

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS

IMPLEMENTACIÓN DE DOS MÓDULOS DIDÁCTICOS PARA CONTROL DE VELOCIDAD DE MOTORES TRIFÁSICOS UTILIZANDO VARIADORES DE FRECUENCIA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE TECNÓLOGO EN ELECTROMECAÁNICA

Pablo Hernan Cunuhay Ataballo

pablo.cunuhay@epn.edu.ec

Carlos Humberto Haro Supa

carlos.haro01@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. ALAN DANIEL CUENCA SÁNCHEZ MSC.

alan.cuenca@epn.edu.ec

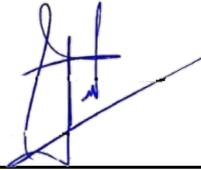
CODIRECTOR: ING. CARLOS ORLANDO ROMO HERRERA MSC.

carlos.romo@epn.edu.ec

Quito, junio de 2021

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por los señores Carlos Humberto Haro Supa y Pablo Hernan Cunuhay Ataballo como requerimiento parcial a la obtención del título de TECNÓLOGO EN ELECTROMECAÁNICA, bajo nuestra supervisión:



**Ing. Alan Daniel Cuenca
Sánchez**

DIRECTOR DEL PROYECTO

CARLOS
ORLANDO
ROMO HERRERA

Firmado digitalmente por CARLOS
ORLANDO ROMO HERRERA
DN: cn=CARLOS ORLANDO
ROMO HERRERA, c=EC,
email=cromo36@hotmail.com
Fecha: 2021.06.07 20:46:28 -05'00'

**Ing. Carlos Orlando Romo
Herrera**

CODIRECTOR DEL PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros Carlos Humberto Haro Supa con CI: 1723720585 y Pablo Hernan Cunuhay Ataballo con CI: 1723644025 declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Sin perjuicio de los derechos reconocidos en el primer párrafo del artículo 144 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación – COESC-, somos titulares de la obra en mención y otorgamos una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva de uso con fines académicos a la Escuela Politécnica Nacional.

Entregamos toda la información técnica pertinente, en caso de que hubiese una explotación comercial de la obra por parte de la EPN, se negociará los porcentajes de los beneficios conforme lo establece la normativa nacional vigente.



Carlos Humberto Haro Supa



Pablo Hernan Cunuhay Ataballo

DEDICATORIA

A Dios por permitirme llegar a cumplir una de mis metas.

A mis padres que a lo largo de los años supieron educarme de buena manera para que pueda ser la persona que soy en la actualidad.

A mi esposa Gloria quien con su gran apoyo y motivación nunca permitieron que me rindiera ante las difíciles circunstancias que un estudiante y padre de familia atraviesa durante su vida de formación profesional.

A mis hijas Doménica y Victoria quienes amo con todas mis fuerzas y fueron mi motivación diaria para levantarme y salir a trabajar y estudiar.

Pablo Cunuhay

AGRADECIMIENTO

A Dios por guiar mis pasos durante esta gran etapa de mi vida y lo que vendrá.

A la Escuela Politécnica Nacional por abrirme las puertas y permitirme estudiar en tan prestigiosa universidad.

A los docentes quienes con tanta dedicación y responsabilidad compartieron los conocimientos que ayudaron a formarme como un profesional.

Pablo Cunuhay

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi Madre que, gracias a su apoyo, su ejemplo de esfuerzo y trabajo diario, he llegado a alcanzar este importante logro en mi vida.

Muchas Gracias Madre querida.

Carlos Haro

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, a Dios.

A mi Madre y hermanos Katherin, Marcelo y Danny por su apoyo incondicional para que pueda alcanzar esta meta.

A la Escuela Politécnica Nacional y ESFOT por la formación profesional y personal que me inculcaron.

A los ingenieros y profesores de la Escuela Politécnica Nacional que, a más de sus enseñanzas impartidas, me transmitieron valores que siempre los debo aplicar en mi vida profesional y personal.

A mis compañeros y amigos que me acompañaron y apoyaron durante este proceso de formación.

Carlos Haro

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción	13
1.1	Objetivo general	13
1.2	Objetivos específicos	14
2	Metodología	15
2.1	Descripción de la metodología usada	15
3	Resultados y Discusión	17
3.1	Requerimientos	17
	Tamaño y dimensiones	17
	Dispositivos disponibles en el laboratorio	19
	Tipos de control y principales funciones del variador de frecuencia	20
3.2	Construcción de las estructuras metálicas	24
	Diseño	24
	Elaboración de las estructuras	24
	Soporte prefabricado	27
3.3	Conexiones eléctricas	28
	Protección magnética	28
	Contactador principal	29
	Conductores eléctricos	31
	Planos eléctricos	31
	Instalación de componentes	32
	Etiquetado	35
3.4	Pruebas y análisis de resultados	39
	Pruebas en elementos de accionamiento, control y comunicación	39
	Pruebas de velocidad	44
	Pruebas mecánicas en las estructuras	48
3.5	Hojas guías de laboratorio	49
	Práctica 1	49

Práctica 2.....	50
Práctica 3.....	50
3.6 Manual de uso y mantenimiento	51
4 Conclusiones y recomendaciones	52
4.1 Conclusiones	52
4.2 Recomendaciones	53
5 Referencias Bibliográficas	55
ANEXOS.....	57
Anexo 1: Certificado de funcionamiento.....	i
Anexo 2: Planos y esquemas.....	iii
Anexo 3: Hojas guías de prácticas.....	iv
Anexo 4: Datos técnicos	xiv

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1	Variador de frecuencia ATV-630 con sus partes principales.....	17
Figura 3.2	Dimensiones del variador de frecuencia.....	18
Figura 3.3	Diagrama T vs F para aplicaciones de par cuadrático.....	21
Figura 3.4	Diagrama T vs F para perfil de torque personalizado.....	22
Figura 3.5	Diagrama T vs F para adaptación automática de torque.....	22
Figura 3.6	Corte de Material para módulos.....	25
Figura 3.7	Pulido de las estructuras metálicas.....	26
Figura 3.8	Dobladora manual para tol metálico.....	26
Figura 3.9	Estructura de soporte construida.....	27
Figura 3.10	Soporte prefabricado y Variador ATV-630.....	28
Figura 3.11	Disyuntor GV2L08.....	29
Figura 3.12	Contactador NC1-0910.....	30
Figura 3.13	Colocación del Variador de frecuencia en el soporte prefabricado.....	32
Figura 3.14	Etiqueta adhesiva para el panel de conexiones.....	33
Figura 3.15	Perforaciones realizadas en el panel de conexiones.....	33
Figura 3.16	Cableado del circuito de control y protección.....	34
Figura 3.17	Tipos de terminales usados y su colocación en el cableado.....	34
Figura 3.18	Etiquetado y cableado con elementos de sujeción y protección.....	35
Figura 3.19	Módulo didáctico con sus componentes.....	35
Figura 3.20	Módulos para variadores de velocidad implementados.....	38
Figura 3.21	Pruebas de continuidad.....	39
Figura 3.22	Conexión del variador de frecuencia y el controlador LOGO.....	39
Figura 3.23	Pruebas en entradas analógicas usando fuente de voltaje.....	41
Figura 3.24	Conexión entre los potenciómetros y los diodos 1N4007.....	42
Figura 3.25	Comunicación entre el variador y una PC vía Ethernet.....	43
Figura 3.26	Pruebas de velocidad usando tacómetro digital.....	44
Figura 3.27	Medición de valores de corriente en los motores trifásicos.....	46
Figura 3.28	Curva de voltaje en relación a la frecuencia.....	47
Figura 3.29	Curva de corriente en relación a la frecuencia.....	48
Figura 3.30	Pruebas de movilidad en los módulos didácticos.....	48
Figura 3.31	Código QR para el video del manual de uso.....	51
Figura 3.32	Código QR para el video del manual de mantenimiento.....	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Dispositivos usados para el funcionamiento de los módulos.....	19
Tabla 3.2	Material usado para la construcción de los módulos.	25
Tabla 3.3	Datos técnicos del disyuntor GV2L08	29
Tabla 3.4	Datos técnicos del contactor de 9 (A)	31
Tabla 3.5	Elementos de accionamiento, control y comunicación de los módulos.	36
Tabla 3.6	Pruebas de funcionamiento en elementos de accionamiento y control	40
Tabla 3.7	Pruebas realizadas en entradas y salidas analógicas.....	42
Tabla 3.8	Pruebas realizadas en los elementos de comunicación	43
Tabla 3.9	Datos de velocidad y error porcentual módulo 1	45
Tabla 3.10	Datos de velocidad y error porcentual módulo 2	45
Tabla 3.11	Datos medidos de voltaje y corriente a distintas frecuencias	47
Tabla 3.12	Pruebas mecánicas en las estructuras de los módulos.....	49

RESUMEN

El actual proyecto de titulación, tiene como objetivo principal la construcción de dos módulos didácticos para el control de motores trifásicos usando variadores de velocidad. Mediante estos módulos los estudiantes de la Escuela de Formación de Tecnólogos de la carrera de Electromecánica obtendrán conocimientos sobre variadores de frecuencia, ya que podrán simular procesos industriales en donde es necesario el control de velocidad y torque de los motores eléctricos.

El presente trabajo se ha dividido en cinco secciones que se detallan a continuación:

En la sección 1 se presenta la introducción y se describen el objetivo general y los objetivos específicos.

La sección 2 detalla la metodología que fue usada para el desarrollo del proyecto y el proceso que se siguió para su implementación.

En la sección 3 se muestran los requerimientos que se cumplieron en la implementación de los módulos; además, se explican con mayor detalle los resultados obtenidos durante el proceso de construcción de las estructuras metálicas e implementación de los circuitos eléctricos; también, se exponen los resultados de las pruebas de funcionamiento y de las prácticas desarrolladas.

La sección 4 muestra las conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron después de la finalización del proyecto correspondiente a la implementación de los módulos didácticos.

Finalmente, en la sección 5 se detallan las referencias bibliográficas utilizadas para el desarrollo del proyecto.

PALABRAS CLAVE: Variador, frecuencia, velocidad, módulos didácticos, control.

ABSTRACT

The current degree project has as its main objective the construction of two didactic modules for the control of three-phase motors using variable speed drives. Through these modules, students of the Electromechanical Career Technologist Training School will obtain knowledge about frequency inverters since they will be able to simulate industrial processes where it is necessary to control the speed and torque of electric motors.

This work has been divided into five sections that are detailed below:

Section 1 presents the introduction and describes the general objective and the specific objectives.

Section 2 details the methodology that was used for the development of the project and the process that was followed for its implementation.

Section 3 shows the requirements that were met during the implementation of modules; besides, the results obtained during the process of construction of metallic structures and implementation of electrical circuits are explained in greater detail; also, the results of performance tests and practices developed are exposed.

Section 4 shows the conclusions and recommendations that were obtained after completion of the project corresponding to the implementation of didactic modules.

Finally, in section 5 bibliographic references used for the development of the project are detailed.

KEYWORDS: Variator, frequency, speed, didactic modules, control.

1 INTRODUCCIÓN

El Laboratorio de Tecnología Industrial (LTI) de la ESFOT cuenta con varios módulos didácticos que permiten a los estudiantes manejar equipos industriales, complementando de esta manera su aprendizaje mediante prácticas. Sin embargo, el laboratorio no cuenta con suficientes dispositivos que permitan por ejemplo controlar de forma eficiente la velocidad y el torque de los motores trifásicos asíncronos disponibles.

Entre los dispositivos más utilizados para controlar la velocidad de motores trifásicos se encuentran los variadores de frecuencia debido a las ventajas que presentan en comparación con otros métodos de control existentes, tal y como lo menciona ABB en su página web “ El uso de los variadores de frecuencia para el control inteligente de los motores tiene muchas ventajas financieras, operativas y medioambientales ya que supone una mejora en la productividad, incrementando la eficiencia energética y a la vez alarga la vida útil de los equipos, previniendo el deterioro y evitando paradas inesperadas que provocan tiempos de inproductividad”. [1]

Por tal motivo, se planteó la implementación de dos módulos didácticos usando variadores de frecuencia que permitan la interacción con otros dispositivos de control del LTI mediante la utilización de entradas y salidas tanto digitales como analógicas y protocolos de comunicación (Modbus TCP o Ethernet).[2]

De esta forma los módulos didácticos permitirán que los estudiantes puedan profundizar sus conocimientos sobre las distintas funciones de control de velocidad y torque que poseen los variadores de frecuencia. Además, mediante un panel didáctico presente en cada módulo se podrá realizar la simulación de diferentes procesos industriales.

En el **Anexo 1** se adjunta el certificado de funcionamiento de los módulos, este garantiza que su construcción y funcionamiento son adecuados.

1.1 Objetivo general

Implementación de dos módulos didácticos para control de velocidad de motores trifásicos utilizando variadores de frecuencia.

1.2 Objetivos específicos

Determinar los requerimientos para la implementación de los módulos didácticos

Construir las estructuras metálicas para los módulos didácticos

Realizar las conexiones eléctricas

Realizar las respectivas pruebas de funcionamiento

Elaborar tres hojas guías para prácticas de laboratorio

Elaborar un manual de usuario y mantenimiento

2 METODOLOGÍA

2.1 Descripción de la metodología usada

Para la implementación de los módulos didácticos en base a variadores de frecuencia se utilizó la investigación aplicada que permite a través de etapas ordenadas y definidas utilizar el conocimiento teórico para desarrollar aplicaciones prácticas. [3]

Para optimizar el espacio físico disponible del LTI de la ESFOT se diseñó y construyó estructuras metálicas para cada variador de frecuencia, estas disponen de ruedas para facilitar su movimiento y cuentan con un panel en donde se pueden realizar las diferentes conexiones de los circuitos de control.

Las estructuras disponen del espacio necesario para contener el variador con su soporte prefabricado, un motor trifásico y el panel de conexiones con los dispositivos eléctricos de activación, protección y control. La selección y el dimensionamiento de todos estos dispositivos se realizó de forma adecuada lo que garantiza el buen funcionamiento de los módulos.[4] Para el manejo de los variadores de frecuencia se investigó acerca de los tipos de control y las funciones que pueden ser aplicadas en prácticas de laboratorio. [5]

Tomando las medidas de los variadores de frecuencia se procedió a diseñar los planos esquemáticos de los módulos didácticos utilizando el programa AutoCAD. En base a dichos planos, se realizó la construcción de las estructuras metálicas usando diferentes procesos como: corte con discos abrasivos, soldadura SMAW, doblado de planchas metálicas y el pintado usando pistola y compresor. [6]

El diseño de los planos eléctricos tanto del circuito de alimentación, control y protección se realizó en el programa AutoCAD ELECTRICAL. Además, se realizaron perforaciones en los paneles de los módulos para colocar los elementos de control y protección. Con los elementos fijos y los planos disponibles se realizaron las conexiones eléctricas en los paneles de los módulos, cumpliendo con las normas técnicas que garantizan su correcto funcionamiento. [7]

Para verificar el desempeño de los módulos didácticos se realizaron pruebas funcionamiento en los elementos del panel de conexiones, en los elementos ubicados en el soporte del variador, en los dispositivos de control y protección de los módulos. Las pruebas mecánicas fueron hechas en la estructura modular para comprobar su firmeza, y las pruebas de movilidad para verificar el estado de las ruedas; además, se

comprobó la conectividad entre el variador de frecuencia y los controladores LOGO y el PLC S7-1 200. Finalmente se realizaron pruebas de control de velocidad de los motores trifásicos utilizando los variadores de frecuencia. [8]

Una vez comprobado el correcto funcionamiento de los módulos, se realizaron tres hojas guías para prácticas de laboratorio con su respectiva resolución. Estas hojas guías permitirán utilizar funciones de control de los variadores en conjunto con los dispositivos disponibles en el laboratorio como motores asíncronos, controlador LOGO y PLC S7-1200.[5]

Por último, se desarrolló un video informativo sobre el uso de los módulos didácticos y un video sobre el mantenimiento que se debe realizar a los mismos.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los módulos didácticos para control de velocidad usando variadores de frecuencia, son dos estructuras metálicas móviles que cuentan cada una con un variador de frecuencia, un espacio para colocar un motor trifásico y un panel de conexiones en donde se encuentran la mayoría de los elementos de control, como entradas digitales y analógicas, salidas tipo relé, salidas analógicas y puertos de comunicación que dispone el variador. Los elementos mencionados, las funciones de control del variador y la posibilidad de conectarlos con otros dispositivos como PLC's, permiten simular distintos procesos en donde se requiere el control de velocidad de los motores trifásicos.

3.1 Requerimientos

Tamaño y dimensiones

Para establecer los requerimientos en base a las dimensiones de los módulos didácticos se tomó en cuenta el principal componente de estos, que es el variador de frecuencia. Este dispositivo ha sido diseñado para el control de máquinas de par variable como bombas y ventiladores centrífugos, tiene la capacidad de detectar el mejor punto de eficiencia de la bomba, además, puede detectar zonas críticas de trabajo como cavitación o bajo flujo para que se tomen los correctivos necesarios y evitar daños en las bombas. En la **Figura 3.1** se puede apreciar al variador de frecuencia con sus partes principales.

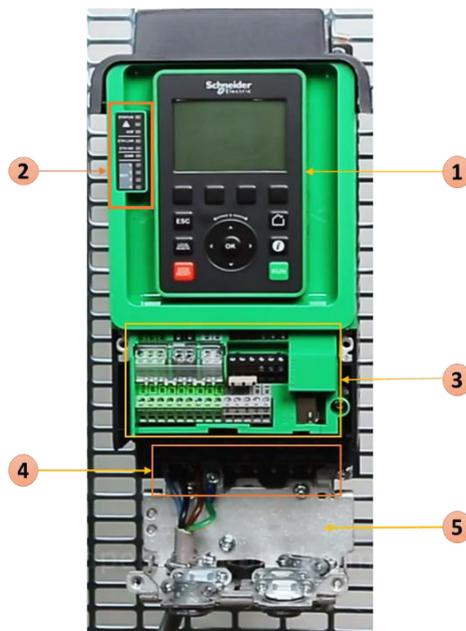


Figura 3.1 Variador de frecuencia ATV-630 con sus partes principales[9].

1. Terminal gráfico
2. Leds de estado del variador
3. Bloque de control y puertos de comunicación
4. Borneras del bloque de potencia
5. Base para compatibilidad electromagnética

El bloque de control contiene los siguientes elementos

- 3 salidas a relé
- 6 entradas lógicas (digitales)
- 3 entradas analógicas
- 2 salidas analógicas
- 2 entradas de seguridad STO
- Puerto de comunicación Ethernet y Modbus TCP

El variador tiene unas dimensiones de 144 (mm) de ancho por 350 (mm) de alto y 203 (mm) de profundidad. En la **Figura 3.2** se pueden apreciar con mayor detalle las dimensiones del variador de frecuencia ATV-630.

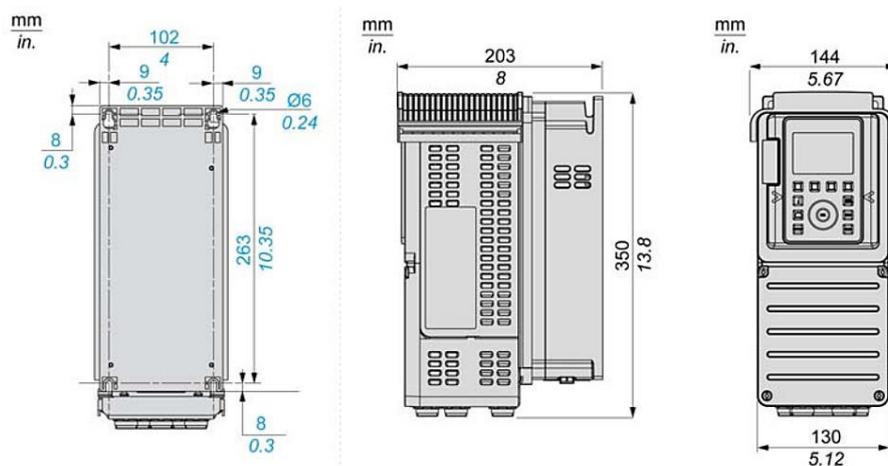


Figura 3.2 Dimensiones del variador de frecuencia.[2]

Además, para determinar el tamaño de los módulos se consideraron las dimensiones del soporte prefabricado del variador que posee 240 (mm) de ancho por 560 (mm) de alto y 265 (mm) de profundidad (Ver **Figura 3.10**) y las medidas de las mesas de trabajo del área de control del LTI-ESFOT, las cuales tienen 1.45 (m) de ancho por 0.75 (m) de profundidad y 0.90 (m) de alto por mesa. Por lo tanto, se determinó un tamaño de las mesas de los módulos de 0.605 (m) de ancho por 0.605 (m) de largo y 0.90 (m) de alto, a esta altura se debe sumar la medida del panel de conexiones de 0.62 (m), lo que da una altura total de los módulos de 1.52 (m). Con estas dimensiones los módulos pueden

ubicarse junto a las mesas de trabajo del laboratorio sin interferir con la comodidad de los estudiantes al momento de realizar prácticas en el laboratorio. Además, del tamaño específico de los módulos se cumplieron también los siguientes requerimientos:

- La estructura es fácilmente transportable.
- Disposición adecuada del variador de frecuencia, para su correcta utilización.
- Diseño de panel de control adecuado para alimentación eléctrica, borneras de conexión, elementos de accionamiento, control y comunicación
- Circuitos de protección eléctrica, para el resguardo de los dispositivos y del usuario.

Dispositivos disponibles en el laboratorio

Para el diseño y construcción de los módulos didácticos se tomaron en cuenta diferentes elementos de control del LTI que permitan realizar prácticas orientadas a la simulación de procesos industriales en donde se realice el control de velocidad. Los elementos que se tomaron en cuenta se pueden ver en la **Tabla 3.1**.

Tabla 3.1 Dispositivos usados para el funcionamiento de los módulos.

Figura	Descripción	Características	
 <p>Alimentación trifásica de las mesas de laboratorio</p>	Se usa para energizar los módulos y el motor trifásico.	Tomas e Interruptor magnetotérmico circuitos de fuerza	16 (A)
		Tomas e Interruptor magnetotérmico circuitos de control	6 (A)
		Tensión máxima proporcionada	220 (V _{AC})
 <p>Motores trifásicos asíncronos</p>	Se utilizan para simular los diferentes procesos en los que se usa variadores de frecuencia.	Potencia	0.75 (HP)
		Tensión	220-440 (V _{AC})
		Frecuencia	60 (Hz)
		Corriente	2.6 (A)
		Velocidad máxima	1 735 (rpm)

Figura	Descripción	Características	
 <p>Relé lógico programable LOGO</p>	<p>Mediante sus entradas y salidas digitales puede controlar al variador de frecuencia, simulando procesos de mayor complejidad.</p>	Entradas digitales	8
		Salidas de relé	4
		Tensión máxima de funcionamiento	120 (V _{AC})
		Corriente máxima funcionamiento	10 (A)
 <p>Módulos de PLC S7-1 200</p>	<p>Las múltiples funciones del PLC S7-1 200 permiten ampliar el funcionamiento de los módulos para variadores de frecuencia.</p>	Entradas digitales	8
		Salidas de relé DQ	6
		Entradas analógicas	2
		Expansión de salidas DQ SM-1 222	8
		Expansión de E/S analógicas SM-1 234	4AI/2AO
		Pantalla Táctil	KTP-700

Tipos de control y principales funciones del variador de frecuencia

[5]

El variador de frecuencia cuenta con cuatro de tipos control para motores asíncronos y uno para motores síncronos, estos se pueden seleccionar dependiendo del tipo de máquina o aplicación que se quiera controlar.

CONTROL DE MOTORES ASÍNCRONOS

- **Control Vectorial Tensión-Frecuencia (VC U/F) Estándar**

Se usa para aplicaciones que requieren el par a una velocidad muy reducida. Con este tipo de control el par y la corriente se mantienen casi constantes a velocidades cercanas a cero, el par tiende a disminuir cuando el motor supera su velocidad nominal.

Aplicaciones:

- Bandas transportadoras
- Grúas

- **VC U/F Cuadrático**

Utilizado en aplicaciones en donde el par evoluciona como el cuadrado de la velocidad (par cuadrático). De esta forma se obtiene poco par a baja velocidad y par máximo a la velocidad nominal del motor. En el diagrama Torque vs Frecuencia (T vs F) de la **Figura 3.3** se puede ver como el par aumenta en forma cuadrática desde cero hasta que el motor alcanza su velocidad nominal, después empieza a decaer mientras que la potencia se mantiene constante.

Aplicaciones de torque variable:

- Cargas con torque cuadrático
- Cargas centrífugas: Ventiladores, bombas y compresores centrífugos

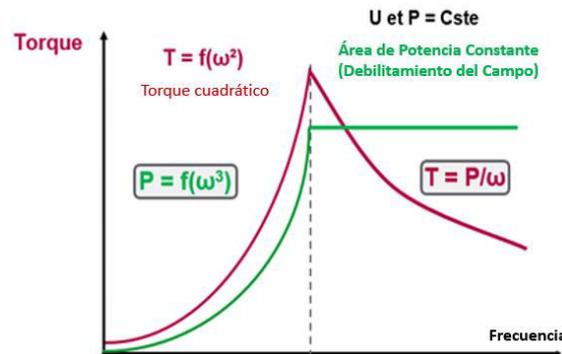


Figura 3.3 Diagrama T vs F para aplicaciones de par cuadrático[10].

- **Cinco puntos de VC U/F**

En aplicaciones en donde el perfil de torque no es constante y no es cuadrático, es posible adaptar el perfil de voltaje al perfil de carga. Permite usar 5 puntos intermedios en la curva de perfil de voltaje entre la velocidad cero y la frecuencia nominal del motor. En el diagrama de la **Figura 3.4** se puede ver que el torque aumenta según los puntos programados en el variador de frecuencia, cuando el motor alcanza su velocidad nominal el par empieza a disminuir.

Aplicaciones:

- En las que se requiere par variable

- Cargas no cuadráticas
- Bombas volumétricas o de vacío
- Compresores de tornillo o pistones

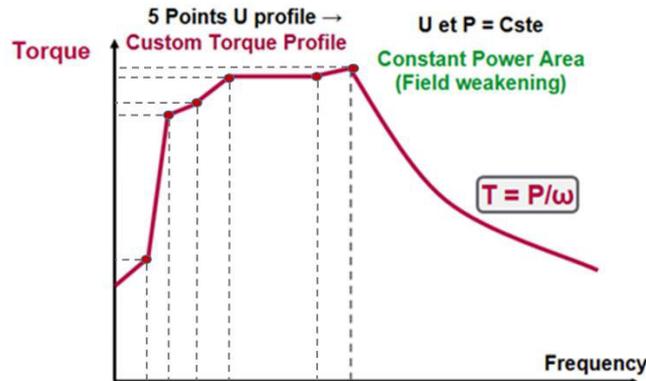


Figura 3.4 Diagrama T vs F para perfil de torque personalizado [10].

- **Ahorro de energía VC U/F**

La corriente proporcionada por el variador es reducida automáticamente de acuerdo con la carga que presente el motor. De esta forma se ahorra energía cuando la carga es mínima y se mantiene el rendimiento del variador a plena carga. En el diagrama Torque vs Frecuencia de la **Figura 3.5** se puede ver que el par se adapta según las necesidades que presente la máquina a controlar.

Aplicaciones:

- En las que se usa torque variable
- Bombas
- Ventiladores y sopladores
- Máquinas con baja dinámica de carga

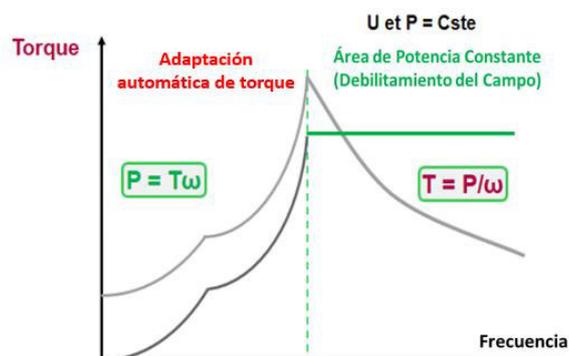


Figura 3.5 Diagrama T vs F para adaptación automática de torque[10].

- **Control vectorial de imán permanente (VC SYN_U)**

Control determinado para motores síncronos de imanes permanentes, se usa en aplicaciones que requieren par variable.

FUNCIONES

Para mejorar el rendimiento de los procesos que se necesita controlar, el variador cuenta con varias funciones destinadas a una aplicación específica y funciones que permiten optimizar la operación de los motores y máquinas.

Dadas las múltiples funciones con las que cuenta el variador ATV-630, se describen las más importantes y las que se utilizaron en el presente proyecto.

- **Control de refuerzo**

La función tiene como objetivo mantener la presión en un sistema de acuerdo con la demanda que se presente. Para esto se puede realizar lo siguiente:

- Cambiar la velocidad de la bomba conectada al variador
- Acoplar o desacoplar bombas auxiliares de velocidad fija.

- **Control PID**

El controlador PID permite regular y monitorear una variable de proceso (presión, caudal, nivel, etc....) que es asignada por el usuario, para esto se puede modificar la velocidad de una bomba a fin de que la variable de proceso se mantenga en un rango establecido y generar señales de advertencia cuando se superen valores de referencia; además, se puede establecer varios puntos de trabajo mediante las entradas digitales.

- **Dormir/Rearranque**

Permite detener los motores cuando existe baja demanda del líquido en un sistema y no se necesite mantener las bombas en funcionamiento; después, cuando la demanda del líquido aumenta, la función enciende los motores para compensar la demanda.

Esta función permite ahorrar energía y prevenir el desgaste prematuro de algunas partes de los motores y bombas que no pueden funcionar a baja velocidad por mucho tiempo, debido a que el engrasado o refrigeración dependen de la velocidad.

- **Llenado de tuberías**

Cuando las bombas inician el llenado de las tuberías a gran velocidad, puede producirse el efecto de golpe de ariete y dañar las tuberías o equipos del sistema. Esta función permite arrancar la bomba a velocidades reducidas por un tiempo determinado o hasta que se alcance una referencia o nivel preestablecido dentro de la función.

- **Velocidades preseleccionadas**

Permite establecer hasta 16 velocidades diferentes dentro del rango de velocidad que posea el motor, cada velocidad se establece mediante una combinación de las entradas digitales del variador.

3.2 Construcción de las estructuras metálicas

Diseño

Las estructuras de soporte fueron diseñadas en base a los requerimientos establecidos. Se dimensionó su altura considerando el tamaño estándar de las mesas de trabajo del laboratorio, a esta altura se agregaron las dimensiones del panel de conexiones y de las ruedas de soporte y movilidad. El ancho y la profundidad de las estructuras se establecieron para que puedan contener el soporte del variador de frecuencia, un motor trifásico y el panel de conexiones con los circuitos de control y protección.

Para que las estructuras tengan mayor estabilidad sus apoyos poseen un grado de inclinación con respecto a su eje vertical, y en sus bases disponen de una unión de refuerzo que impide que las mesas se doblen. Tomando en cuenta todos estos aspectos, se diseñaron los planos esquemáticos con el programa AutoCAD, los mismos que se pueden observar en la **lámina 1** en el **Anexo 2**.

Elaboración de las estructuras

A través de los planos esquemáticos desarrollados, se procedió a la selección de los materiales para la construcción de las estructuras metálicas de los módulos didácticos. El listado de los materiales que fueron adquiridos para el proceso de construcción se puede ver en la **Tabla 3.2**.

Tabla 3.2 Material usado para la construcción de los módulos.

Material	Cantidad por módulo	TOTAL
Angulo metálico de 30 x 30 x 1.5 (mm)	3 (m)	6 (m)
Angulo metálico de 40 x 40 x 1.5 (mm)	5 (m)	10 (m)
Tubo cuadrado metálico 30 x 30 x 1.5 (mm)	1.30 (m)	2.6 (m)
Panel galvanizado de 0.7 (mm)	0.40 (m ²)	0.80 (m ²)
Soporte prefabricado para el Variador	1	2
Ruedas Fijas	2	4
Ruedas Móviles	2	4
Tablón de Madera	0.36 (m ²)	0.72 (m ²)

Corte del material

Se procedió a cortar el material según el diseño y las medidas establecidas, para esto se usó una tronzadora de metal que permite realizar cortes con mayor precisión, posteriormente se pulieron los cortes usando una amoladora con disco de pulido (ver **Figura 3.6**).

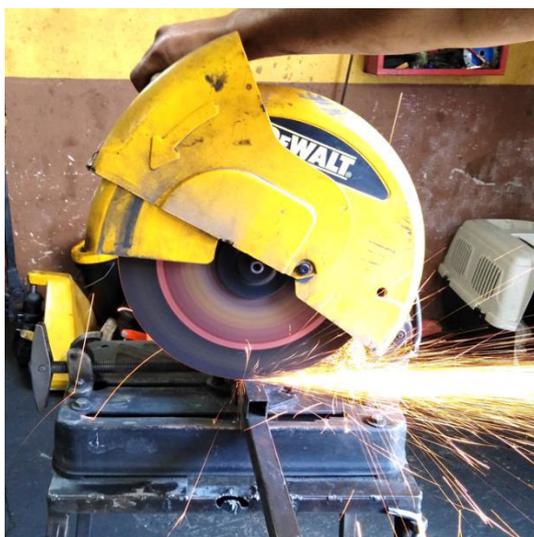


Figura 3.6 Corte de Material para módulos.

Soldadura de los módulos y fijación de ruedas

Para ensamblar el material y formar las estructuras se utilizó soldadura eléctrica SMAW que es la más usada para realizar estos procesos, además se eligió el electrodo 6011 ya que sus características permite la operación de soldeo en múltiples posiciones, además, sus propiedades mecánicas garantizan buena penetración con gran firmeza en la soldadura[11]; también, se colocaron los soportes del panel de conexiones que son dos tubos cuadrados metálicos que van soldados en los extremos de las mesas. En la **Figura 3.7** se puede ver el pulido de las estructuras tras finalizar el proceso de soldadura.



Figura 3.7 Pulido de las estructuras metálicas.

Elaboración del panel de conexiones

Es un panel galvanizado de 0.7 (mm) de forma rectangular que aloja elementos como pulsadores, interruptores y borneras de conexión. Para darle más firmeza se procedió a doblar sus bordes a un ángulo de 90°; para esto, primero se realizaron destajes en las esquinas de la lámina y se utilizó una máquina dobladora manual para los respectivos dobleces (Ver **Figura 3.8**). Para fijar los paneles a los soportes se usaron remaches de cabeza plana.



Figura 3.8 Dobladora manual para tol metálico.

Pintado

Para realizar el pintado de las estructuras se colocó una pintura anticorrosiva de color gris, esta capa es fundamental, ya que evita que se forme óxido. Posteriormente, se procedió a dar el acabado final usando una pintura esmalte de color marrón que permite aumentar la protección contra el óxido y el polvo.

En la **Figura 3.9** se puede ver la estructura metálica con los soportes de madera y el panel de conexiones.



Figura 3.9 Estructura de soporte construida

Soporte prefabricado

Fabricado con planchas metálicas, soporta el peso del variador y lo mantiene fijo evitando problemas de vibración. Además, en su parte frontal contiene los selectores que activan las entradas digitales del variador y los potenciómetros de las entradas analógicas. El soporte se puede observar en la **Figura 3.10**.



Figura 3.10 Soporte prefabricado y Variador ATV-630.

3.3 Conexiones eléctricas

Protección magnética

Siguiendo las recomendaciones del fabricante, para la protección del variador de frecuencia se colocó un disyuntor magnético en las líneas que conectan al variador con la alimentación. El disyuntor proporciona las siguientes funcionalidades:

- Aislamiento con bloqueo
- Interruptor (interruptor de carga completa)
- Protección contra cortocircuitos aguas arriba [2].

La selección se realizó en base a la **Tabla A. 3** que se encuentra en el **Anexo 4**, esta fue obtenida del manual de instalación del equipo.

El disyuntor seleccionado se puede ver en la **Figura 3.11** y sus características se encuentran en la **Tabla 3.3**.



Figura 3.11 Disyuntor GV2L08.

Tabla 3.3 Datos técnicos del disyuntor GV2L08 [12].

Características del disyuntor magnético GV2L 4A 50KA	
Marca	Schneider Electric
Aplicación del dispositivo	Motor
Tipo de red	CA
Categoría de empleo	AC-3 (Arranque y frenado de motores de inducción)
Capacidad de corte	100 (KA) en 230/240 (V _{AC})
Tecnología de unidad de disparo	Magnético
Intensidad de disparo magnético	51 (A)
Tensión nominal	690 (V _{AC})
Grado de protección IP	IP20
Temperatura ambiente de funcionamiento	-20.....60 (°C)

Contactor principal

Para seleccionar el contactor se utilizó la corriente de trabajo del variador de frecuencia o corriente nominal. Este valor se obtuvo de la **Tabla A. 4** del **Anexo 4**.

Con el dato de corriente nominal del variador y aplicando la **Ecuación 3.1** se calculó la corriente del contactor principal (I_{cp}) tomando en cuenta un factor de protección del 50% de la I_{cp} [8].

$$I_{cp} = I_n * 1.5$$

Ecuación 3.1 Corriente del contactor principal[8] .

Donde:

I_{cp} : (A) corriente

I_n : 4.6 (A) corriente nominal del variador

1.5 : Factor de dimensionamiento

Por lo tanto:

$$I_{cp} = 6.9 \text{ (A)}$$

Para elegir el contactor principal se aproximó la I_{cp} obtenida a un valor comercial correspondiente a 9 (A). Además, se eligió la categoría de empleo del contactor usando la hoja guía que se encuentra en el **Anexo 4**. El contactor seleccionado se puede ver en la **Figura 3.12** y sus características se encuentran en la **Tabla 3.4**.



Figura 3.12 Contactor NC1-0910 [13].

Tabla 3.4 Datos técnicos del contactor de 9 (A) [13].

Contactor serie NC1 - 0910	
Marca	CHINT
Corriente de servicio nominal	9 (A)
Tensión de aislamiento nominal	690 (V _{AC})
Categoría de empleo	AC-3
Potencia del motor de inducción 200/240 (V _{ac})	3 (HP)
Contactos principales	3 NA
Contactos auxiliares	1 NA

Conductores eléctricos

Siguiendo las recomendaciones del fabricante del variador, se eligió un cable flexible 12 (AWG) de sección transversal tanto para la alimentación del variador como para los cables que energizan al motor de inducción. El cable seleccionado se encuentra dentro del rango establecido por el fabricante en la **Tabla A. 5** del **Anexo 4**.

Para los cables del bloque de control se eligió un cable flexible 18 (AWG) de sección transversal, que es el mínimo recomendado por el fabricante en el manual de instalación del variador, esta información se puede ver en **Tabla A. 6** del **Anexo 4**.

Planos eléctricos

Se realizaron dos planos usando el programa AutoCAD Electrical, estos muestran todas las conexiones eléctricas entre el panel de conexiones del módulo y el variador de frecuencia. Los planos eléctricos de los módulos se pueden observar en las láminas 2 y 3 que se encuentran en el **Anexo 2**.

En la **lámina 2** se muestra el circuito de alimentación que contiene el disyuntor para la protección del equipo, el contactor principal, un esquema básico del variador y las borneras para energizar al motor trifásico; además, se puede ver el circuito de accionamiento y paro del variador de frecuencia con todos sus elementos. Y en la **lámina 3** se muestran las conexiones entre el bloque de control del variador, el panel de elementos de control y los elementos de la parte frontal del soporte prefabricado.

Instalación de componentes

Se instaló el variador de frecuencia sobre el soporte prefabricado (ver **Figura 3.13**) y fue asegurado al panel de conexiones mediante pernos, previamente se realizaron perforaciones al soporte para la colocación del cableado entre el bloque de control y el panel de conexión.



Figura 3.13 Colocación del Variador de frecuencia en el soporte prefabricado.

Se realizaron perforaciones en el panel de conexiones con el fin de fijar los dispositivos de protección y control. Para los elementos de control se usó una broca de tipo sierra circular de 22 (mm) y una broca de 6 (mm) para las borneras de conexión. Antes de realizar las perforaciones se colocó un vinil adhesivo en el panel de conexiones con las etiquetas, nombres y ubicación de los elementos. El diseño de la etiqueta frontal del panel se puede observar en la **Figura 3.14**.

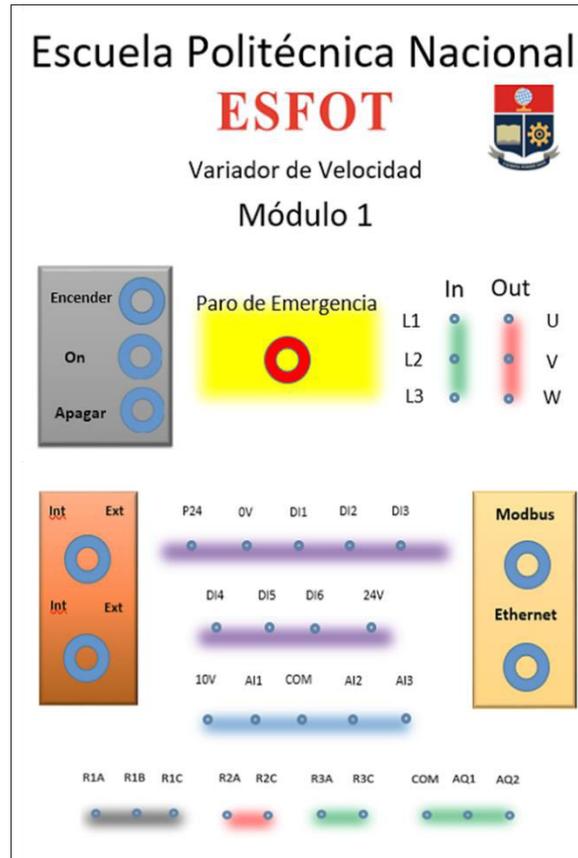


Figura 3.14 Etiqueta adhesiva para el panel de conexiones.

En la **Figura 3.15** se observa el proceso realizado para perforar el panel de conexiones y los elementos debidamente colocados en su respectivo lugar.



Figura 3.15. Perforaciones realizadas en el panel de conexiones

Una vez colocados los elementos, se procedió a conectar el circuito de alimentación de los módulos junto con el disyuntor y el contactor principal (ver **Figura 3.16**). Después se realizó la conexión del circuito de accionamiento y paro con todos sus elementos, por último, se realizó el cableado del circuito de control y comunicación.

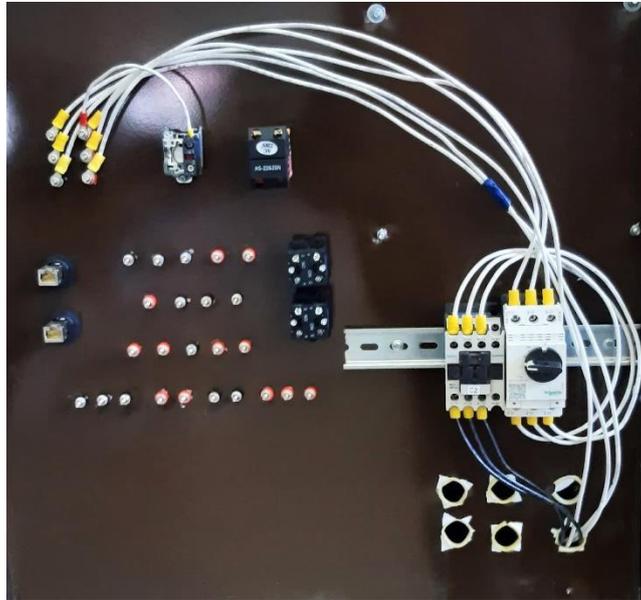


Figura 3.16 Cableado del circuito de control y protección.

Se utilizaron terminales tipo puntera para el cableado del bloque de control y los elementos de accionamiento. Para los conectores hembra tipo banana se usó terminales de tipo argolla. En la **Figura 3.17** se puede ver los terminales usados y su colocación en los cables de alimentación y control.

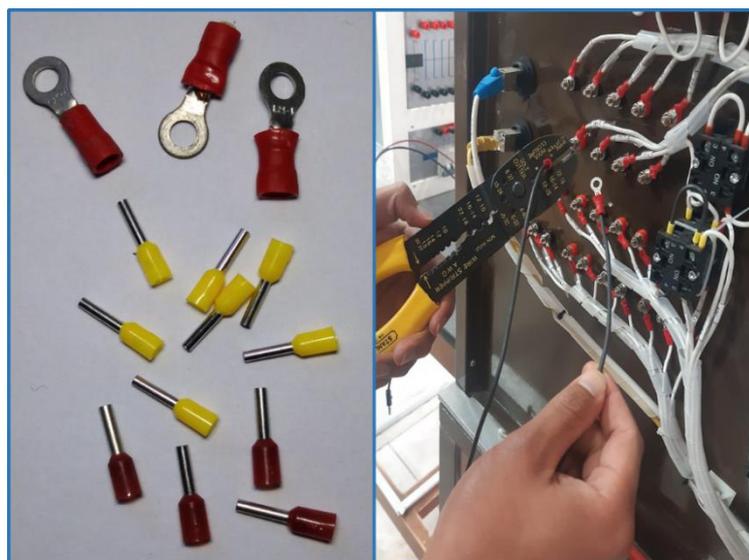


Figura 3.17 Tipos de terminales usados y su colocación en el cableado.

Etiquetado

Para facilitar el reconocimiento de todos los elementos cuando se realice el mantenimiento o reparación, se colocaron etiquetas en los cables de los circuitos implementados; finalmente, para evitar falsos contactos o cortocircuitos se procedió a ordenar y sujetar adecuadamente el cableado en el panel de conexiones, para esto se utilizaron cintas espirales, amarras y bases adhesivas. En la **Figura 3.18** se puede observar el etiquetado en los cables del bloque de control y el cableado con los elementos de sujeción y protección.



Figura 3.18 Etiquetado y cableado con elementos de sujeción y protección.

Una vez finalizado el etiquetado, en la **Figura 3.19** se puede ver uno de los módulos con todos sus componentes.



Figura 3.19 Módulo didáctico con sus componentes.

1. Variador de frecuencia ATV-630
2. Soporte prefabricado
3. Mesa de soporte
4. Panel de elementos de control y conexión
5. Circuito de control y protección (ubicado en la parte posterior del panel)
6. Elementos de accionamiento, control y comunicación

En la **Tabla 3.5** se detallan los elementos que se encuentran en el panel de conexiones y en la parte frontal del soporte del variador.

Tabla 3.5 Elementos de accionamiento, control y comunicación de los módulos.

Figura	Descripción	Características	
Pulsador doble luminoso 	Enciende y apaga el contactor que energiza al variador. Posee un led que indica cuando el circuito está energizado.	Dispositivos por módulo	1
		Marca	Camsco
		Tensión máxima de funcionamiento	600 (V _{AC})
		Corriente máxima de funcionamiento	10 (A)
		Contactos	1NA/1NC
Pulsador de parada de emergencia 	Cuando se presiona desenergiza en su totalidad al circuito eléctrico del módulo. Para encenderlo se debe girar al pulsador.	Dispositivos por módulo	1
		Marca	Schneider Electric
		Tensión máxima de funcionamiento	600 (V _{AC})
		Corriente máxima de funcionamiento	10 (A)
		Contactos	1NC
Potenciómetros	Dependiendo de la aplicación pueden simular un sensor que	Dispositivos por módulo	3
		Marca	Schneider Electric

Figura	Descripción	Características	
	<p>envía una señal analógica al variador o se usan para variar la velocidad de un motor trifásico.</p>	Resistencia de conversión interna	2.2 (kΩ)
<p>Puertos RJ45</p> 	<p>Sirven para comunicar al variador con dispositivos externos, para esto se usa los protocolos de comunicación Ethernet y Modbus TCP.</p>	Dispositivos por módulo	3
		Marca	Schneider Electric
		Tipo de conexión integrada	RJ45 Ethernet 10 (Gbit/s)
<p>Jacks banana hembra rojo y negro</p> 	<p>Sirven para acceder a las borneras del bloque de control del variador de frecuencia desde el panel de conexiones.</p>	Dispositivos por módulo	30
<p>Selector metálico de 2 posiciones</p> 	<p>Permiten activar y desactivar las entradas digitales del variador de frecuencia</p>	Dispositivos por módulo	6
		Marca	Schneider Electric
		Tensión máxima de funcionamiento	600 (V _{AC})
		Corriente máxima de funcionamiento	10 (A)
		Contactos	1NA
<p>Selector de 3 posiciones – entradas</p>	<p>El selector en INT activa las entradas digitales internas, con los</p>	Dispositivos por módulo	1
		Marca	Camsco

Figura	Descripción	Características	
digitales 	selectores de dos posiciones. En posición EXT se activan usando un equipo externo.	Tensión máxima de funcionamiento	600 (V _{AC})
		Corriente máxima de funcionamiento	10 (A)
		Contactos	2NA
Selector de 3 posiciones – entradas analógicas 	El selector en INT los potenciómetros proporcionan la señal analógica, en EXT la señal es enviada por un dispositivo externo como un sensor o fuente de voltaje o corriente.	Dispositivos por módulo	1
		Marca	Camsco
		Tensión máxima de funcionamiento	600 (V _{AC})
		Corriente máxima funcionamiento	10 (A)
Contactos	4NA		

Finalmente, en la **Figura 3.20** se muestran los dos módulos didácticos implementados.



Figura 3.20 Módulos para variadores de velocidad implementados.

3.4 Pruebas y análisis de resultados

Pruebas en elementos de accionamiento, control y comunicación

Elementos de accionamiento y paro

Se realizaron pruebas de funcionamiento en los elementos del panel de conexiones y del soporte del variador, verificando su correcto funcionamiento dentro de los módulos. En la **Figura 3.21** se pueden observar las pruebas de continuidad realizadas en el bloque de control del variador y en los elementos del panel de conexiones.



Figura 3.21 Pruebas de continuidad.

Además, para comprobar el funcionamiento de las entradas digitales del variador, así como de los selectores de tres posiciones se realizó la conexión con dispositivos externos a los módulos (LOGO y PLC). En la **Figura 3.22** se puede observar la conexión entre el variador de frecuencia y el controlador LOGO.



Figura 3.22 Conexión del variador de frecuencia y el controlador LOGO.

En la **Tabla 3.6** se pueden ver las pruebas realizadas en los módulos y los resultados obtenidos.

Tabla 3.6 Pruebas de funcionamiento en elementos de accionamiento y control

Elemento	Pruebas de funcionamiento	Módulo	Módulo
		1	2
Pulsador doble luminoso	Activación del contactor principal y variador de frecuencia	✓	✓
	Desactiva el contactor principal y el variador de frecuencia	✓	✓
Pulsador de parada de emergencia	Desenergiza todos los circuitos y el variador de frecuencia	✓	✓
	Al desactivar el pulsador, se pueden encender todos los circuitos y el variador.	✓	✓
Contactor Principal	Al energizar el circuito de alimentación el contactor se activa y energiza al variador	✓	✓
Selector de 3 posiciones – entradas digitales	En la posición INT, se activan las entradas digitales	✓	✓
	En la posición EXT, se activan las entradas digitales por un dispositivo externo	✓	✓
Selector de 3 posiciones – entradas analógicas	En INT: La señal analógica enviada por los potenciómetros es correcta.	✓	✓
	En EXT: La señal analógica proporcionada por un dispositivo externo es correcta.	✓	✓
Selector de 2 posiciones	Al activar los selectores se encienden las 6 entradas digitales	✓	✓
Salidas tipo relé R1, R2, R3	Las salidas tipo relé se activan y permiten encender los dispositivos conectados.	✓	✓

Las pruebas realizadas a los elementos de accionamiento y paro comprueban su correcto funcionamiento; además, verifican que su instalación se hizo de forma adecuada.

Entradas y salidas analógicas

Para comprobar su correcto funcionamiento, se realizaron pruebas en las entradas analógicas cuando la señal es enviada por los potenciómetros y cuando la señal es proporcionada por algún dispositivo externo (sensor, fuente de voltaje o corriente), en ambos casos se simula una señal de voltaje con un rango entre 0 (V_{DC}) y 10 (V_{DC}). Mientras que en las salidas analógicas se comprobó que las señales estén dentro de un rango de 0 (V_{DC}) a 10 (V_{DC}) y de 4 (mA) a 20 (mA). En la **Figura 3.23** se puede ver la prueba realizada en las entradas analógicas usando una fuente de voltaje.

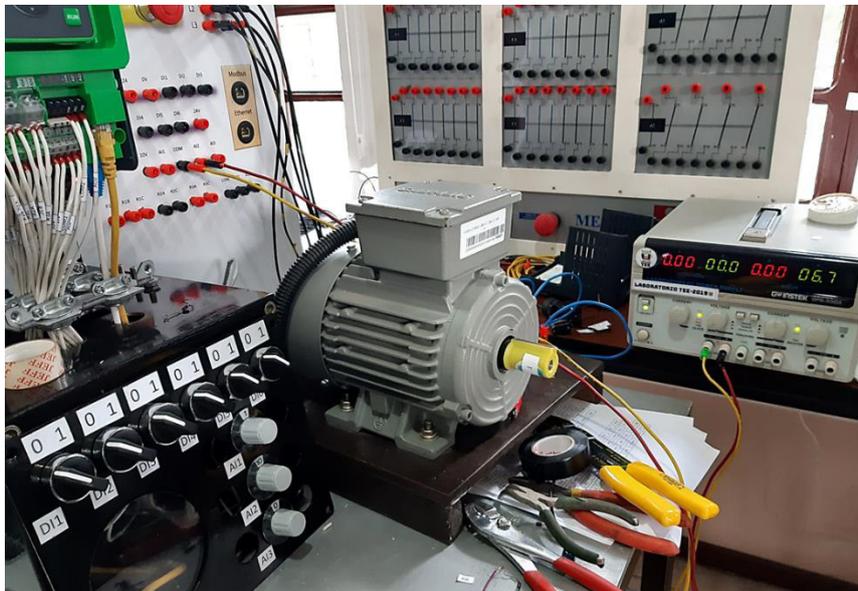


Figura 3.23 Pruebas en entradas analógicas usando fuente de voltaje.

Para evitar que la señal analógica enviada por un dispositivo externo se filtre a través de los potenciómetros o puntos comunes que tenga este circuito, mostrando valores incorrectos de la señal, se colocaron diodos 1N4007 en los pines de salida de los potenciómetros que envían la señal a los variadores, y se aumentaron dos contactos NA en el selector de tres posiciones para separar el común de las entradas analógicas internas y el de las entradas analógicas externas. En la **Figura 3.24** se puede ver que la conexión entre los potenciómetros, los diodos y el circuito de las entradas analógicas se realizó con una bornera que facilita las uniones de estos elementos.



Figura 3.24 Conexión entre los potenciómetros y los diodos 1N4007.

La **Tabla 3.7** muestra los resultados obtenidos después de realizar las respectivas pruebas.

Tabla 3.7 Pruebas realizadas en entradas y salidas analógicas

Elemento	Pruebas de funcionamiento	Módulo 1	Módulo 2
Potenciómetros A1, A2 y A3	La señal analógica enviada de 0 (V _{DC}) a 10 (V _{DC}) es adecuada y no se presentan valores incorrectos.	✓	✓
Entradas analógicas externas A1, A2 y A3	La señal enviada por un dispositivo externo de 0 (V _{DC}) y 10 (V _{DC}) es adecuada y no se presentan valores incorrectos.	✓	✓
Salida analógica AQ1	La señal de salida enviada de 0 (V _{DC}) a 10 (V _{DC}) y de 4 (mA) a 20 (mA), es adecuada y no se presentan valores incorrectos.	✓	✓
Salida analógica AQ2	La señal de salida enviada de 0 (V _{DC}) a 10 (V _{DC}) y de 4 (mA) a 20 (mA), es adecuada y no se presentan valores incorrectos.	✓	✓

Prueba de comunicación

El variador de frecuencia puede ser controlado desde un dispositivo externo usando los protocolos de comunicación Ethernet y Modbus TCP. Para comprobar el funcionamiento

de cada uno de los puertos de comunicación, se los conectó a un ordenador y se procedió a arrancar los motores trifásicos usando el programa SoMove que permite configurar al variador de frecuencia. En la **Figura 3.25** se puede ver la conexión entre el variador y una PC usando el protocolo de comunicación Ethernet.



Figura 3.25 Comunicación entre el variador y una PC vía Ethernet.

La **Tabla 3.8** muestra las pruebas realizadas y sus resultados.

Tabla 3.8 Pruebas realizadas en los elementos de comunicación

Elemento	Pruebas de funcionamiento	Módulo	Módulo
		1	2
Puerto Ethernet	La comunicación entre el variador y el dispositivo externo (PC) es estable y correcta.	✓	✓
	El motor trifásico arranca adecuadamente cuando es activado desde el PC.	✓	✓
Puerto Modbus TCP	La comunicación entre el variador y el dispositivo externo (PC) es estable y correcta.	✓	✓
	El motor trifásico arranca adecuadamente cuando es activado desde el PC.	✓	✓

Pruebas de velocidad

Error porcentual entre la velocidad teórica y medida

Para comprobar el error porcentual entre la velocidad teórica y la velocidad medida, se registraron 15 valores de velocidad a frecuencias distintas en el módulo 1 y 2, para esto se usó un tacómetro digital (ver **Figura 3.26**) que mide la velocidad del motor en revoluciones por minuto (RPM) y los valores de frecuencia se obtuvieron desde el variador.



Figura 3.26 Pruebas de velocidad usando tacómetro digital.

Para el cálculo de la velocidad teórica se usó la **Ecuación 3.2** de frecuencia eléctrica.

$$f_e = \frac{P * S}{120}$$

Ecuación 3.2 Frecuencia eléctrica [14].

Donde:

- f_e : Frecuencia eléctrica (Hz)
- P : 4 - Número de polos del motor trifásico
- S : Velocidad del motor (RPM)
- 120 : Factor de multiplicación

En la **Tabla 3.9** se puede ver la velocidad teórica del motor, la velocidad medida y el cálculo del error porcentual entre estos valores.

Tabla 3.9 Datos de velocidad y error porcentual módulo 1

Frecuencia (Hz)	Velocidad teórica (RPM)	Velocidad medida (RPM)	Error (%)
4.0	120	119.8	0.17
8.1	243	240.9	0.86
12.0	360	354.2	1.61
16.4	491	489.3	0.34
20.3	609	600.0	1.48
24.8	744	743.0	0.13
28.6	858	856.0	0.23
32.4	972	971.0	0.10
34.3	1 029	1 028	0.09
40.2	1 206	1 218	0.99
44.7	1 341	1 342	0.07
48.2	1 446	1 447	0.07
52.4	1 578	1 572	0.38
56.6	1 698	1 696	0.12
60.0	1 800	1 799	0.06

En la **Tabla 3.10** se muestran las pruebas de velocidad realizadas para el módulo 2.

Tabla 3.10 Datos de velocidad y error porcentual módulo 2

Frecuencia (Hz)	Velocidad teórica (RPM)	Velocidad medida (RPM)	Error (%)
4.1	123	122.3	0.56
8.3	249	246.2	1.12
12.1	363	359.6	0.94
16.2	483	480.5	0.52
20.4	612	605.2	1.11
24.2	726	724.1	0.26
28.3	849	841.3	0.91
32.5	975	971.4	0.36
36.2	1 086	1 078.6	0.68
40.6	1 218	1 208.4	0.79

Frecuencia (Hz)	Velocidad teórica (RPM)	Velocidad medida (RPM)	Error (%)
44.4	1 332	1 330.8	0.09
48.2	1 446	1 443.2	0.19
52.3	1 569	1 561.9	0.45
56.1	1 683	1 678.7	0.26
60.0	1 800	1 796.8	0.18

Como puede observarse en la **Tabla 3.9** y **Tabla 3.10** el error porcentual entre los valores de velocidad medidos y teóricos no supera el 2 %, por lo que se concluye que la instalación de los variadores de frecuencia se realizó de forma adecuada.

Gráficas de frecuencia en función del voltaje y la corriente

Se registraron 15 valores de voltaje y corriente en los motores con el fin de observar su comportamiento a diferentes frecuencias, para esto se realizaron gráficas en las que se puede observar la relación de los valores con la frecuencia. En la **Figura 3.27** se puede ver la medición de valores de corriente mediante una pinza amperimétrica.



Figura 3.27 Medición de valores de corriente en los motores trifásicos

En la **Tabla 3.11** se pueden ver los valores de corriente y voltaje medidos a diferentes frecuencias.

Tabla 3.11 Datos medidos de voltaje y corriente a distintas frecuencias

Frecuencia (Hz)	Voltaje (V)	Corriente (A)
4.0	8	0.56
8.1	14	0.62
12.0	21	0.69
16.4	31	0.74
20.3	42	0.80
24.8	56	0.89
28.6	68	0.95
32.4	82	1.03
34.3	90	1.07
40.2	115	1.19
44.7	137	1.30
48.2	154	1.38
52.4	176	1.49
56.6	200	1.61
60.0	219	1.69

En la **Figura 3.28** y **Figura 3.29** se observa que el voltaje y corriente incrementan su valor a medida que aumenta la frecuencia y por ende la velocidad del motor. El torque permanece constante en todos los valores medidos, esto debido a que los motores del laboratorio se encuentran en vacío y no se genera carga en su eje.

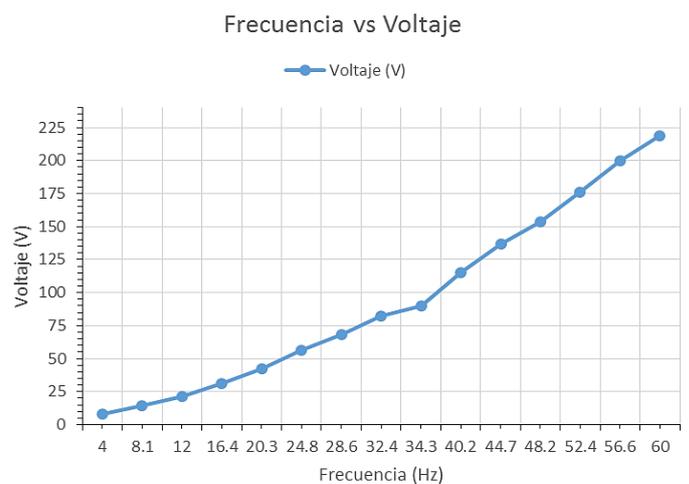


Figura 3.28 Curva de voltaje en relación a la frecuencia

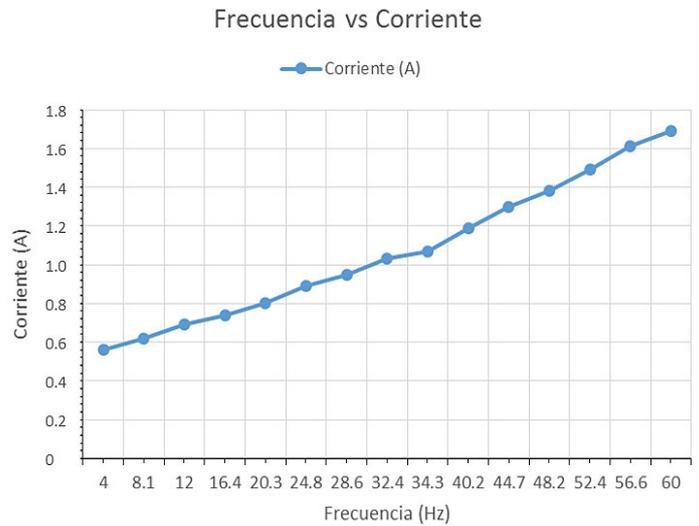


Figura 3.29 Curva de corriente en relación a la frecuencia

Pruebas mecánicas en las estructuras

Pruebas de resistencia y movilidad

Para comprobar la resistencia de las estructuras y su correcta fabricación se realizaron varias pruebas colocando un motor trifásico sobre las mesas de soporte de los módulos. En la **Figura 3.30** se observa la colocación de un motor sobre un módulo y la lubricación de las ruedas para mejorar su movilidad.



Figura 3.30 Pruebas de movilidad en los módulos didácticos.

En la **Tabla 3.12** se encuentran las pruebas realizadas y sus resultados.

Tabla 3.12 Pruebas mecánicas en las estructuras de los módulos

Pruebas realizadas	Módulo 1		Módulo 2	
	SI	NO	SI	NO
Las estructuras presentan firmeza y estabilidad.	✓		✓	
Las uniones y soldaduras de las estructuras presentan algún desgaste o daño.		✓		✓
Las ruedas de las estructuras permiten un movimiento adecuado.	✓		✓	
Durante el desplazamiento las estructuras se mantienen estables.	✓		✓	
Los frenos de las ruedas delanteras detienen a los módulos en su totalidad.	✓		✓	
Con los módulos energizados y los motores funcionando a su máxima velocidad, las estructuras presentan algún tipo de vibración.		✓		✓

Las pruebas mecánicas realizadas verifican que la construcción de los módulos se realizó de forma adecuada y que pueden ser utilizados para el desarrollo de prácticas de laboratorio.

3.5 Hojas guías de laboratorio

Se realizaron tres hojas guías para prácticas de laboratorio con su respectiva resolución con el objetivo de utilizar las principales funciones de control de los variadores juntamente con los dispositivos disponibles en el laboratorio como motores asíncronos, controlador LOGO y módulo de PLC S7-1 200.

Práctica 1

En esta práctica se simuló el funcionamiento de una banda transportadora que cambia su velocidad según la cantidad de objetos que se encuentren sobre ella, para esto se utilizó el variador de frecuencia que controla la velocidad de un motor trifásico (motor de banda transportadora) mediante la función de velocidades preseleccionadas.

Además, se usó el controlador LOGO para operar al variador desde un punto distinto de trabajo. Para esto se diseñó un programa que permite usar las salidas digitales tipo relé del LOGO para encender las entradas digitales del variador que su vez activan las velocidades preseleccionadas.

Las actividades a cumplir y toda la información respectiva de la práctica se pueden ver en la Hoja Guía 1 que se encuentra en el **Anexo 3**.

Práctica 2

Para esta práctica se tomó en cuenta el manejo y funcionamiento de un sistema de presión constante y velocidad variable. Se simuló dicho proceso haciendo uso del PLC S7-1 200, la entrada analógica del PLC, una pantalla HMI KTP 700, el variador de frecuencia y su función de velocidades preseleccionadas.

El proceso mantiene la presión con respecto a un valor ingresado desde la pantalla HMI (referencia). Las bombas se encienden dependiendo de las demandas del sistema y en función a los requerimientos establecidos en la hoja guía. De esta forma se observó la interacción que existe entre un PLC y el variador de frecuencia.

Las actividades a cumplir y toda la información respectiva de la práctica se pueden ver en la Hoja Guía 2 que se encuentra en el **Anexo 3**.

Práctica 3

Se simuló un sistema de suministro de agua que se mantiene presurizado a un nivel establecido por el usuario. Para mantener la presión, el sistema cuenta con una bomba principal (BP) y una bomba auxiliar (BA) que son controladas por el variador de frecuencia mediante las funciones disponibles en este.

La variable de proceso del sistema es regulada y monitoreada por el controlador PID del variador de frecuencia, de esta forma se controla la velocidad de las bombas para que la presión se mantenga en un nivel establecido. El sistema cuenta con un modo para presurizar las tuberías y un modo de trabajo donde se configura el funcionamiento de las bombas.

Las actividades a cumplir y toda la información respectiva de la práctica se pueden ver en la Hoja Guía 3 que se encuentra en el **Anexo 3**.

La resolución y los resultados obtenidos de cada una de las prácticas se pueden observar en el video del manual de usuario, al cual se puede acceder mediante el código QR de la **Figura 3.31**.

3.6 Manual de uso y mantenimiento

Para utilizar de forma correcta los módulos didácticos se ha desarrollado un video explicativo que contiene la descripción de los componentes, inicialización y puesta en marcha de los variadores de frecuencia. El video se puede observar mediante el código QR de la **Figura 3.31**.



Figura 3.31 Código QR para el video del manual de uso

De igual forma se realizó un video explicativo donde se detalla el mantenimiento que se debe dar a los módulos para conservarlos en buen estado o cuando se presenten inconvenientes. . El video se puede observar mediante el código QR de **Figura 3.32**.



Figura 3.32 Código QR para el video del manual de mantenimiento.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Los módulos didácticos permitirán a los estudiantes obtener conocimientos complementarios acerca del control de motores trifásicos usando variadores de frecuencia mediante el desarrollo de prácticas de laboratorio relacionadas al ámbito industrial.
- Para la implementación de módulos didácticos se requiere de un conocimiento avanzado del funcionamiento y aplicaciones de los equipos que los componen; además, de conocer el lugar donde serán ubicados y los elementos del laboratorio que son necesarios para su operación.
- El variador de frecuencia ATV-630 se especializa en sistemas de bombeo y puede controlar otros equipos como bandas transportadoras o ventiladores; puesto que, posee varias funciones que se pueden adaptar a la aplicación que se desee controlar.
- Los elementos del panel de conexiones (pulsadores, selectores, potenciómetros, etc....) permiten manejar de forma más sencilla y didáctica el variador de frecuencia, evitando realizar conexiones directas desde el bloque de control hacia los elementos externos, lo cual sin un conocimiento adecuado del equipo puede ocasionar graves problemas.
- Los potenciómetros de las entradas analógicas del variador de frecuencia simulan las señales de voltaje o corriente provistas por un transmisor, lo que permite controlar la velocidad de motores eléctricos en función de dichas señales.
- La construcción de una estructura metálica móvil para los variadores de frecuencia, favorece al espacio disponible en el laboratorio, mejora la manipulación y transporte de los variadores y facilita la conexión con otros dispositivos de control.
- El cableado, protección magnética y contactor principal para los módulos didácticos se eligieron de acuerdo a la corriente máxima de operación del variador de frecuencia y a las recomendaciones que realiza el fabricante en el manual de instalación del equipo.
- Los diodos instalados en las entradas analógicas del variador de frecuencia impiden que las señales de corriente o voltaje se filtren a través de puntos

comunes que tengan los dispositivos o cables que envían y conducen las señales, produciendo errores.

- Las pruebas de velocidad permitieron comprobar el correcto funcionamiento del variador de frecuencia, ya que en cada punto medido se proporciona la energía necesaria para que los motores trabajen a la velocidad deseada. Los valores de voltaje y corriente mantienen una relación directamente proporcional a la frecuencia.
- Las prácticas de laboratorio permiten simular procesos industriales que son controlados por las funciones del variador de frecuencia, como el control PID que puede regular la velocidad de las bombas según las necesidades que se presenten.
- Los videos informativos del manual de usuario y mantenimiento, permiten conocer los componentes de los módulos, sus funciones principales y formas de operación; también, se puede observar el proceso a seguir cuando se presente una falla o se requiera dar mantenimiento.

4.2 Recomendaciones

- Para realizar las prácticas usando los módulos, se deberá comprobar que los circuitos implementados estén correctamente conectados y que los dispositivos o motores eléctricos que se desee controlar cumplan con los requerimientos y la capacidad de potencia de los variadores.
- En el menú de inicialización colocar los datos de placa del motor que se va a controlar y realizar el autoajuste del variador ya que permite conocer con mayor exactitud los parámetros del motor; de esta forma, se evitarán inconvenientes con el funcionamiento de los módulos y del proceso que se requiera simular.
- Cuando exista algún inconveniente con el funcionamiento de los variadores de frecuencia seguir las recomendaciones del manual de instalación o programación del fabricante. También se pueden corregir los errores siguiendo los códigos QR se muestran en el terminal gráfico del variador.
- Para la construcción de módulos similares se deberá usar materiales dieléctricos en el panel de conexiones y soporte del variador e implementar la conexión a tierra para evitar descargas en los usuarios.
- Para seleccionar los electrodos que se usaron en el ensamblaje de la estructura usar la norma la AWS A5.1/A5.1M de especificación para electrodos de acero al carbono. La selección de elementos de control y protección eléctricos de los módulos, se realiza en base a normas establecidas: como la IEC 60947-2 que

regula los interruptores automáticos, además, de seguir las recomendaciones que da el fabricante de los variadores en su manual de instalación.

- Investigar sobre más funcionalidades del variador de frecuencia que permitan la conexión con otros dispositivos de control mediante protocolos de comunicación Ethernet o Modbus TCP.
- Para que las funciones disponibles en el variador puedan ser aprovechadas en su totalidad, implementar un sistema que permita desarrollar torque en los ejes de los motores trifásicos y proporcione variables analógicas reales.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABB Asea Brown Boveri Ltd, “Qué es un variador de Frecuencia: Definición, cómo funciona, características y ventajas,” 1, 2015. <https://new.abb.com/drives/es/que-es-un-variador>.
- [2] Schneider Electric, “Manual de Instalación ATV630, ATV650,” 09, 2019. https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Guía de usuario&p_File_Name=ATV630_650_Installation_manual_SP_EAV64307_09.pdf&p_Doc_Ref=EAV64307.
- [3] J. Lozada, “Investigación Aplicada: Definición, Propiedad Intelectual e Industria,” *Cienciaamérica*, vol. 1, no. 3, pp. 34–39, 2014, [Online]. Available: <http://www.uti.edu.ec/documents/investigacion/volumen3/06Lozada-2014.pdf>.
- [4] F. Moreno Zaragoza and J. Zubiaurre Lusa, *Automatismos y cuadros Eléctricos*, 2da ed. 2014.
- [5] Schneider Electric, “Variadores de velocidad Altivar Process ATV600,” p. 80, 2015, [Online]. Available: https://www.schneider-electric.com.pe/documents/customers/iec-61439-1-2/catalogo_Altivar_Process_2014_ES.pdf.
- [6] M. Sanchez Fulgueira, *Operaciones de union*, 2a. ed. Antequera (Málaga), 2018.
- [7] R. Serrano Sanchez and J. M. Marti Prieto, *Instalaciones eléctricas automatizadas e instalaciones de automatismos*. 2016.
- [8] C. A. Caticuago Farinango and S. M. Perugachi Urresti, “CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA APLICACIONES DE CONTROL INDUSTRIAL CON UN RELÉ PROGRAMABLE,” Escuela Politécnica Nacional, 2019.
- [9] Schneider Electric, *Altivar Process: Primeros pasos con ATV600*. 2018.
- [10] W. Sotelo and Schneider Electric, “Teoría Fundamental de Control Motor v10.” [Online]. Available: <https://schneider-electric.app.box.com/s/i2m356pyu6p0e8u229l0tugs7ciuhoxm/file/525138131491>.
- [11] INDURA S.A, “Indura 6011,” p. 141215, [Online]. Available: <http://www.indura.com.ec/content/storage/cl/producto/b6ba95a983684ba1a38bfc3330c924a.pdf>.

- [12] Scheider Electric, “Hoja de características del producto GV2L08,” pp. 1–3, 2021, [Online]. Available: <https://www.se.com/es/es/product/GV2L08/disjuntor-motor-magnético-gv2l-4a-50ka/>.
- [13] CHINT ELECTRICS. LTD, “Contactores 9 - 95A,” pp. 35–37, [Online]. Available: <http://decoelectricos.com/wp-content/uploads/2017/08/Ficha-Tecnica-NC1-Contactor-CHINT-.pdf>.
- [14] S. J. Chapman, *MÁQUINAS ELÉCTRICAS*, Quinta edi. México, 2012.

ANEXOS

ANEXO 1: CERTIFICADO DE FUNCIONAMIENTO



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

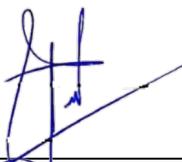
Campus Politécnico "J. Rubén Orellana R

Quito, 4 de junio de 2021

CERTIFICADO DE FUNCIONAMIENTO DE PROYECTO DE TITULACIÓN

Yo, *ALAN DANIEL CUENCA SÁNCHEZ*, docente a tiempo completo de la Escuela Politécnica Nacional y como director de este trabajo de titulación, certifico que he constatado el correcto funcionamiento de los módulos didácticos basados en variadores de frecuencia para el control de velocidad de motores trifásicos para el LTI-ESFOT, los cuales fueron implementados por los estudiantes Carlos Haro y Pablo Cunuhay.

El proyecto cumple con los requerimientos de implementación y parámetros necesarios para que los estudiantes y docentes de la ESFOT puedan usar los módulos didácticos con seguridad.

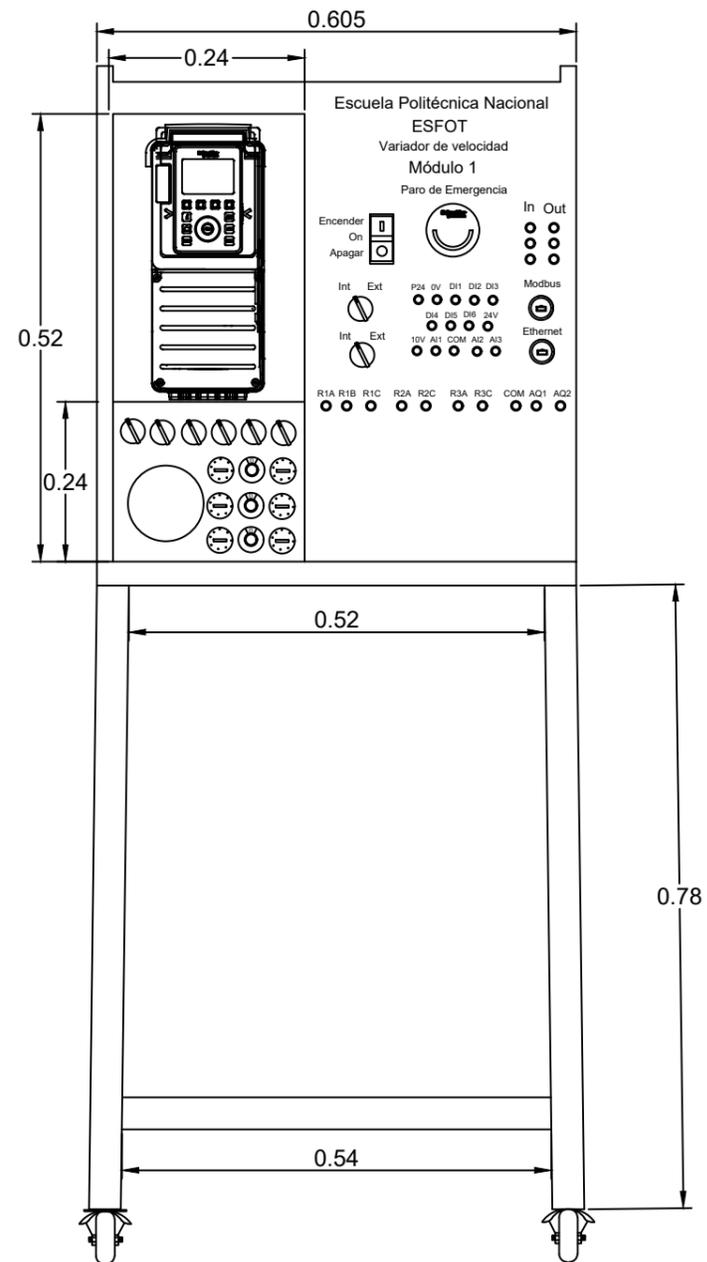


DIRECTOR

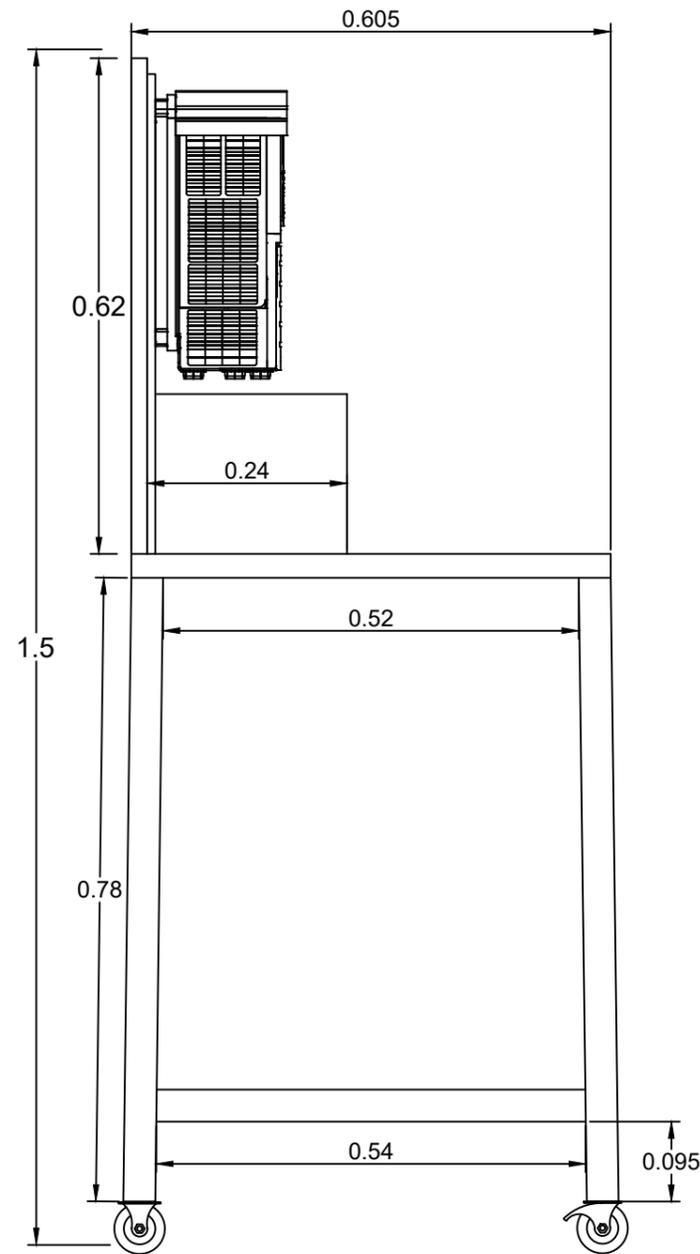
Ing. Alan Daniel Cuenca Sánchez., Msc.

ANEXO 2: PLANOS Y ESQUEMAS

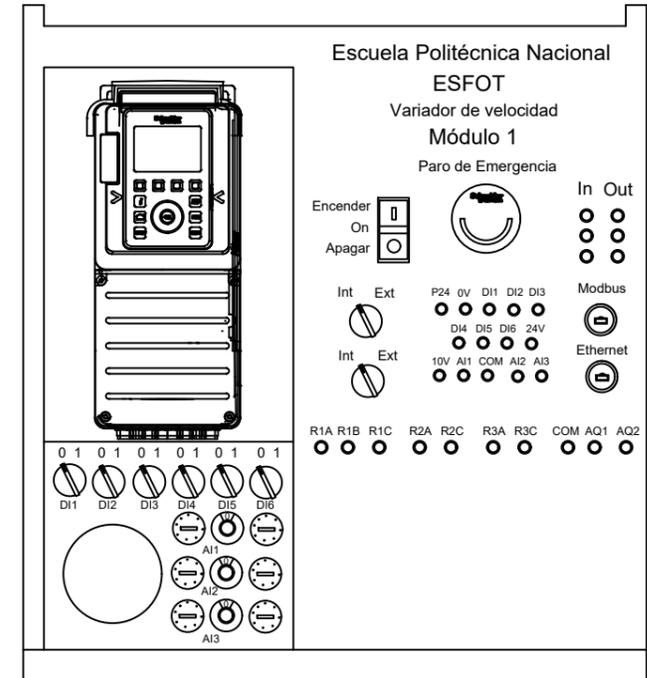
Vista frontal



Vista lateral



las dimensiones consideran al metro como unidad



Vista frontal
Panel de control

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL-ESFOT

Módulo Didáctico Schneider
ALTIVAR PROCESS 630
Dimensiones del Módulo

TRATAMIENTO
TÉRMICO: N/A

MATERIAL:
Metal

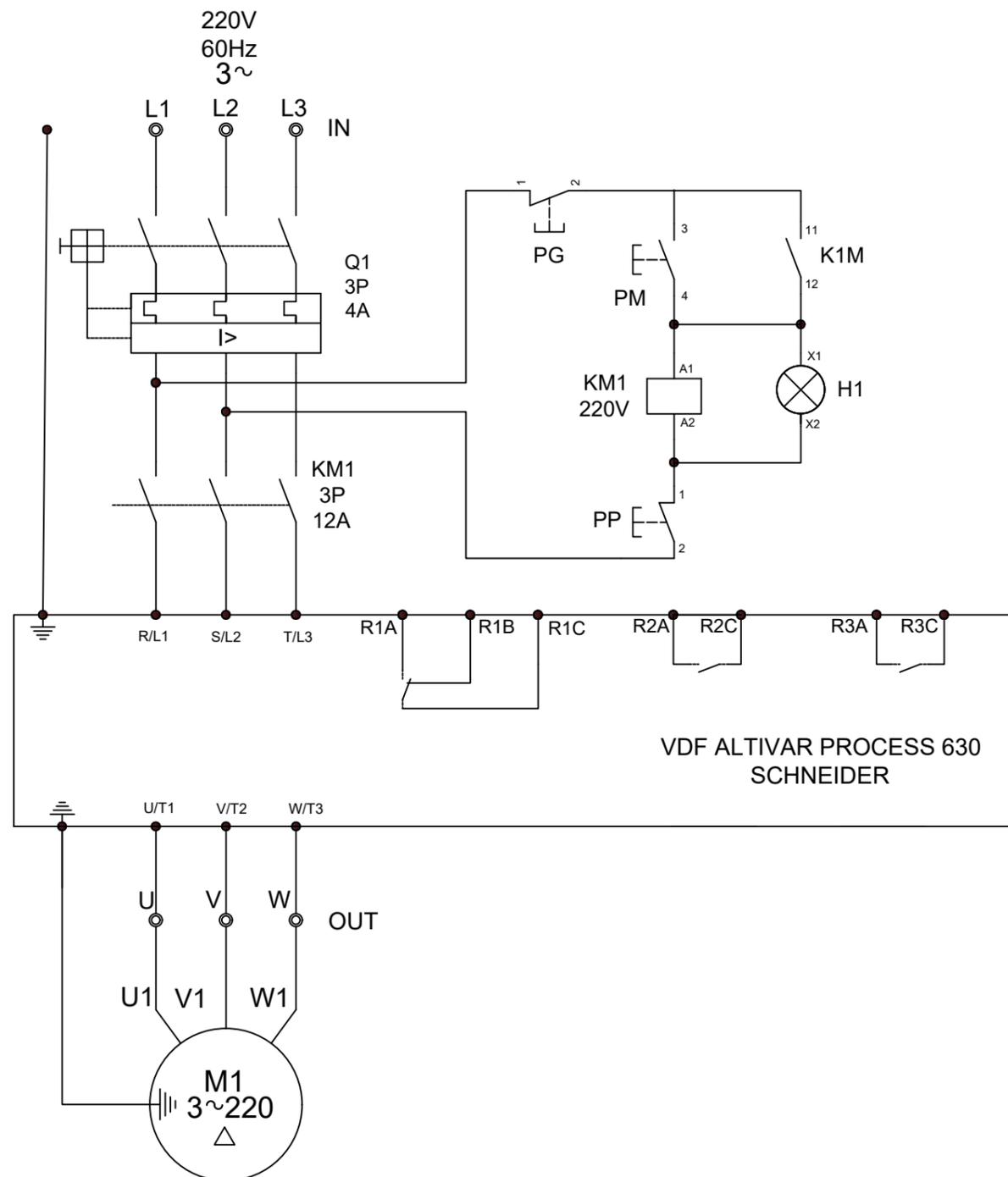
ESCALA:
1:10

FORMATO:
A3

DISEÑADO POR:
CUNUHAY PABLO
HARO CARLOS

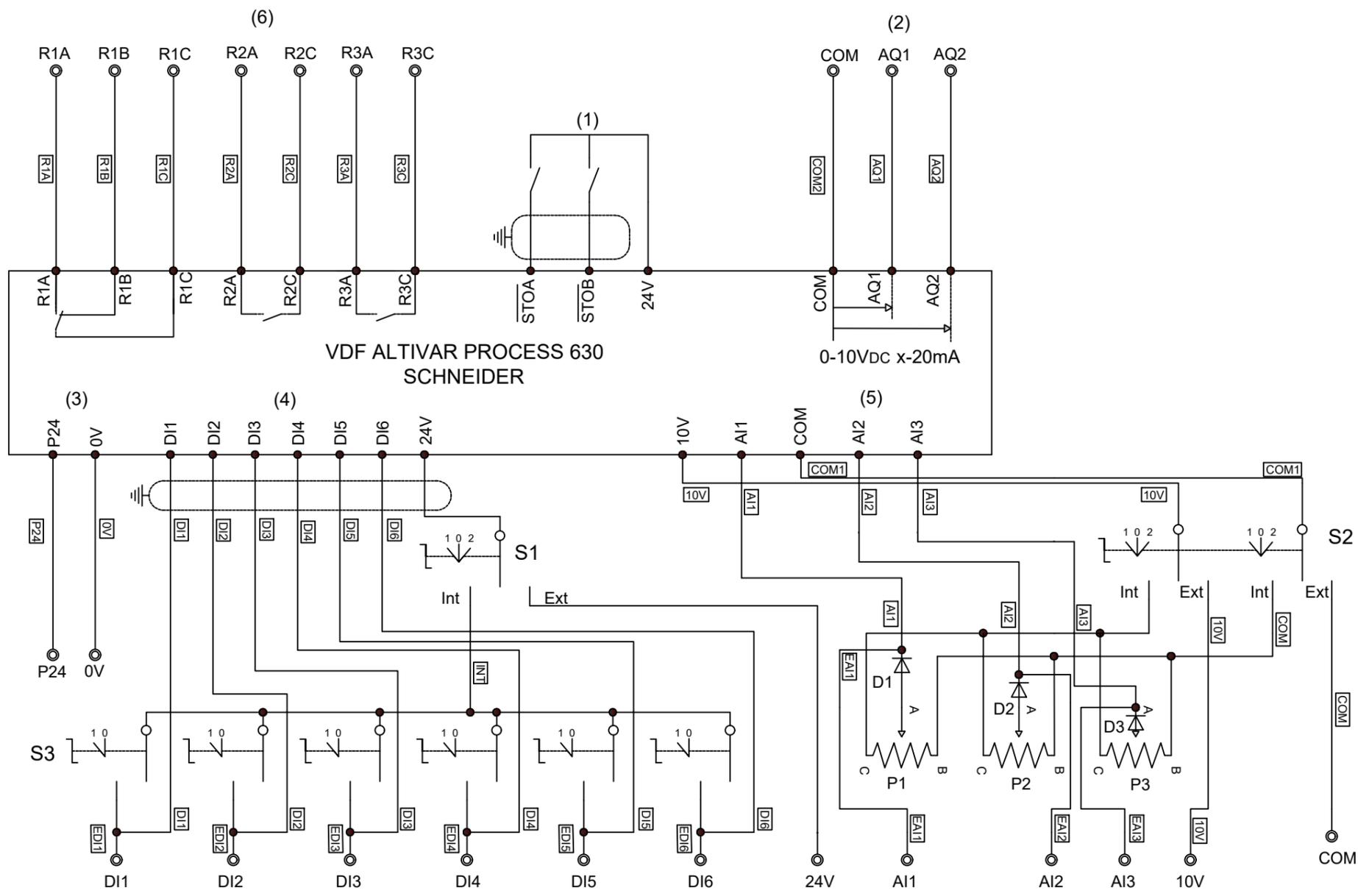
FECHA:
16/04/2021

LÁMINA:
1



Nomenclatura	
Parte	Descripción
IN	Terminales banana Alimentación 3~ 220v
Out	Conector Banana Salida motor 3 ~ delta
Q1	Guardamotor 4Amp 3 Polos
KM1	Contacto de Marcha 3p 12 Amp-220V
PG	Pulsador de paro de emergencia tipo Hongo
PM	Pulsador de Marcha
PP	Pulsador de Paro
K1M	Contacto auxiliar Contactor KM1
H1	Luz piloto indicadora

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL-ESFOT		
Módulo Didáctico Schneider ALTIVAR PROCESS 630 Circuito de accionamiento y fuerza	TRATAMIENTO TÉRMICO: N/A	MATERIAL: Eléctrico
	ESCALA: N/A	FORMATO: A3
DISEÑADO POR: CUNUHAY PABLO HARO CARLOS	FECHA: 16/04/2021	LÁMINA: 2



Nomenclatura	
Parte	Descripción
⊙	Terminales tipo banana
S1	Selector 3 pos.; entradas digitales
S2	Selector 3 pos. doble acción; entradas analógicas
S3	Selector 2 pos. entradas digitales internas
P 1,2,3	Potenciómetros 2.2KΩ entr.analógicas internas
D 1,2,3	Diodos 1N4007 antiretorno
(1)	STO desactivación de par segura
(2)	Salidas analógicas
(3)	Alimentación con fuente externa
(4)	Entradas digitales
(5)	Entradas analógicas
(6)	Salidas a relé 220v carga res 3A; ind 2A

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL-ESFOT		
Módulo Didáctico Schneider ALTIVAR PROCESS 630 Circuito de control	TRATAMIENTO TÉRMICO: N/A	MATERIAL: Eléctrico
	ESCALA: N/A	FORMATO: A3
DISEÑADO POR: CUNUHAY PABLO HARO CARLOS	FECHA: 16/04/2021	LÁMINA: 3

ANEXO 3: HOJAS GUÍAS DE PRÁCTICAS

HOJA GUÍA - PRÁCTICA 1

TEMA: Introducción al uso de variadores de frecuencia

1. Objetivos

- Introducir al estudiante en el manejo de los variadores de frecuencia ATV-630 disponibles en el Laboratorio de Control Industrial de la ESFOT.
- Simular un proceso en el que se use tanto el PLC-LOGO, el variador de frecuencia y los motores trifásicos del laboratorio.

2. Información

Un variador de frecuencia es un sistema para el control de la velocidad de giro en motores de corriente alterna (AC) mediante el control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor.

Ventajas de contar con un variador de frecuencia:

- El ahorro energético es el mayor y más destacado atributo que supone la instalación de los variadores de frecuencia.
- Un variador de frecuencia es habitualmente fácil de instalar y requiere mantenimiento reducido; además, prolonga la vida útil de los equipos a los que va destinado.
- En último lugar, la menor exigencia para los motores industriales, regulados por un variador de frecuencia, ayudará a reducir en gran medida el ruido generado.

3. Trabajo Preparatorio

- Consultar acerca de la inicialización y programación de variadores de frecuencia ATV-630.
- En el manual de programación o dentro del manual de usuario del variador consultar sobre la función velocidades preseleccionadas.
- En el manual de usuario del variador consultar acerca del uso de los módulos.

3.1 Desarrollo

Utilizando el LOGO SOFT COMFORT, desarrollar un algoritmo que permita controlar la velocidad de un motor eléctrico trifásico y simular una banda transportadora que aumenta su velocidad según la cantidad de objetos que este transportando, el algoritmo debe cumplir las siguientes condiciones:

- Se debe limitar la cantidad de objetos que transporta la banda a un máximo de 8, esto equivale a tener 8 velocidades preseleccionadas.
- Usar las salidas tipo relé (Qx) del controlador LOGO para activar las entradas digitales (Dlx) del variador, las mismas que activarán las velocidades preseleccionadas.

- Tomar en cuenta que la entrada digital DI1 del variador debe estar activada para que el motor entre en marcha.
- El sistema cuenta con tres pulsadores P01, P02, P03 y un switch P0 para detener la banda transportadora.
- P01 incrementa la cantidad de objetos que transporta la banda, a medida que aumentan los objetos la velocidad del motor se incrementa.
- Si se presiona P02 disminuye el número de objetos que son transportados, y se reduce la velocidad del motor.
- Al presionar P03 se resetea todo el sistema volviendo a sus valores iniciales y detiene la banda transportadora.
- Activando P0 se detiene el sistema en cualquier instante sin alterar la cantidad de objetos que se encuentran en la banda.
- Al desactivar P0 el sistema vuelve a la velocidad preseleccionada y al número de objetos establecidos.
- Considerar todos los bloqueos necesarios.
- Mostrar en la pantalla del LOGO el número de objetos, la velocidad preseleccionada y un mensaje de precaución cuando se detiene la banda transportadora activando P0.

Para hacer uso de la función Velocidades Preseleccionadas del variador usar la **Tabla A. 1**:

Tabla A. 1 Combinación de entradas digitales para Velocidades Preseleccionadas

8 velocidades DIX	4 velocidades DIX	2 velocidades DIX	1 velocidad DI1	Velocidad (Hz)
0	0	0	1	Vn_0
0	0	1	1	Vn_1
0	1	0	1	Vn_2
0	1	1	1	Vn_3
1	0	0	1	Vn_4
1	0	1	1	Vn_5
1	1	0	1	Vn_6
1	1	1	1	Vn_7

Vn_0 = Velocidad Máxima establecida en configuraciones Iniciales

NOTA: Como trabajo preparatorio presentar los algoritmos de control, el circuito de potencia y de control del variador de frecuencia y la conexión con el controlador LOGO; además, de la tabla de variables con sus respectivos nombres y direcciones.

4. Procedimiento Práctico

- Siguiendo las indicaciones dadas por el instructor, implemente los circuitos de control solicitados en el trabajo preparatorio utilizando el LOGO de SIEMENS. Accione y observe el funcionamiento del circuito.
- Cada grupo debe contar con los archivos de los circuitos de control diseñados en el software LOGO SOFT COMFORT.

5. Informe

- Desarrollar el informe en base al formato establecido
- Presente los circuitos completos de fuerza y control realizados en la práctica de laboratorio.
- Presente la respectiva Tabla de variables de cada uno de los circuitos implementados.
- Adjuntar en la parte de ANEXOS los algoritmos de control desarrollados con los nombres de identificación de los elementos.

HOJA GUÍA – PRÁCTICA 2

TEMA: Aplicación con variador de frecuencia, pantalla HMI variables analógicas y PLC S7-1 200

1. Objetivo

- Desarrollar algoritmos y su respectiva interfaz humano máquina (HMI) que permita la interacción entre un variador ATV-630 y un PLC S7-1 200 para el respectivo control monitoreo y supervisión de un proceso.
- Utilizar las herramientas disponibles en el Laboratorio de Tecnología Industrial de la ESFOT.

2. Información

Sistema de presión constante

Compuestos por dos o más bombas de agua, estos sistemas han sido diseñados para satisfacer las necesidades de presión constante a variaciones de caudal en edificaciones del sector construcción como: edificios, hoteles, industrias o sistemas de riego, entre otras obras; además, incorporan nuevas ventajas excepcionales como un importante ahorro energético y un comportamiento silencioso.

Técnicamente, los sistemas de presión constante cambian la velocidad de la bomba para satisfacer la demanda de agua en los distintos puntos de abastecimiento de una obra, al mismo tiempo que mantienen la presión constante en el sistema.

Este se compone básicamente de una bomba o conjunto de bombas de agua, un controlador a presión constante, un variador de frecuencia y un transmisor de presión. No obstante, el variador es el que permite tener la presión que se requiere y el control de la presión en la línea, haciendo que la bomba trabaje en regímenes adecuados a la demanda de agua.

3. Trabajo Preparatorio

- Consultar acerca del manejo de variadores de frecuencia ATV- 630
- Presentar los circuitos necesarios para la implementación de la práctica
- Presentar la hoja de datos con los circuitos y HMI desarrollados

3.1 Desarrollo

Se desea implementar un sistema de suministro de agua que se mantiene presurizado a un valor introducido por el usuario, dicho valor está dentro de un rango de 100 a 150 (psi).

La presión será monitoreada por medio de la entrada analógica del PLC, para controlar la variable se dispone de una bomba principal (BP) de velocidad variable y una bomba auxiliar (BA) de velocidad fija. En la **Tabla A. 2** describe las velocidades establecidas para la bomba principal.

Cuando la BP no abastezca la presión requerida por más de quince segundos se procederá a arrancar automáticamente la BA a su frecuencia máxima mediante un arranque estrella-delta usando un temporizador de cuatro segundos establecidos para dicho cambio.

El sistema posee cuatro modos de funcionamiento manual, off, automático y presurizado de tuberías.

Para seleccionar cualquier modo de funcionamiento es necesario verificar el nivel de agua en la cisterna principal, mediante un sensor digital que deberá ser simulado activando una entrada digital del PLC. Cuando el sensor este activado indicará “estado crítico” y se encenderá una luz intermitente, negando el acceso a cualquier modo de funcionamiento.

Una vez que la luz intermitente se encuentre apagada o la cisterna en “estado normal”, se podrá empezar a seleccionar los modos teniendo en cuenta el siguiente requerimiento:

Para poder seleccionar cualquier modo en estado normal la presión en las tuberías deberá ser mayor a 30 (psi), caso contrario solo se podrá ingresar al primer modo de funcionamiento.

- **Modo presurización de tuberías**

Permitirá mediante un pulsador P3 seleccionar cualquiera de las bombas de acuerdo a la configuración establecida y arrancarlas solo manteniendo presionado el botón P1 hasta alcanzar dicho valor.

Una vez que se tiene la presión requerida en las tuberías y la cisterna se encuentra en estado normal se pueden seleccionar los modos funcionamiento mediante un pulsador P5 donde:

- **Modo Manual**

Mediante el pulsador P2 se podrá alternar entre las bombas y arrancar la bomba principal a diferentes velocidades mediante el pulsador de marcha P1 solo manteniéndolo presionado.

- **Modo Automático**

Cuando la presión del sistema caiga por debajo del valor de referencia (SP), las bombas se encenderán bajo las siguientes consideraciones:

Tabla A. 2

Valores de presión	Frecuencia Requerida	
SP - 10	BP 40 (Hz)	BA OFF
SP - 20	BP 50 (Hz)	BA OFF
SP - 30	BP 60 (Hz)	BA OFF
SP-30 por más de 15 (s)	BP 60 (Hz)	BA Estrella- 4 (s) -Triángulo

- **Off**

Detiene el sistema en cualquier instante de tiempo.

En el trabajo preparatorio presentar:

- El circuito de control en lenguaje FBD.
- Tabla de variables del PLC.
- La Interfaz Humano Máquina HMI del proceso
- El diagrama de entradas y salidas al PLC y al Variador.

4. Procedimiento Práctico

- Realizar todas las configuraciones iniciales para arrancar el variador de frecuencia.
- Para encender el motor se deberá activar la entrada digital DI1.
- Configurar las velocidades preseleccionadas y configurar las entradas necesarias.
- Realizar las conexiones necesarias entre el PLC y el variador.
- Mediante el PLC se enviarán las señales de arranque a diferentes velocidades dependiendo de las configuraciones implementadas.

5. Informe

- Representar el esquema eléctrico de conexión mediante guarda motor y contactor trifásico, sistema marcha con enclavamiento y paro de emergencia.
- Realizar una tabla donde se explique la conexión de las velocidades implementadas y la configuración de las entradas.
- Observar el funcionamiento de la variable del proceso y realizar un análisis del comportamiento dentro del mismo.

HOJA GUÍA – PRÁCTICA 3

TEMA: Simulación de un sistema de presión usando funciones del variador de frecuencia y controlador PID.

1. Objetivos

- Conocer y manejar las principales funciones con las que cuenta el variador de frecuencia para el control de sistemas de bombeo de fluidos.
- Observar el comportamiento de los motores trifásicos y la variable del proceso (presión) cuando se usa el controlador PID del variador de frecuencia para regular y monitorear la presión del sistema.

2. Información

Funciones de bomba disponibles en el variador de frecuencia:

- **[Control PID]**
Permite regular y monitorear una variable de proceso que es asignada por el usuario, para esto se puede modificar la velocidad de una bomba a fin de que la variable de proceso se mantenga en un nivel establecido.
- **[Control de refuerzo]**
El objetivo de la función es mantener la presión deseada en la salida de las bombas de acuerdo con la demanda, para esto se puede realizar lo siguiente:
 - Gestionar la velocidad de la bomba de velocidad variable conectada al variador
 - Acoplando/desacoplando las bombas auxiliares de velocidad fija.
- **[Dormir/Rearranque]**
Permite detener los motores cuando existe baja demanda del líquido en un sistema y no se necesite mantener las bombas en funcionamiento. Después, cuando la demanda del líquido aumenta, la función enciende los motores para compensar la demanda.
- **[Llenado de tuberías]**
Cuando las bombas inician el llenado de las tuberías a gran velocidad, puede producirse el efecto de golpe de ariete y dañar las tuberías o equipos del sistema. Esta función permite arrancar la bomba a velocidades reducidas por un tiempo determinado o hasta que se alcance una referencia o nivel preestablecido dentro de la función.

3. Trabajo Preparatorio

- En el manual de programación del variador o en el manual de usuario de los módulos didácticos, consultar cómo realizar la configuración de las funciones para control múltiples bombas.
- Investigar sobre el funcionamiento de un controlador PID y sus aplicaciones en sistemas de bombeo usando variadores de frecuencia.

3.1 Desarrollo

Simular un sistema de suministro de agua que se mantiene presurizado a un nivel (Set-Point) establecido por el usuario, para mantener la presión el sistema cuenta con una bomba principal (BP) y una bomba auxiliar (BA) que son controladas por el variador de frecuencia mediante funciones disponibles en este.

El sistema debe cumplir los siguientes requerimientos:

- El sistema trabajará dentro de un rango establecido entre 0 a 150 (psi), para simular la variable de proceso (presión) se puede usar un potenciómetro de una de las entradas analógicas del variador de frecuencia.
- La variable del proceso será regulada y monitoreada por el controlador PID del variador de frecuencia.

Para configurar el controlador PID seguir los siguientes pasos:

1. Definir el sistema de unidades
 2. Establecer el controlador PID (Presión, Caudal, otro)
 3. Configurar el retorno PID
 4. [Valor min. Alx] (valor mínimo proporcionado por el sensor)
 5. [Valor máximo Alx] (valor máximo proporcionado por el sensor)
 6. Retorno mínimo del PID
 7. Retorno máximo del PID
 8. Referencia PID interna
- El sistema cuenta con un modo para presurizar las tuberías y un modo de trabajo.
 - Para el arranque de las bombas se debe accionar la entrada digital DI1 del variador de frecuencia, mientras no se active DI1 las bombas no pueden entrar en funcionamiento.
 - Si se desea detener las bombas se debe desactivar DI1.

Modos de Funcionamiento

- **Presurizado de tuberías:** La **Función [Llenado de tuberías]** del variador de frecuencia permite arrancar la BP a una velocidad reducida por un tiempo determinado o hasta alcanzar un nivel preestablecido en la función.
 - Elegir el modo de activación (mediante el retorno PID o un sensor que mida la presión de salida).
 - Escoger la entrada digital que activará la función.
 - En este modo la BP debe arrancar a una velocidad de 40 (Hz) por un tiempo de 20 (s) o alcanzar los 40 (psi) de nivel establecido.
- **Modo de trabajo:** En este modo se activa la **Función [control de refuerzo]** del variador de frecuencia, que permite accionar la BP hasta alcanzar el Set-Point establecido, si después de un tiempo determinado no se alcanza el set-point el variador acciona la BA.
 - En esta práctica se usará una bomba de velocidad variable (BP) y una bomba de velocidad fija (BA).

- Se debe habilitar la BA mediante la activación de una entrada digital Dlx, la cual a su vez habilita una salida tipo relé del variador que accionará la BA después de un tiempo determinado, esta configuración se la puede realizar en la **Función [control de refuerzo]**.
- Seleccionar el método que permita acoplar o desacoplar a la BA.
- Para evitar arranques innecesarios de la BP cuando exista un leve descenso del nivel de presión, se debe establecer un rango de trabajo. La función **[Dormir/Rearranque]** detiene la BP cuando está trabajando a baja velocidad y se ha superado el set-point, además permite arrancar la BP cuando la presión ha descendido hasta un nivel preestablecido.
 - Asignar una velocidad para que la bomba entre en modo dormir después de que transcurra un tiempo de 3 (s).
 - Para que la bomba se vuelva a encender cuando exista una caída de presión, configurar el modo de re arranque con un error de 10 (psi) respecto al set-point y un tiempo de 3 (s).

NOTA: Como trabajo preparatorio presentar los circuitos de potencia que muestran la conexión de la bomba principal con el variador de frecuencia y de la bomba auxiliar conectada directamente a la red, además realizar una tabla de variables donde se muestren las entradas y salidas del variador que serán usadas.

4. Procedimiento Práctico

- Siguiendo las indicaciones dadas por el instructor, implemente los circuitos de control solicitados en el trabajo preparatorio.
- Configure las funciones del variador de frecuencia solicitadas en el trabajo preparatorio.
- Accione los circuitos implementados y observe el funcionamiento de los motores y de la variable del proceso usando el terminal gráfico del variador.

5. Informe

- Desarrollar el informe en base al formato establecido
- Presentar los circuitos completos de fuerza realizados en la práctica de laboratorio
- Presentar la tabla de variables de entradas y salidas y una tabla donde se muestren los valores que se asignó en cada función del variador frecuencia.
- Compare los resultados que se obtengan cuando se use el controlador PID sin la función [Dormir/Rearranque] y cuando se utilice esta función.

ANEXO 4: DATOS TÉCNICOS

Tabla A. 3 Selección de disyuntores para variadores ATV630 [2].

Número de catálogo			Disyuntor	I _r m	I _{ac} mínimo
De 200 a 240 V CA	De 380 a 480 V CA	De 500 a 690 V CA	según IEC 60947-2	(A)	(A)
-	ATV630U07N4, ATV650U07N4	-	GV2L07	33,5	100
ATV630U07M3	ATV630U15N4, ATV650U15N4	-	GV2L08	51	100
ATV630U15M3	ATV630U22N4, ATV650U22N4	ATV630U22Y6 ATV630U30Y6	GV2L10	78	200
ATV630U22M3	ATV630U30N4, ATV650U30N4 ATV630U40N4, ATV650U40N4	ATV630U40Y6 ATV630U55Y6	GV2L14	138	300
ATV630U30M3	ATV630U55N4, ATV650U55N4	ATV630U75Y6	GV2L16	170	300
ATV630U40M3	ATV630U75N4, ATV650U75N4	ATV630D11Y6	GV2L20	223	400
ATV630U55M3	ATV630D11N4, ATV650D11N4	ATV630D15Y6	GV2L22	327	600
-	-	ATV630D18Y6	GV3L25	350	600
ATV630U75M3	ATV630D15N4, ATV650D15N4	ATV630D22Y6	GV3L32	448	700
ATV630D11M3	ATV630D18N4, ATV650D18N4	ATV630D30Y6	GV3L40	560	900
-	ATV630D22N4, ATV650D22N4	ATV630D37Y6	GV3L50	700	1100
ATV630D15M3	ATV630D30N4, ATV650D30N4	ATV630D45Y6	GV3L65	910	1800
ATV630D18M3 ATV630D22M3	ATV630D37N4, ATV650D37N4	-	GV4L80	480	1800
ATV630D30M3	ATV630D45N4, ATV650D45N4 ATV630D55N4, ATV650D55N4	-	GV4L115	690	2500
ATV630D30M3	ATV630D45N4, ATV650D45N4	ATV630D55Y6 ATV630D75Y6	NSX100-MA100	600	2900
ATV630D37M3 ATV630D45M3	ATV630D55N4, ATV650D55N4 ATV630D75N4, ATV650D75N4	ATV630D90Y6	NSX160-MA150	1350	3200
ATV630D55M3	ATV630D90N4, ATV650D90N4 ATV6-0C11N4	-	NSX250-MA220	1980	4700
ATV630D75M3	ATV6-0C13N4 ATV6-0C16N4	-	NSX400-1.3M320	1600	6300
-	ATV6-0C22N4 ATV6-0C25N4	-	NSX630-1.3M500	3000	9000
-	ATV6-0C31N4	-	NS800L-2or5 800	1600	20000

NOTA: Los variadores de fijación al suelo ATV6-0C-•N4F disponen de protección integrada, (véase página 93) por tanto, solo es necesaria la protección contra circuitos derivados, que cumplen con la normativa local de instalación eléctrica.

(Volver a página 28)

Tabla A. 4 Valores de corriente y potencia para variadores ATV630 [2].

Número de catálogo y tamaño de bastidor [°]		Potencia nominal (1)		Suministro del bloque de potencia				Variador (salida)	
				Corriente de entrada máx.		Potencia aparente	Corriente interna máx. (2)	Corriente nominal (1)	Corriente transitoria máx. (1) (3)
				A 200 V CA	A 240 V CA				
		kW	HP	A	A	KVA	A	A	A
ATV630U07M3	[1]	0,75	1	3	2,6	1,1	4,3	4,6	5,1
ATV630U15M3	[1]	1,5	2	5,9	5	2,1	4,3	8	8,8
ATV630U22M3	[1]	2,2	3	8,4	7,2	3,0	4,3	11,2	12,3
ATV630U30M3	[1]	3	-	11,5	9,9	4,1	17,5	13,7	15,1
ATV630U40M3	[1]	4	5	15,1	12,9	5,4	17,6	18,7	20,6
ATV630U55M3	[2]	5,5	7 1/2	20,2	17,1	7,1	30,9	25,4	27,9
ATV630U75M3	[3]	7,5	10	27,1	22,6	9,4	39,3	32,7	36,0
ATV630D11M3	[3]	11	15	39,3	32,9	13,7	39,3	46,8	51,5
ATV630D15M3	[4]	15	20	52,6	45,5	18,9	64,6	63,4	69,7
ATV630D18M3	[4]	18,5	25	66,7	54,5	22,7	71,3	78,4	86,2
ATV630D22M3	[4]	22	30	76	64,3	26,7	70,9	92,6	101,9
ATV630D30M3	[5]	30	40	104,7	88,6	36,8	133,3	123	135,3
ATV630D37M3	[5]	37	50	128	107,8	44,8	133,3	149	163,9
ATV630D45M3	[5]	45	60	155,1	130,4	54,2	175	176	193,6
ATV630D55M3	[6]	55	75	189	161	61,1	168,2	211	232,1
ATV630D75M3	[6]	75	100	256	215	83,7	168,2	282	310,2

(1) La frecuencia de conmutación es ajustable:
 ○ Entre 2 y 12 kHz para variadores con tamaño de bastidor de 1 a 4; valor nominal: 4 kHz
 ○ Entre 1 y 8 kHz para variadores con tamaño de bastidor de 5 a 6; valor nominal: 2,5 kHz
 Para funcionar con frecuencias de conmutación superiores al valor nominal. Es necesario aplicar una desclasificación a la corriente del variador (salida) (véase página 108). En tal caso, es posible reducir la frecuencia de conmutación si la temperatura sube en exceso.

(2) Corriente pico cuando se conecta la alimentación, para la tensión máxima de la red de suministro.

(3) El variador está diseñado para funcionar al 110 % de la corriente nominal durante 60 segundos.

(Volver a página 29)

Hoja guía – Categorías de empleo para contactores

Generalidades

Contadores Algunas definiciones y comentarios

Categorías de empleo para contactores según IEC 60947-4-1

Las categorías de empleo normalizadas fijan los valores de corriente que el contactor debe establecer o cortar.

Dependen:

- De la naturaleza del receptor controlado: motor de jaula o de anillos, resistencias.
- De las condiciones en las que se realicen los cierres y las aperturas: motor lanzado o calado o en curso de arranque, inversión del sentido de la marcha, frenado a contracorriente.

Empleo en corriente alterna

Categoría AC-1:

Se aplica a todos los aparatos de uso de corriente alterna (receptores), cuyo factor de potencia es al menos igual a 0,95 ($\cos \phi \geq 0,95$).
Ejemplos de utilización: calefacción, distribución.

Categoría AC-2

Esta categoría rige el arranque, el frenado a contracorriente y la marcha "a sacudidas" de los motores de anillos.

- En el cierre, el contactor establece la corriente de arranque, aproximadamente 2,5 veces la corriente nominal del motor.
- En la apertura, deberá cortar la corriente de arranque, con una tensión igual a la tensión de la red.

Categoría AC-3

Se aplica a los motores de jaula en los que el corte se realiza con el motor lanzado.

- En el cierre, el contactor establece la corriente de arranque, que es de 5 a 7 veces la corriente nominal del motor.
- En la apertura, el contactor corta la corriente nominal absorbida por el motor; en ese momento, la tensión en las bornas de sus polos se acercará al 20% de la tensión de la red. El corte resulta sencillo.

Ejemplos de utilización: todos los motores de jaula habituales: ascensores, escaleras mecánicas, cintas transportadoras, elevadores de cangilones, compresores, bombas, trituradoras, climatizadores, etc.

Categoría AC-4

Esta categoría se aplica a las aplicaciones con frenado a contracorriente y marcha "a sacudidas" con motores de jaula o de anillos.

El contactor se cierra bajo un pico de corriente que puede alcanzar de 5 a 7 veces la corriente nominal del motor. Al abrirse, corta esta misma corriente bajo una tensión tan elevada que la velocidad del motor se debilita. Esta tensión puede llegar a ser igual que la tensión de la red.

El corte resulta brusco.

Ejemplos de utilización: máquinas de impresión, máquinas de tréfil, elevadores, equipos de la industria metalúrgica.

Empleo en corriente continua

Categoría DC-1

Se aplica a todos los aparatos de utilización de corriente continua (receptores) cuya constante de tiempo (L/R) es inferior o igual a 1 ms.

Categoría DC-3

Esta categoría rige el arranque, el frenado a contracorriente y la marcha "a sacudidas" de los motores de derivación.

Constante de tiempo < 2 ms.

- En el cierre, el contactor establece la corriente de arranque, aproximadamente 2,5 veces la corriente nominal del motor.
- En la apertura, deberá cortar 2,5 veces la corriente de arranque, con una tensión igual a la tensión de la red. Una tensión tan elevada que la velocidad del motor se debilita y, en consecuencia, puede aumentar su fuerza contra-electromotriz.

El corte resulta difícil.

Categoría DC-5

Esta categoría se aplica al arranque, el frenado a contracorriente y la marcha "a sacudidas" de los motores serie.

Constante de tiempo $< 7,5$ ms.

El contactor se cierra bajo un pico de corriente que puede alcanzar 2,5 veces la corriente nominal del motor. Al abrirse, corta esta misma corriente bajo una tensión tan elevada que la velocidad del motor se debilita. Esta tensión puede llegar a ser igual que la tensión de la red.

El corte resulta brusco.

Categorías de empleo para contactos y contactores auxiliares según IEC 60947-5-1

Empleo en corriente alterna

Categoría AC-14 (1)

Se aplica al control de cargas electromagnéticas en las que la potencia absorbida, cuando el electroimán está cerrado, es inferior a 72 VA.
Ejemplo de utilización: control de bobina de contactores y relés.

Categoría AC-15 (1)

Se aplica al control de cargas electromagnéticas en las que la potencia absorbida, cuando el electroimán está cerrado, es inferior a 72 VA.
Ejemplo de utilización: control de bobina de contactores.

Empleo en corriente continua

Categoría DC-13 (2)

Se aplica al control de cargas electromagnéticas en las que el tiempo empleado en alcanzar el 95% de la corriente en el régimen establecido ($T = 0,95$) es 6 veces superior a la potencia P absorbida por la carga (con $P < 50$ W).

Ejemplo de utilización: control de bobina de contactores sin resistencia de economía.

(1) Sustituye a la categoría AC-11.

(2) Sustituye a la categoría DC-11.

Tabla A. 5 Selección del cableado del bloque de potencia [2].

ATV630 (**)	Bornas de alimentación (L1, L2, L3)			Bornas de salida (U, V, W)		
	Sección transversal del cable		Par de apriete	Sección transversal del cable		Par de apriete
	Mínimo	Máximo (*)	Nominal	Mínimo	Máximo (*)	Nominal
	mm ² (AWG)	mm ² (AWG)	N.m (lb.in)	mm ² (AWG)	mm ² (AWG)	N.m (lb.in)
U07**, U15**, U22**, U30N4, U40N4	2,5 (14)	6 (10)	1,3 (11,5)	2,5 (14)	6 (10)	1,3 (11,5)
U55N4, U30M3	2,5 (14)	6 (10)	1,3 (11,5)	4 (12)	6 (10)	1,3 (11,5)
U40M3	4 (12)	6 (10)	1,3 (11,5)	6 (10)	6 (10)	1,3 (11,5)

Utilice solo cables con cableado sólido o cables trenzados rígidos.
 (*) Sección transversal máxima de las bornas
 (**) Los dos asteriscos pueden referirse a M3 o N4. Los valores de los números de catálogo ATV*****N4 también se aplican a ATV*****N4Z.

(Volver a página 31)

Tabla A. 6 Selección del cableado del bloque de control [2].

Bornas de control	Sección transversal del cable de salida del relé		Sección transversal de otros cables		Par de apriete
	Mínimo (1)	Máximo	Mínimo (1)	Máximo	
	mm ² (AWG)	mm ² (AWG)	mm ² (AWG)	mm ² (AWG)	N.m (lb.in)
Todas las bornas	0,75 (18)	1,5 (16)	0,5 (20)	1,5 (16)	0,5 (4,4)