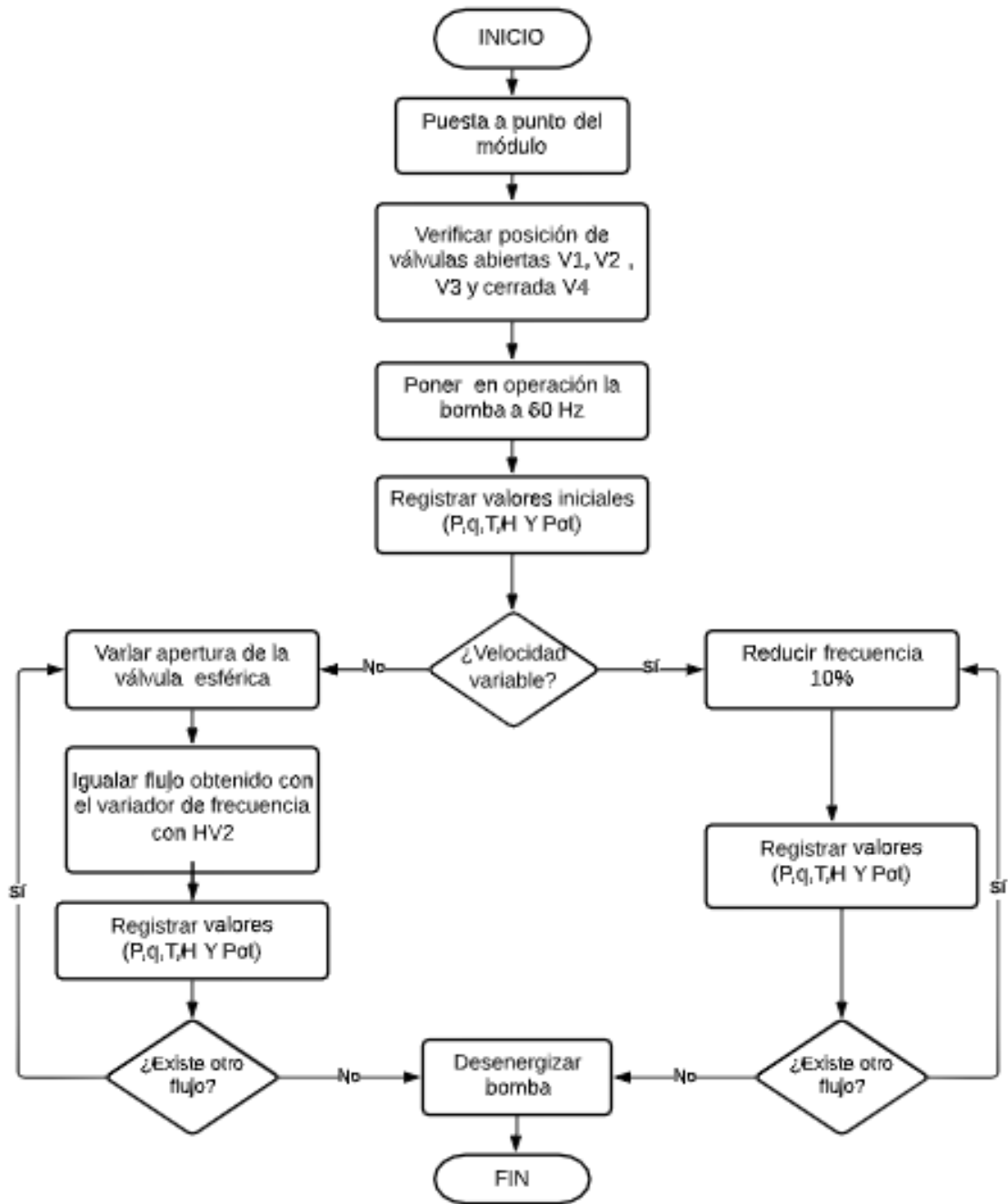


Figura 2-16 Diagrama de flujo de metodología a velocidad variable y velocidad constante



CAPÍTULO 3.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 EVALUACIÓN DE LA BOMBA SUMERGIBLE

Para la evaluación de la bomba sumergible se realizaron pruebas a diferentes frecuencias para medir la corriente consumida por ésta en cada una de ellas. Las mediciones de potencia se efectuaron con el analizador de energía Fluke 43. De acuerdo con las especificaciones de la bomba se requiere una tensión de alimentación de 220 V cuando se encuentra trabajando a una frecuencia nominal de 60 Hz. Por lo que los resultados obtenidos de forma práctica se muestran en la siguiente gráfica (Figura 3-1).

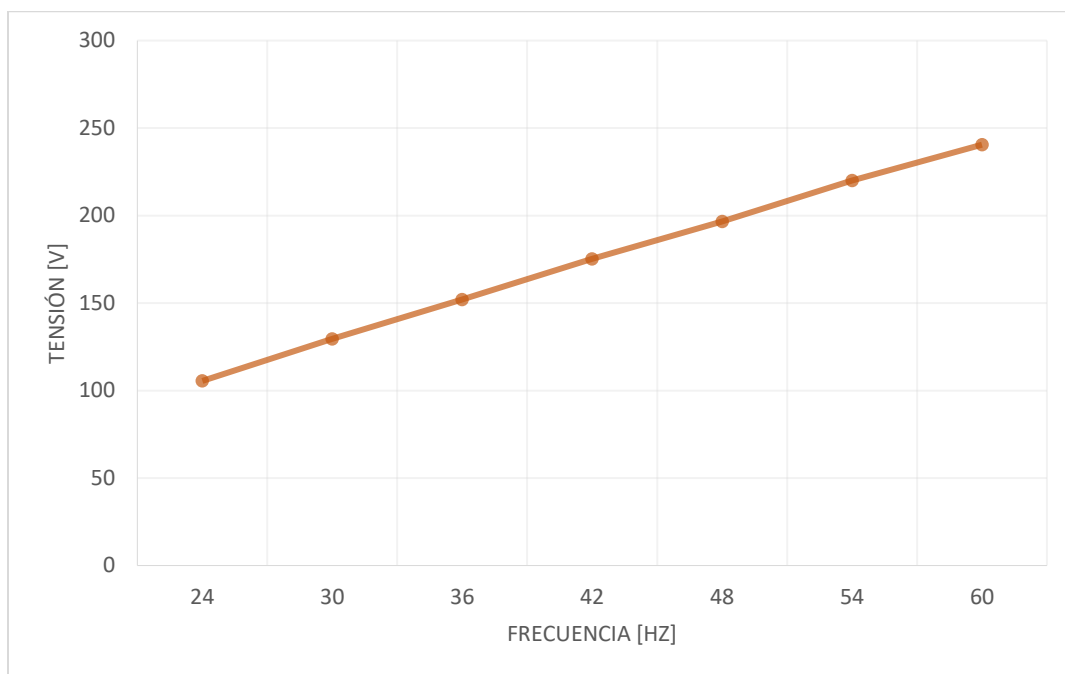


Figura 3-1 Gráfica de tensión-frecuencia.

De la misma forma se realizó la medición de la corriente consumida por la bomba variando las frecuencias desde 60 Hz hasta 24 Hz, empleando la pinza amperimétrica Fluke a3004. Registrando los valores que se muestran en la siguiente gráfica de la Figura 3-2.

Para la medición de la potencia consumida de la bomba se empleó el analizador de energía, el cual se conectó de acuerdo con las indicaciones del manual. En la Figura 3-3 se muestra la potencia consumida a diferentes frecuencias, variando de 60 Hz hasta 24 Hz, con variaciones cada 6 Hz.

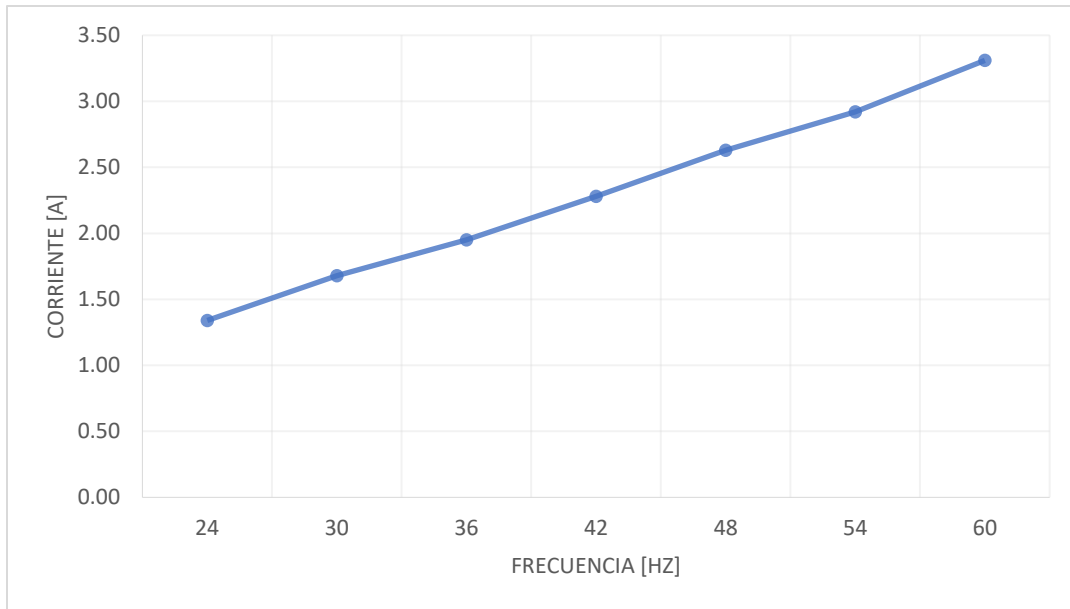


Figura 3-2 Gráfica de corriente contra frecuencia.

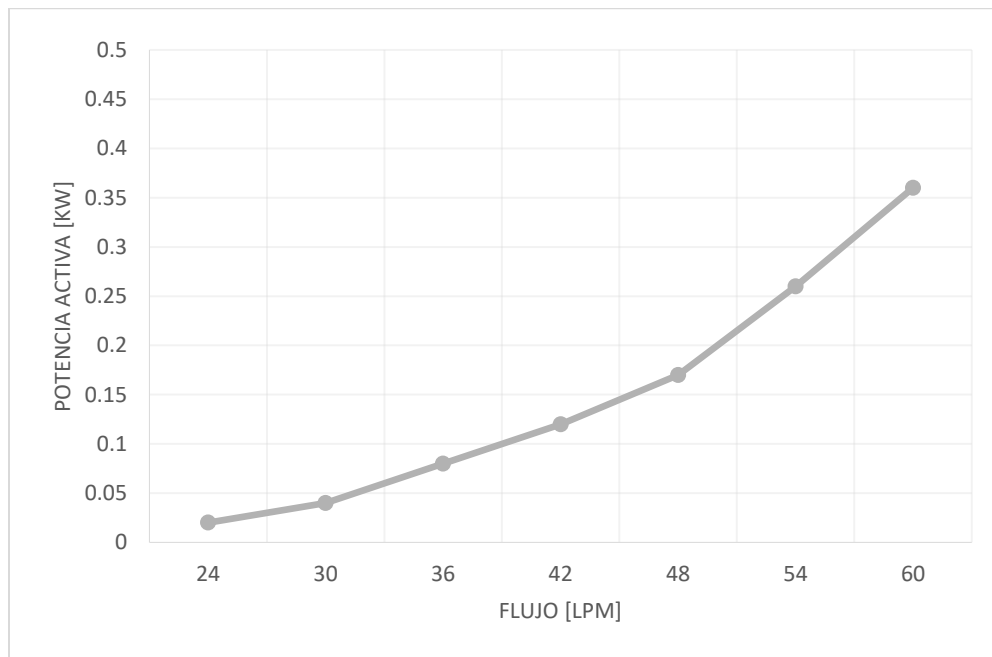


Figura 3-3 Gráfica de potencia activa contra frecuencia.

3.2 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LA BOMBA

En las curvas características (Figura 3-4) se tiene el comportamiento de la carga, potencia y eficiencia de la bomba variando el ángulo de obturación de la válvula (V2), de esta forma se registraron los datos obtenidos de forma práctica para posteriormente obtener gráficas de las curvas de una bomba.

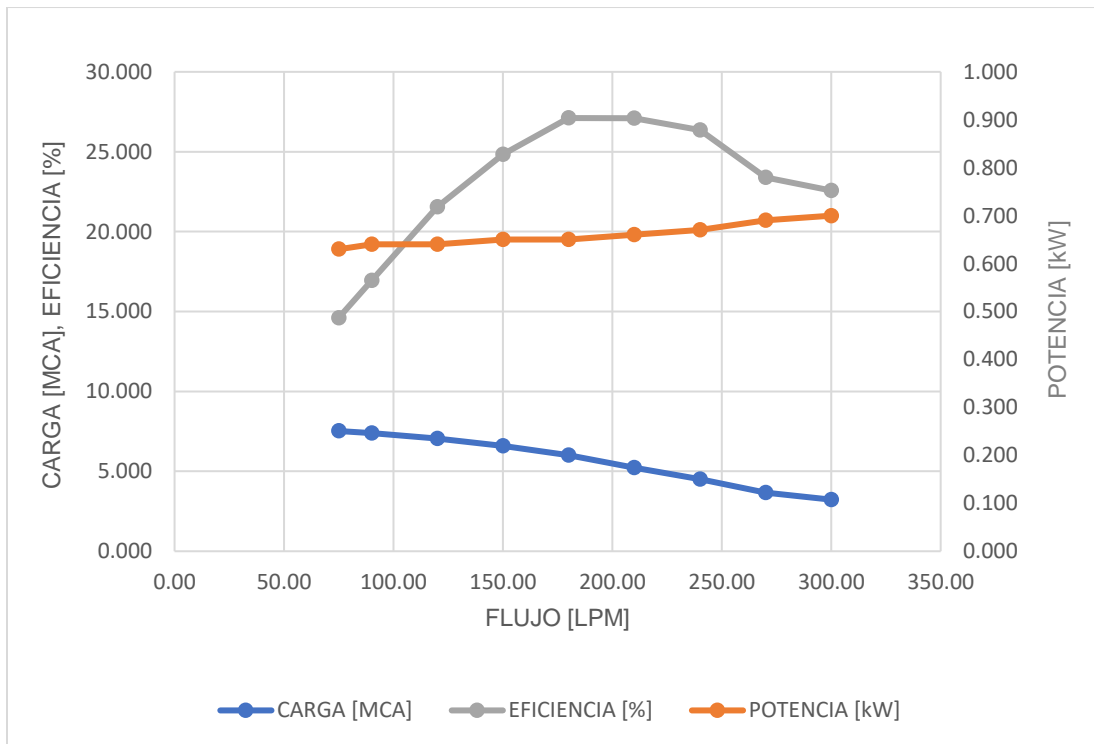


Figura 3-4 Gráfica de curvas características a 60 Hz.

3.3 POTENCIA CONSUMIDA CON VÁLVULA

Para realizar la gráfica de potencia consumida a velocidad constante se implementó la metodología descrita en la Figura 3-16 a una frecuencia de 60 Hz. Dejando tres minutos entre estas obturaciones para obtener mediciones estables, registrando las mediciones con el medidor de energía Fluke 43B de la potencia activa y de esta manera obtener la potencia que consume el sistema en cada flujo. En la tabla 3-1 se muestran los datos obtenidos de forma práctica.

Tabla 3-1. Datos de potencia a velocidad constante

Frecuencia [Hz]	Flujo [LPM]	Potencia activa [kW]
60	90.00	0.350
60	120.00	0.340
60	150.00	0.340
60	180.00	0.340
60	210.00	0.350
60	240.00	0.350
60	300.00	0.360

Para esta prueba se tiene un consumo energético con poca variación, ya que al modificar la posición de la válvula y obtener diferentes flujos el sistema consume la misma potencia. Lo que genera un gasto igual para el consumidor si requiere un flujo de 300 LPM o uno de 90 LPM.

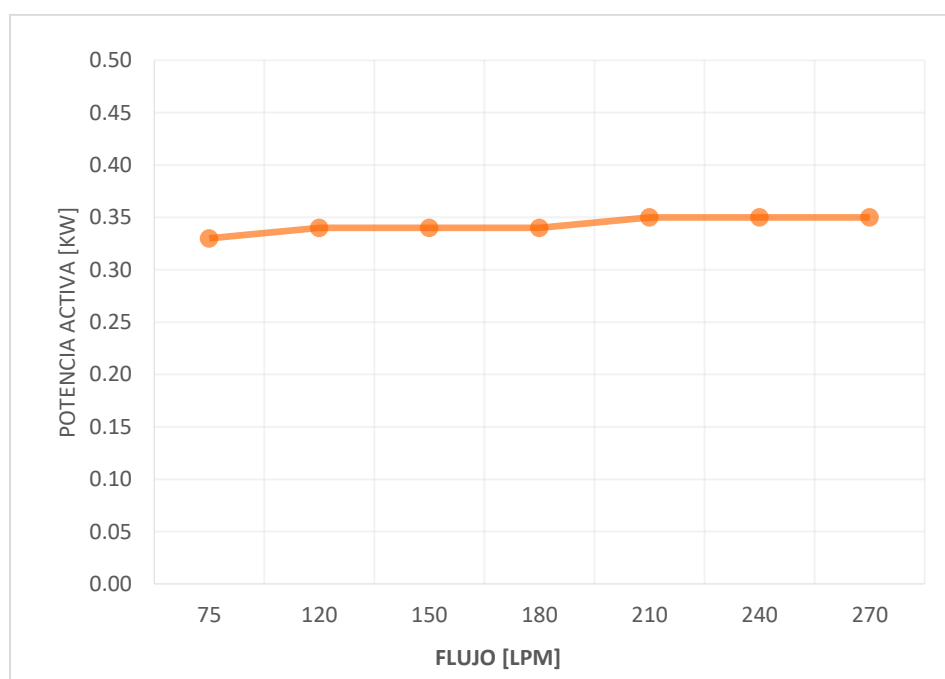


Figura 3-5 Gráfica de potencia consumida a velocidad constante.

3.4 POTENCIA CONSUMIDA CON VARIADOR DE FRECUENCIA

Para obtener la potencia consumida a velocidad variable se implementó la metodología descrita en la Figura 3-16, variando la frecuencia desde 60 Hz hasta 24 Hz, debido a que si se reducía más la frecuencia la tubería se comenzaba a vaciar, lo que representaba un problema para el transmisor de flujo, el cual debe emplearse en tuberías llenas. Se dejó tres minutos entre estas variaciones de frecuencia para obtener mediciones estables, registrando las mediciones realizadas con el medidor de energía Fluke 43B de la potencia activa y de esta manera obtener la potencia que consume el sistema al aproximarse a los flujos obtenidos a velocidad constante. Los datos obtenidos de forma práctica a velocidad variable se muestran en la tabla 3-2.

Tabla 3-2. Datos de potencia a velocidad variable

Frecuencia [Hz]	Flujo [LPM]	Potencia activa [kW]
24	80.00	0.02
30	120.00	0.040
36	150.00	0.080
42	190.00	0.120
48	220.00	0.170
54	250.00	0.260
60	300.00	0.360

En esta prueba el consumo energético tuvo variaciones importantes, ya que al flujo máximo de 300 LPM se tiene una potencia de 0.360 kW en cambio si se requiere el flujo mínimo el sistema consume 0.02 kW, utilizando un 94.45% menos de energía eléctrica.

3.5. COMPARACIÓN DE POTENCIAS

En la Tabla 3-3 se muestran las potencias consumidas por ambos métodos de regulación de flujo, donde se buscó aproximarse en ambos métodos a distintos

flujos, para comparar el consumo energético que estos generan y determinar el ahorro generado al implementar un variador de frecuencia.

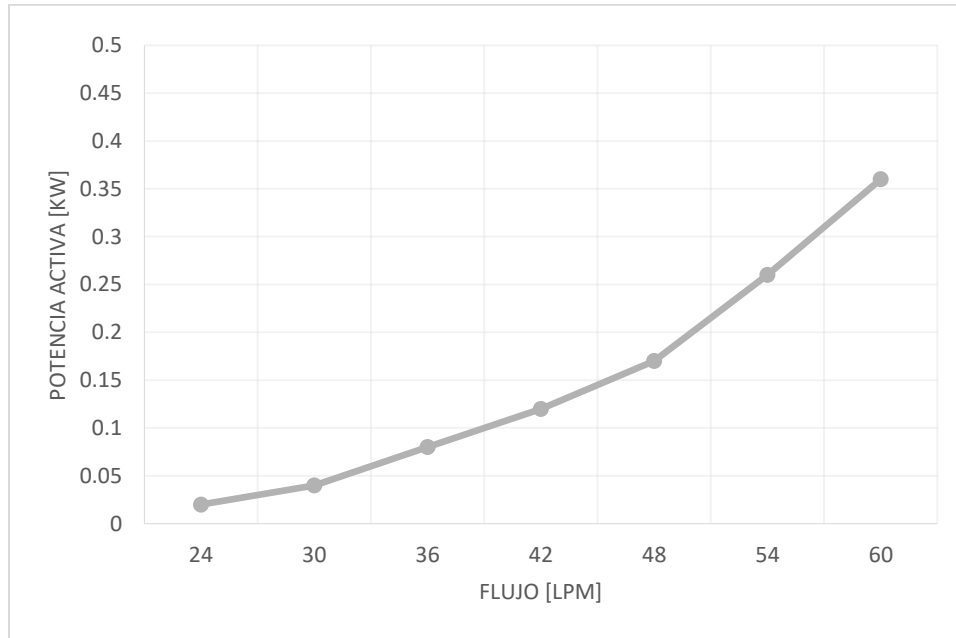


Figura 3-6. Gráfica de potencia consumida a velocidad variable.

Tabla 3-3. Comparación de potencias de ambos métodos de regulación de flujo.

Flujo [LPM]	Potencia activa velocidad contante [kW]	Potencia activa velocidad variable [kW]	Diferencia de potencias	Porcentaje de ahorro [%]
90.00	0.35	0.02	0.33	94.29
120.00	0.34	0.04	0.30	88.24
150.00	0.34	0.08	0.26	76.47
180.00	0.34	0.12	0.22	64.71
210.00	0.35	0.17	0.18	51.43
240.00	0.35	0.26	0.09	25.71
300.00	0.36	0.36	0.00	0.00

Como se muestra en los datos, se comenzó con el flujo máximo de 300 LPM donde en ambos métodos se consumió la misma potencia, pero al reducir el flujo variando la apertura de la válvula, el consumo energético disminuyó poco. Al reducir el flujo variando la frecuencia se obtiene un ahorro que va del 25% al 94% dependiendo del flujo que se requiera.

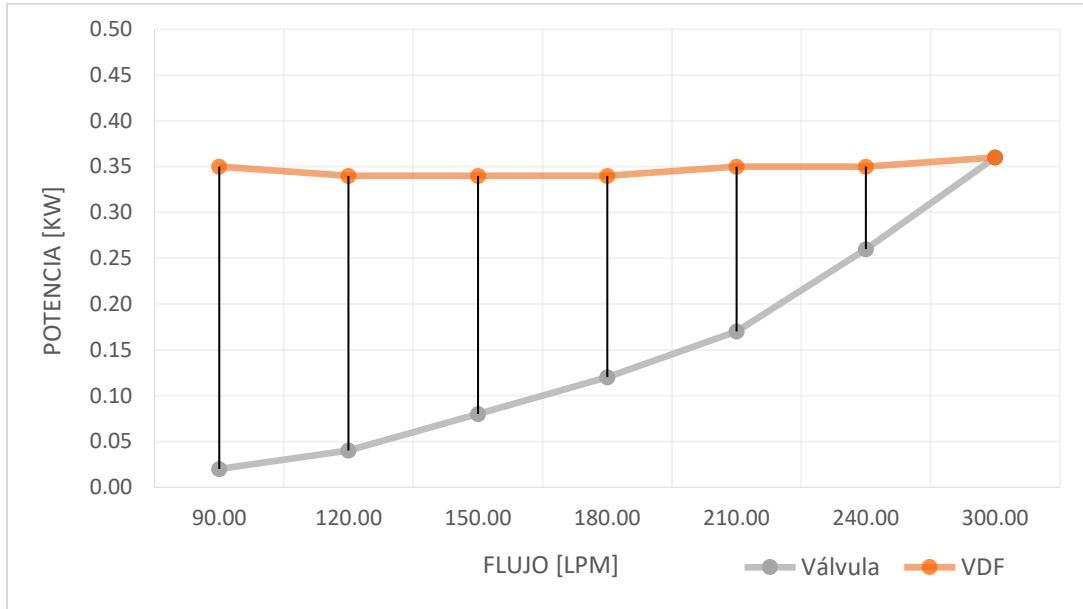


Figura 3-7. Potencia consumida a velocidad variable y velocidad constante.

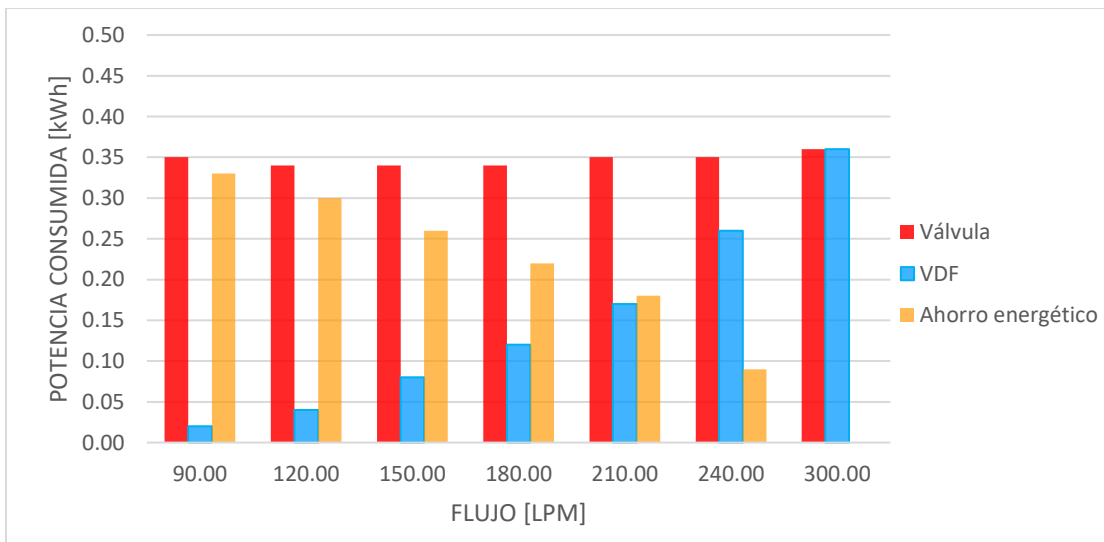


Figura 3-8. Potencia consumida (velocidad variable y velocidad constante) y ahorro.

3.6. ANÁLISIS ECONÓMICO

En la Tabla 3-4 se consideró una hora de operación del módulo didáctico para obtener los kW h y se determinó el costo al implementar ambos métodos de regulación de flujo. Con base en las tarifas que establece la Comisión Federal de Electricidad (Figura 3-8), en la Ciudad de México, municipio Gustavo A. Madero, región norte, donde se encuentra ubicada la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) unidad profesional Adolfo López Mateos.

Tabla 3-4. Conversión de kW a kWh

Flujo [LPM]	Potencia activa velocidad constante [kW]	kWh	Potencia activa velocidad variable [kW]	kWh
90.00	0.35	7	0.02	0.4
120.00	0.34	6.8	0.04	0.8
150.00	0.34	6.8	0.08	1.6
180.00	0.34	6.8	0.12	2.4
210.00	0.35	7	0.17	3.4
240.00	0.35	7	0.26	5.2
300.00	0.36	7.2	0.36	7.2

Tarifa	Descripción	Int. Horario	Cargo	Unidades	MAY-21
DIT	Demanda industrial en transmisión	-	Fijo	\$/mes	2,112.06
		Base	Variable (Energía)	\$/kWh	0.5803
		Intermedia	Variable (Energía)	\$/kWh	1.0501
		Punta	Variable (Energía)	\$/kWh	1.1682
		Semipunta	Variable (Energía)	\$/kWh	0.0000
		-	Capacidad	\$/kW	337.76

Figura 3-8. Tarifas de energía eléctrica establecidas por CFE.

Se determinó el costo de la energía consumida por cada método de regulación de flujo y se comparó para establecer el ahorro que se produce al implementar un variador de frecuencia, estos datos se muestran en la tabla 3-5.

Tabla 3-5. Precio del consumo por kWh en cada método de regulación de flujo.

Flujo [LPM]	kWh a velocidad constante	Precio por kWh a velocidad constante	kWh a velocidad variable	Precio por kWh a velocidad variable	Ahorro económico
90	7	\$4.06	0.4	\$0.23	\$3.83
120	6.8	\$3.94	0.8	\$0.46	\$3.48
150	6.8	\$3.94	1.6	\$0.93	\$3.02
180	6.8	\$3.94	2.4	\$1.39	\$2.55
210	7	\$4.06	3.4	\$1.97	\$2.09
240	7	\$4.06	5.2	\$3.02	\$1.04
300	7.2	\$4.18	7.2	\$4.18	\$0.00

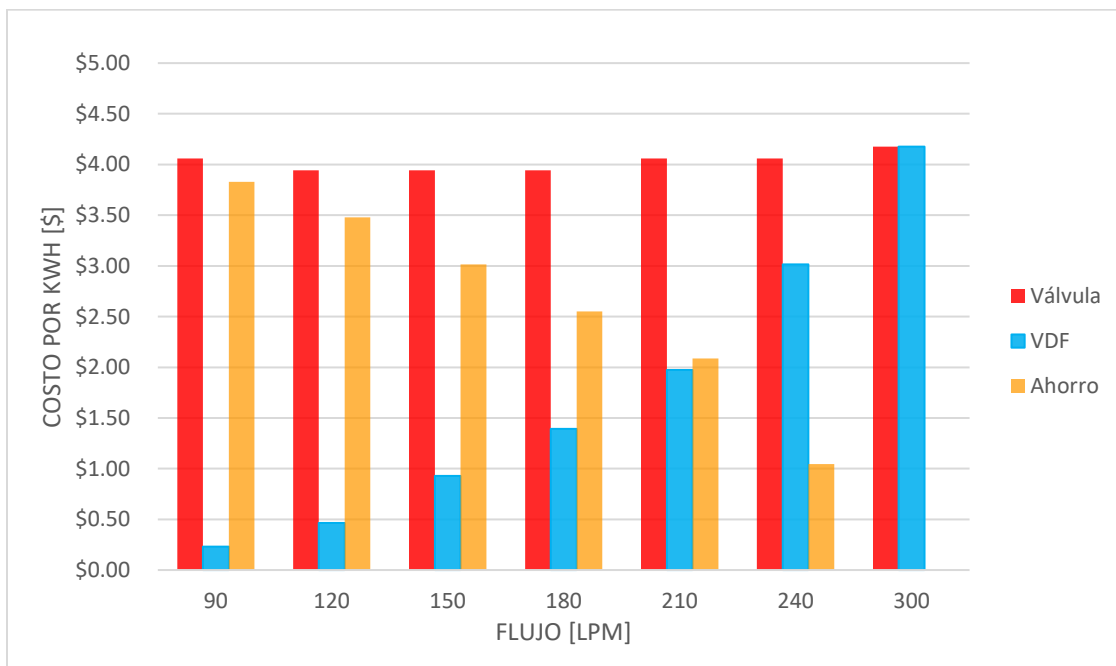


Figura 3-9. Costo por kWh y el ahorro de energía.

Costo del variador.

El costo de un variador de frecuencia de 1 HP es aproximadamente entre \$4,000 y \$10,000.

Para este proyecto el variador de frecuencia tiene un costo aproximado de \$4,000.

Costo de la instalación del variador.

Se presumen los costos de la instalación en un 10% del costo de adquisición del variador.

Por lo que para el variador de frecuencia implementado en el lazo de control de flujo se podría calcular un costo de instalación de \$400.00

Cálculo del costo de la energía ahorrada.

Se toma como referencia el costo actual del KWH proporcionado por la Comisión Federal de Electricidad.

Por lo que si se considera que el módulo de control de flujo tenga un uso durante un periodo de 8hrs al día durante un año con un flujo de 180 LPM, se tendría un ahorro de \$

$$\text{Ahorro en pesos} = \text{Precio de KWH} \times \text{Ahorro}$$

$$\text{Ahorro en pesos} = 0.5803 \times 7008 = 4066.7424$$

Cálculo de retorno de inversión.

Para determinar la viabilidad económica del proyecto se calculó el retorno de inversión en años.

$$\text{Retorno de inversión (años)} = \frac{\text{Costo de adquisición} + \text{Costo instalación}}{\text{Ahorro en pesos}}$$

$$\text{Retorno de inversión (años)} = \frac{4,000 + 400}{4066.7424} = 1$$

Por lo que se obtendría el retorno de la inversión del variador en un año aproximadamente, haciendo viable el proyecto.

3.7 REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO₂

Al comparar las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) al medio ambiente que producen los kWh totales consumidos en cada método de regulación de flujo como se muestra en la Tabla 3-6 y la Figura 3-10, se obtuvo la reducción de CO₂ al emplear el variador de frecuencia en la bomba sumergible del módulo de medición y control de flujo.

Tabla 3-6. Datos de comparación de emisiones de g CO₂.

Flujo [LPM]	Potencia activa velocidad contante [kW]	Emisiones de g CO ₂ a velocidad contante	Potencia activa velocidad variable [kW]	Emisiones de g CO ₂ a velocidad variable	Ahorro de emisiones de g CO ₂
90.00	0.35	166.25	0.02	9.5	156.75
120.00	0.34	161.5	0.04	19	142.5
150.00	0.34	161.5	0.08	38	123.5
180.00	0.34	161.5	0.12	57	104.5
210.00	0.35	166.25	0.17	80.75	85.5
240.00	0.35	166.25	0.26	123.5	42.75
300.00	0.36	171	0.36	171	0

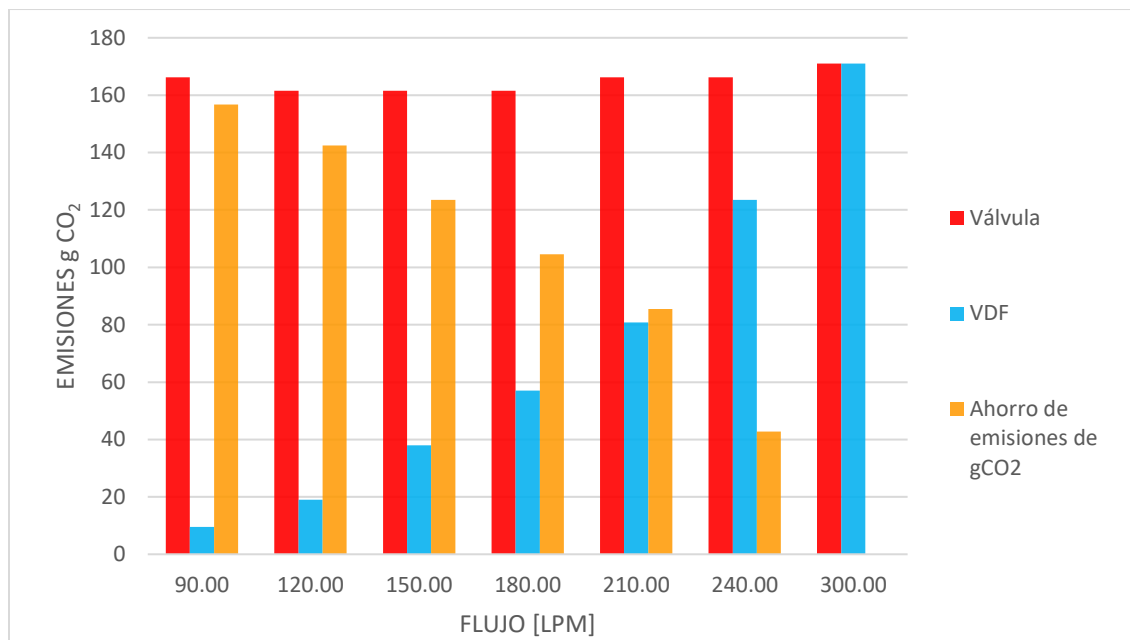


Figura 3-10. Reducción de emisiones de CO₂.



CONCLUSIONES

Se determinó el ahorro de energía en una bomba centrífuga sumergible que forma parte de un módulo de medición y control de flujo, para lo cual se avaluó la energía consumida por un variador de frecuencia y una válvula con el módulo operando a lazo abierto. De esta manera, el método práctico refleja los beneficios de implementar un variador de frecuencia a un sistema.

El control más común para una bomba centrífuga de velocidad constante es una válvula. Sin embargo, este dispositivo genera variaciones en la presión del sistema al ajustar el flujo, generando pérdidas de energía y reduce la eficiencia de bombeo. Por el contrario, un variador de frecuencia cambia la velocidad del equipo para proporcionar la energía necesaria para suministrar la salida de energía hidráulica al proceso.

Por lo que en las pruebas experimentales se compararon ambos métodos a diferentes flujos, registrando el consumo energético de cada uno, obteniendo un ahorro de 26% a 95% dependiendo del flujo requerido. Esto no solo tendría impacto económico, al reducir el costo por consumo eléctrico, si no que aumentaría la vida útil de los dispositivos a los que se implementa, en este caso las bombas. De igual manera el ahorro energético tiene como consecuencia una disminución de emisiones de CO₂, lo que genera gran relevancia al ser los gases de efecto invernadero, culpables del calentamiento global.

Al realizar el cálculo de la recuperación de la inversión de implementar un variador de frecuencia se determina un tiempo aproximadamente un año, por lo que es viable la propuesta. La industria busca la mejora continua que les permita tener la mejor eficiencia y rentabilidad en sus procesos, por lo que estos ahorros se verían reflejados a mayor escala para sistemas de grandes caudales. Y al ser un dispositivo destinado para los motores eléctricos, que ocupan gran porcentaje del gasto eléctrico en el sector industrial, forma parte de una solución para la mejora del medio ambiente al implementarlo en todas sus aplicaciones posibles.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Creus, Instrumentación Industrial, 8a ed. México: Alfaomega, 2010.
- [2] Jayamaha L. Energy-efficient building systems: green strategies for operation and maintenance. New York: McGraw-Hill Professional; 2006, 305 pp.
- [3] G. E. Harper, The ABC of Instrumentation in the Control of Industrial Processes. Editorial Limusa S.A. De C.V., 2004.
- [4] R. L. Mott, Mecánica de fluidos, 6a ed. México: Pearson Educación, 2006.
- [5] Nourbakhsh, A. Jaumotte, H. B. Parizi y C. Hirsch, Turbopumps and Pumping Systems. Springer, 2008.
- [6] R. Saidur, S. Mekhilef, M. B. Ali y A. Safari, "Applications of variable speed drive (VSD) in electrical motors energy savings", Elsevier, Malaysia, Renewable and Sustainable Energy Reviews 543-550, octubre de 2011.
- [7] Rakibuzzaman, S.-H. Suh y K. Kyung_Wuk, "A study on multistage centrifugal pump performance characteristics for variable speed drive system", Elsevier, South Korea, Procedia Engineering 105 270 – 275, 2015.
- [8] V. K. Arun Shankar, S. Umashankar y P. Sanjeevikumar, "Power Quality Performance Analysis og grid tied PV fed Parallel Pumping System under Normal and Vibrating condition", Elsevier, China, Energy Procedia 145 497–503, 2018.
- [9] Euro pump. ". Variable speed pumping a guide to successful applications". U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy. https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/pdfs/variable_speed_pumping.pdf (accedido el 20 de mayo de 2021).

- [10]IEA. "Electricity demand growth by end-use and scenarios in advanced and developing economies, 2018-2040". IEA. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electricity-demand-growth-by-end-use-and-scenarios-in-advanced-and-developing-economies-2018-2040> (accedido el 7 de enero de 2021).
- [11]SENER, "Programa de desarrollo del sistema eléctrico nacional 2016-2030", SENER, México, PRODESEN, Mayo de 2016. Accedido el 27 de enero de 2021. [En línea]. Disponible: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/98308/PRODESEN-2016-2030_1.pdf.
- [12]ABB. "Ahorro y eficiencia energética con variadores de frecuencia". ABB. <https://new.abb.com/drives/es/eficiencia-energetica#:~:text=Los%20variadores%20de%20frecuencia%20ajustan,un%2020%20y%20un%2070%20> (accedido el 14 de enero de 2021).
- [13]D. Alejo Adame, C. I. Cruz García "Implementación de un lazo de control de flujo", Tesis, IPN, Ciudad de México, 2019.
- [14]J. Acevedo Sánchez, Control Avanzado de Procesos. Diaz de Santos, 2003.
- [15]Endress+Hauser. "Electromagnetic Flow Measuring System Promag 33". Endress+Hauser. <https://www.mx.endress.com/es/instrumentacion-campo/33F> (accedido el 17 de febrero de 2021).
- [16]Pumps F&Q. "50WQ0.55-2P3V Clave 3802 PUMPS F&Q Bomba Sumergible Vortex Línea Americana Agua Sucia TRIFÁSICA". Tienda Dedicada Bombas Pumps F&Q. <http://tiendabombasfq.com/042-bombas-pumps-fq/120-50wq055-2p3v-clave-3802-pumps-fq-bomba-sumergible-vortex-linea-americana-para-agua-sucia-trifasica-clave-3802.html> (accedido el 28 de febrero de 2021).

- [17]Noshok. "100 Series Current Output Pressure Transmitters". Noshok. <https://www.noshok.com/products/pressure-level/pressure-transducers-transmitters/industrial/100-series-current-output-pressure-transmitters/> (accedido el 8 de abril de 2021).
- [18]Fluke. "Analizador monofásico de calidad eléctrica Fluke 43B". Fluke Corporation: Fluke Electronics, Biomedical, Calibration and Networks. <https://www.fluke.com/es-mx/soporte/descargas-de-software/analizador-monofasico-de-calidad-electrica-fluke-43b> (accedido el 28 de febrero de 2021).
- [19]IEA. "Global Energy & CO2 Status Report 2019". IEA. <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019> (accedido el 26 de mayo de 2021).
- [20]Conacyt. "Efecto ambiental y socioeconómico de la producción de energía eléctrica". Conacyt. <https://www.cyd.conacyt.gob.mx/?p=articulo&id=482> (accedido el 4 de febrero de 2021).
- [21]Are ball valves suitable for flow regulation (s. f.). AMS Steam technology. <https://www.amspain.es/are-ball-valves-suitable-for-flow-regulation>.
- [22]Fluke. Pinza amperimétrica de 4 a 20 mA CC Fluke a3004 FC. Fluke Corporation: Fluke Electronics, Biomedical, Calibration and Networks. <https://www.fluke.com/es-mx/producto/comprobacion-electrica/pinzas-amperimetricas/fluke-a3004-fc>
- [23]Fluke. (s. f.). Pinza amperimétrica de 4 a 20 mA CC Fluke a3004 FC. Fluke Corporation: Fluke Electronics, Biomedical, Calibration and Networks. <https://www.fluke.com/es-mx/producto/comprobacion-electrica/pinzas-amperimetricas/fluke-a3004-fc>.
- [24]SIEMENS. (s. f.). SIMATIC S7-200. SIMATIC Controller SIEMENS. http://www.grupdap.es/ficheros/descriptecnicas/SIMATIC_S7200_Sep_2008.pdf
- [25]FR-S500 Manual de instrucciones (Básico), Mitsubishi Electric, Tokio, Japón.

- [26]Perez Romero, E. (2020). Banco de pruebas para bombas centrífugas con protocolo IO-LINK [Tesis]. IPN.
- [27]Solano García, J. C. (2012). Sistema de control de presión para el suministro de agua en la central de servicios del centro médico nacional de la Raza [Tesis]. IPN.
- [28]Cruz Uribe, C. A. (2020). Implementación del IloT mediante comunicación GPRS en un módulo de flujo aplicando la industria 4.0 [Tesis]. IPN.
- [29]Muhammad H Al-Khalifah. (2012). Control valve versus variable speed drive for flow control. ISA.
- [30]Sang-Ho Suh. (2015). A Study on Energy Saving Rate for Variable Speed Condition of Multistage Centrifugal Pump. Journal of Thermal Science, 24.
- [31]Lamaddalena, N. (2011, 3 de marzo). Energy saving with variable speed pumps in on-demand irrigation systems.
- [32]Enerdata. (s. f.). Emisiones de CO2 procedentes de la combustión de combustibles | Estadísticas mundiales actualizadas sobre CO2 | Enerdata. Estadísticas energéticas mundiales. <https://datos.enerdata.net/quema-co2-combustible/emisiones-CO2-procedentes-quema-combustible.html>



ANEXOS



1.1 DATOS GENERALES DE LA GAMA

Serie		FR-S 520 S EC/ECR				FR-S 540 EC/ECR				
		0,2 k	0,4 k	0,75 k	1,5 k	0,4 k	0,75 k	1,5 k	2,2 k	3,7 k
Potencia nominal del motor [kW] ^①		0,2	0,4	0,75	1,5	0,4	0,75	1,5	2,2	3,7
Salida	Potencia de salida [kVA]	0,5	1,0	1,6	2,8	0,9	1,6	2,7	3,7	5,9
	Intensidad nominal del aparato [A]*	1,4	2,5	4,1	7,0	1,1 (1,2)	2,1 (2,4)	3,5 (3,9)	4,8 (5,3)	7,7 (8,5)
	Capacidad de sobrecarga ^②	200 % de la intensidad nominal del aparato por 0,5 s; 150 % por 1 min.								
	Tensión ^③	trifásica, 0 V bis tensión de conexión								
Entrada	Tensión de conexión	monofásica, 200–240 V AC				trifásica, 380–480 V AC				
	Gama de tensión de conexión	170–264 V AC con 50 / 60 Hz				325–528 V AC con 50 / 60 Hz				
	Frecuencia de conexión	50 / 60 Hz ± 5 %				50 / 60 Hz ± 5 %				
	Potencia nominal de entrada [kVA] ^④	0,9	1,5	2,5	4,4	1,5	2,5	4,5	5,5	9,5
Clase de protección		IP 20								
Refrigeración		Autorefrigeración			Ventilador	Autorefrigeración			Ventilador	
Peso [kg]		0,6	0,8	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,7
Señales de control	Procedimiento de mando		Mando V/f o regulación vectorial							
	Procedimiento de modulación		Modulación PWM valorada sinusoidalmente, Soft-PWM							
	Frecuencia de reloj		0,7–14,5 kHz, reloj regulable							
	Rango de frecuencias		0,5–120 Hz							
	Resolución de la frecuencia	analógica	Mediante bornes 2–5: 1/500 del valor de frecuencia nominal máximo (Entrada 5 V DC); 1/1000 (Entrada 10 V, 20 mA DC)							
	Precisión de frecuencia		±1 % de la frecuencia máxima (rango de temperatura 25 °C ± 10 °C) con entrada analógica; ±0,5 % de la frecuencia máxima con entrada digital (ajuste mediante Digital Dial)							
	Tiempo cero posible		≥ 150 % / 6 Hz (con elevación automática del torque)							
	Tiempo de aceleración / frenado		0; 0,1 a 999 s regulable separadamente							
	Curva característica de aceleración / frenado		Lineal o sinusoidal, libremente seleccionable							
	Momento de frenado ^⑤	regenerativo	0,2 k: 150 %; 0,4 k y 0,75 k: 100 %; 1,5 k: 50 %, 2,2 k y 3,7 k: 20 %							
freno DC		Duración de freno y momento de frenado ajustables, frecuencia de trabajo: 0–120 Hz, tiempo de operación: 0–10 s, tensión: 0–15 % (externamente ajustable)								

ESPECIFICACIONES

(2) FR-E500

■ 3x220V

Tipo FR-E520- □K (C) (Nota 8)		0.1K	0.2K	0.4K	0.75K	1.5K	2.2K	3.7K	5.5K	7.5K	
Salida	Potencia Nominal Motor (kW) (Nota 1)	0.1	0.2	0.4	0.75	1.5	2.2	3.7	5.5	7.5	
	Potencia nominal (kVA) (Nota 2)	0.3	0.6	1.2	2.0	3.2	4.4	7.0	9.5	13.1	
	Intensidad Nominal (A) (Nota 6)	0.8 (0.8)	1.5 (1.4)	3 (2.5)	5 (4.1)	8 (7)	11 (10)	17.5 (16.5)	24 (23)	33 (31)	
	Capacidad de Sobrecarga (Nota 3)	150% 60 segundos, 200% 0.5 segundos									
Alimentación Entrada	Voltaje (Nota 4)	3x 200V a 240V 50Hz/60Hz (280VDC, Nota 7)									
	Voltaje AC (DC) permitido, frecuencia	3x 200V a 240V 50Hz/60Hz (252 a 310VDC, Nota 7)									
	Fluctuación de Voltaje permisible (AC)	170 a 264V 50Hz/60Hz									
	Fluctuación Permisible de Frecuencia	±5									
	Potencia Nominal de Entrada (kVA) (Nota 5)	0.4	0.8	1.5	2.5	4.5	5.5	9	12	17	
	Grado de Protección (JEM1030)	Tipo (IP20), IP40 con accesorio									
Sistema de ventilación	Aletado					Ventiladores incorporados – Ventilación forzada					
Peso aproximado (Kg.)	0.6	0.6	0.8	1.0	1.7	1.7	2.2	4.4	4.9		

■ Monofásico 220VAC

Tipo FR-E520S- □K		0.1K	0.2K	0.4K	0.75K
Salida	Potencia Nominal Motor (kW) (Nota 1)	0.1	0.2	0.4	0.75
	Capacidad Nominal (kVA) (Nota 2)	0.3	0.6	1.2	2.0
	Intensidad Nominal (A) (Nota 6)	0.8(0.8)	1.5(1.4)	3.0(2.5)	5.0(4.1)
	Capacidad de Sobrecarga (Nota 3)	150% 60 segundos 200% 0.5 segundos			
Alimentación Entrada	Voltaje (Nota 4)	3x 200V a 240V 50Hz/60Hz			
	Voltaje AC permitido, frecuencia	Monofásico 200V a 240V 50Hz/60Hz			
	Fluctuación de Voltaje permisible (AC)	Monofásico, 180 a 264V 50Hz/60Hz			
	Fluctuación Permisible de Frecuencia	±5%			
	Potencia Nominal de Entrada (kVA)	0.5	0.9	1.5	2.5
	Grado de Protección (JEM1030)	Tipo (IP20)			
Sistema de ventilación	Aletado			Ventiladores incorporados – Ventilación forzada	
Peso aproximado (Kg.)	0.6	0.6	1.0	1.7	

- Nota: 1. La Potencia nominal del motor a aplicar hace referencia a la máxima potencia cuando se trabaja con un motor estándar Mitsubishi de 4 polos. Normalmente, la corriente nominal (a 50Hz) del motor aplicado no debería exceder de la corriente nominal que figure en la placa del motor.
2. La potencia de salida indicada asume que la salida de voltaje es de 220V para el 3x 200V y el monofásico de 200V.
3. La capacidad de sobrecarga en % es el ratio de la sobre corriente respecto a la Intensidad nominal. Para ciclos repetitivos, el tiempo permitido a temperatura ambiente ha de estar cerca del 100%.
4. El máximo voltaje de salida no puede exceder nunca del voltaje suministrado en la entrada. Una salida por debajo del voltaje de alimentación es posible mediante parámetro.
5. La potencia de la Fuente de Alimentación cambia con el valor de la impedancia de la fuente (incluyendo las pérdidas en el cableado y la inductancia de entrada).
6. La corriente nominal en paréntesis se consigue cuando trabaja en modo "low acoustic noise" a 2KHz o más y una temperatura de 40°C. La función "low acoustic noise – SOFT-PWM" es ajustada con el Pr. 72 (selección frecuencia PWM).
7. Cuando se use fuente de voltaje DC en modelos 3x220V:
- (1) La guía indica una fluctuación de voltaje de 280VDC ±10%, pero usualmente es permitido trabajar con F. Alimentación de 300VDC
 - (2) Cuando la F.A se activa, una gran corriente de arranque circula a través del circuito de AC. El número de consultaciones de la fuente debería ser lo más pequeña posible.
 - (3) 300VDC deberían ser reservados para ofrecer a la salida la misma característica de par que con la entrada en alterna.

SIEMENS

Data Sheet SIMATIC S7-200 CPU 226 DC/DC/DC and CPU 226 AC/DC/Relay

Table 1 Specifications for CPU 226 DC/DC/DC and CPU 226 AC/DC/Relay

Description Order Number	CPU 226 DC/DC/DC 6ES7 216-2AD21-0XB0	CPU 226 AC/DC/Relay 6ES7 216-2BD21-0XB0
Physical Size		
Dimensions (W x H x D)	196 mm x 80 mm x 62 mm	196 mm x 80 mm x 62 mm
Weight	550 g	660 g
Power loss (dissipation)	11 W	17 W
CPU Features		
On-board digital inputs	24 inputs	24 inputs
On-board digital outputs	16 outputs	16 outputs
High speed counters (32 bit value)		
Total	6 High-speed counters	6 High-speed counters
Single phase counters	6, each at 20 kHz clock rate	6, each at 20 kHz clock rate
Two phase counters	4, each at 20 kHz clock rate	4, each at 20 kHz clock rate
Pulse outputs	2 at 20 kHz pulse rate	2 at 20 kHz pulse rate
Analog adjustments	2 with 8 bit resolution	2 with 8 bit resolution
Timed interrupts	2 with 1 ms resolution	2 with 1 ms resolution
Edge interrupts	4 edge up and/or 4 edge down	4 edge up and/or 4 edge down
Selectable input filter times	7 ranges from 0.2 ms to 12.8 ms	7 ranges from 0.2 ms to 12.8 ms
Pulse Catch	14 pulse catch inputs	14 pulse catch inputs
Time of Day Clock (clock accuracy)	2 minutes per month at 25° C 7 minutes per month 0° C to 55° C	2 minutes per month at 25° C 7 minutes per month at 0° C to 55° C
Program size (stored permanently)	4096 words	4096 words
Data block size (stored permanently):		
Stored permanently	2560 words	2560 words
Backed by super capacitor or battery	2560 words	2560 words
Number of expansion I/O modules	7 modules	7 modules
Maximum digital I/O	256 points	256 points
Maximum analog I/O	32 inputs and 32 outputs	32 inputs and 32 outputs
Internal memory bits	256 bits	256 bits
Stored permanently on power down	112 bits	112 bits
Backed by super capacitor or battery	256 bits	256 bits
Timers total	256 timers	256 timers
Backed by super capacitor or battery	64 timers	64 timers
1 ms	4 timers	4 timers
10 ms	16 timers	16 timers
100 ms	236 timers	236 timers
Counters total	256 counters	256 counters
Backed by super capacitor or battery	256 counters	256 counters
Boolean execution speed	0.37 µs per instruction	0.37 µs per instruction
Move Word execution speed	34 µs per instruction	34 µs per instruction
Timer/Counter execution speed	50 µs to 64 µs per instruction	50 µs to 64 µs per instruction
Single precision math execution speed	46 µs per instruction	46 µs per instruction
Real math execution speed	100 µs to 400 µs per instruction	100 µs to 400 µs per instruction
Super capacitor data retention time	190 hours, typical, 120 hours minimum at 40° C	190 hours, typical, 120 hours minimum at 40° C