

Diseño de un banco para accionamiento de motores de inducción en el Laboratorio de Control e
Instrumentación de la E3T-UIS

Juan Sebastian Mateus Ruiz

Héctor José Melgarejo Agudelo

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Director

Ricardo Alzate Castaño

Doctorado en Ingeniería Informática y Automática

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2021

Agradecimientos

A nuestro director Ricardo Alzate Castaño por su compromiso y entera dedicación en el desarrollo del proyecto.

Agradezco a todas y cada una de las personas que hicieron parte de este camino, y aunque muchas de ellas ya no están, todas dejaron huella en este largo recorrido.

Agradecer especialmente a mi familia, a Dios y a todos los docentes que aportaron sus conocimientos a mi desarrollo como profesional para que hoy pueda optar por este título tan anhelado.

Juan Sebastián Mateus Ruiz

Agradezco a mi familia por ser mi apoyo durante todo mi camino. A cada una de las personas que me acompañaron en el transcurso de mi carrera universitaria, aprendí mucho de cada uno ellos, en especial agradezco a mi compañero de proyecto..

Héctor José Melgarejo Agudelo

Tabla de Contenido

Introducción	12
1 Objetivos	16
1.1 Objetivo general	16
1.2 Objetivos específicos	16
2 Concepción del banco experimental	17
2.1 Descripción general del sistema	17
2.1.1 Motor	18
2.1.2 VFD	19
2.1.3 Relés de estado sólido	20
2.1.4 PLC	21
2.1.5 Mecanismo de perturbación	22
2.1.6 Encoder	23
2.1.7 Interfaz HMI	24
2.1.7.1 Pantalla táctil	25
2.1.7.2 Arreglo de contactores	25
2.2 Distribución e interconexión física de elementos en el banco de laboratorio	26
2.2.1 Conexión para módulos del banco	28

BANCO PARA ACCIONAMIENTO DE MOTORES	4
2.3 Esquemas eléctricos del banco de laboratorio	39
3 Verificación de operación por simulación	44
3.1 Estructura general del simulador	44
3.1.1 Arranque directo con inversión de giro	46
3.1.2 Arranque estrella-delta con inversión de giro	49
3.1.3 Control PID	51
3.1.4 Automatización escalera	55
4 Conclusiones	59
5 Recomendaciones	62
6 Trabajo futuro	63
Referencias Bibliográficas	64

Lista de Figuras

Figura 1	Esquema típico de control de motores industriales	12
Figura 2	Diagrama de bloques para el prototipo experimental de arranque de motores	18
Figura 3	Motor de inducción trifásico	19
Figura 4	Variador <i>Siemens Sinamics G110</i>	19
Figura 5	Relé de estado sólido	21
Figura 6	Controlador lógico programable <i>Siemens S7-1500</i>	22
Figura 7	Alternador de automóvil empleado como perturbación	23
Figura 8	Encoder incremental para sensado de velocidad	24
Figura 9	Panel táctil <i>Siemens</i>	25
Figura 10	Ubicación de elementos en banco de laboratorio	27
Figura 11	Esquema de potencia para el banco de laboratorio	29
Figura 12	Esquema de maniobra para el banco de laboratorio	30
Figura 13	Modelo 3D para banco de laboratorio	31
Figura 14	Modelo 3D para distribución interna en banco de laboratorio	32
Figura 15	Detalles específicos en modelo 3D	33
Figura 16	Esquema de potencia para arranque estrella-delta	35
Figura 17	Esquema de maniobra para arranque estrella-delta	36
Figura 18	Plano eléctrico del banco de laboratorio	40

Figura 19	Plano eléctrico para módulo selector de lógica	41
Figura 20	Plano eléctrico para módulo de lógica cableada	42
Figura 21	Plano eléctrico para módulo de lógica programada	43
Figura 22	Árbol de rutinas para esquema de simulación	45
Figura 23	Menú principal para interfaz de simulación	45
Figura 24	GRAFCET para maniobra de arranque directo con inversión de giro	47
Figura 25	Interfaz HMI para arranque directo con inversión de giro	48
Figura 26	GRAFCET para maniobra de arranque estrella-delta con inversión de giro	49
Figura 27	Interfaz HMI para arranque estrella-delta con inversión de giro	50
Figura 28	GRAFCET para regulación de velocidad mediante control PID	52
Figura 29	Máquina de estados para operación de control PID	53
Figura 30	Bloques funcionales empleados en <i>PLC Sim</i> para lazo de control PID	54
Figura 31	Interfaz HMI para control PID	55
Figura 32	Máquina de estados para operación de escalera	56
Figura 33	GRAFCET para automatización de escalera	57
Figura 34	Interfaz HMI para automatización de escalera	58
Figura 35	Arranque directo con inversión de giro por lógica cableada	67
Figura 36	Arranque suave con variador de frecuencia	69
Figura 37	Configuración para lazo de control PID	71
Figura 38	Arranque directo con inversión de giro usando un PLC	74

Figura 39	Arranque <i>estrella-delta</i> con inversión de giro usando un PLC	76
Figura 40	Asignación de memorias para el arranque <i>directo</i>	77
Figura 41	Inicialización del arranque <i>directo</i>	78
Figura 42	Inversión de giro modo <i>automático</i> y modo <i>manual</i>	78
Figura 43	Funcionamiento Stop <i>directo</i>	79
Figura 44	Asignación de memorias para el arranque <i>estrella-delta</i>	80
Figura 45	Funcionamiento de los botones Automático, Manual y Giro	80
Figura 46	Inicialización del arranque <i>estrella-delta</i>	81
Figura 47	Arranque <i>estrella-delta</i> hacia la derecha	81
Figura 48	Inversión de giro modo <i>automático</i> y modo <i>manual</i>	82
Figura 49	Arranque <i>estrella-delta</i> hacia la izquierda	82
Figura 50	Funcionamiento Stop <i>estrella-delta</i>	83
Figura 51	Ajuste de variable M_SalidaPID	84
Figura 52	Ajuste de variable PerturbacionRPM	84
Figura 53	Realimentación de lazo en <i>modo arranque</i>	84
Figura 54	Realimentación de lazo en <i>modo control</i>	84
Figura 55	Realimentación de lazo en <i>paro de máquina</i>	85
Figura 56	Límites de variables: EntradaPID, Setpoint y M_salidaPID	85
Figura 57	Asignación de memoria para <i>control PID</i>	86
Figura 58	Funcionamiento de botones: Stop y Giro	86
Figura 59	Inicialización de operación de rutina <i>control PID</i>	87

Figura 60	Funcionamiento de operación en <i>giro, modo control y modo arranque</i>	87
Figura 61	Encendido y apagado de <i>perturbación</i>	88
Figura 62	Funcionamiento de modos de <i>control y arranque</i>	88
Figura 63	Simulación de comportamiento de <i>persona en escalera</i>	89
Figura 64	Simulación de comportamiento del <i>sensor</i>	89
Figura 65	Ajuste de referencia según estado de <i>sensor</i>	90
Figura 66	Retención de velocidad en modo de <i>espera</i>	90

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A Esquemas de conexión para maniobras de arranque	66
Apéndice B Rutinas programadas en LADDER	77

Resumen

Título: DISEÑO DE UN BANCO PARA ACCIONAMIENTO DE MOTORES DE INDUCCIÓN EN EL LABORATORIO DE CONTROL E INSTRUMENTACIÓN DE LA E3T-UIS *

Autor: JUAN SEBASTIÁN MATEUS RUIZ; HÉCTOR JOSÉ MELGAREJO AGUDELO **

Palabras Clave: PROTOTIPO DE LABORATORIO, MANIOBRAS DE ARRANQUE DE MOTORES, CONTROL PID EXPERIMENTAL, CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE.

Descripción: El presente trabajo de grado aborda el diseño de un banco de laboratorio para efectuar maniobras de arranque en motores eléctricos a través de un PLC. Inicialmente, se concibe la estructura general para un banco de laboratorio que constituya un recurso didáctico para realizar maniobras de arranque del tipo directo, estrella-delta y suave por variador de velocidad, en máquinas de inducción trifásicas, tanto por lógica cableada como programada a través de un PLC. Adicionalmente, se plantea la posibilidad de verificar la ejecución para un lazo de regulación de velocidad en la máquina de inducción mediante un algoritmo de control PID. Para ello se define una arquitectura de sistema que hace uso de elementos disponibles en el *Laboratorio de Control e Instrumentación de la E3T-UIS* y se plantea su distribución espacial y su esquema de interconexión haciendo uso del sentido común. Lo anterior, permitió desarrollar una estructura modular y configurable para el desarrollo de las diferentes maniobras de arranque. A falta de pruebas experimentales, la verificación de los diseños se realizó a través de rutinas de simulación numérica para evidenciar la funcionalidad de los esquemas lógicos de operación para las rutinas a ser ejecutadas por el autómata. Trabajo futuro incluye la construcción física del banco de laboratorio y la verificación experimental para las diferentes maniobras de arranque y de regulación de velocidad consideradas.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Ricardo Alzate Castaño, Doctorado en Ingeniería Informática y Automática.

Abstract

Title: DESIGN OF A TEST BENCH FOR STARTING MANEUVERS IN ELECTRIC MOTORS AT THE CONTROL AND INSTRUMENTATION LABORATORY OF THE E3T-UIS *

Author: JUAN SEBASTIÁN MATEUS RUIZ; HÉCTOR JOSÉ MELGAREJO AGUDELO **

Keywords: EXPERIMENTAL PID CONTROL, LABORATORY PROTOTYPE, PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER, STARTING MANEUVERS OF ELECTRIC MOTOR.

Description: In this work the design for a laboratory prototype aimed at the experimental testing of electric motor starter maneuvers, is addressed. First of all, the general conception of a system allowing to achieve, in a clear and didactic manner, maneuvers for starting three-phase induction motors by means of direct, star-delta and electronic (soft starter) configurations in both: hard-wired and micro-programmed control, is performed. In addition, the prototype is required to allow the implementation of a PID control loop for regulation of the speed on the induction machine under disturbances. By doing so, existing devices of the *Control and Instrumentation Laboratory of the E3T-UIS* were employed, reused, configured and interconnected in the design of the experimental rig. As a result, a modular and reconfigurable architecture of system was conceived to implement several starting maneuvers for the operation of the induction machine. Given the impossibility to perform experimental verifications of the design by restrictions imposed by the COVID-19 pandemic, numerical simulations were performed to validate the logical functionality of routines emulating the operation of automatic processes programmed in the logic controller in LADDER language. Ongoing work includes the construction of the real prototype and the experimental verification of the starting routines proposed.

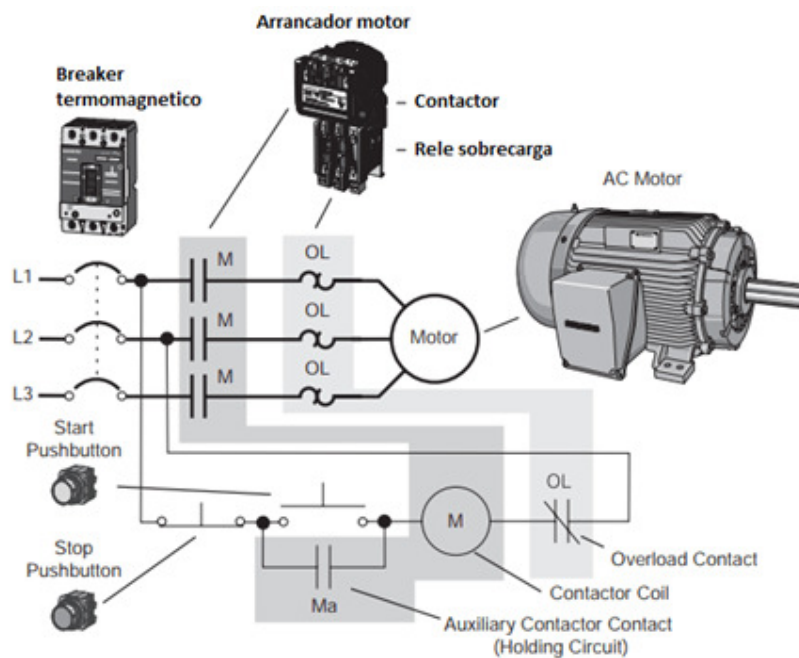
* Bachelor Thesis

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering; School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: Ricardo Alzate Castaño, PhD in Computer and Automation Engineering.

Introducción

Un alto porcentaje de las cargas eléctricas industriales corresponden con motores de inducción. Por tanto, realizar una operación apropiada para este tipo de máquinas es de gran importancia en campos como la automatización de procesos industriales y la eficiencia energética. Asimismo, la tecnología actual permite explorar estrategias avanzadas de mando para operación de motores (ver Fig. 1), incluyendo arrancadores suaves y maniobras de paro y cambio de giro, a través de rutinas programadas en computadores industriales del tipo PLC (Programmable Logic Controller).

Figura 1. Esquema típico de control de motores industriales



Nota. Imagen recuperada de: <https://es.wikipedia.org/>

De otro lado, en el plan de estudios actual del programa de pregrado en Ingeniería Electrónica de la Universidad Industrial de Santander (UIS), las nociones de máquinas eléctricas se desarrollan en la asignatura: *Automatización de Procesos*, a partir de un módulo temático destinado a comprender configuraciones para automatismos de arranque en máquinas de inducción, incluyendo las del tipo: directo, delta-estrella, por resistencias estáticas y mediante arrancadores estáticos, tanto por lógica cableada como también mediante lógica programada.

Sin embargo, la infraestructura actual de los laboratorios de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) de la UIS, no posee un banco debidamente instrumentado para verificar experimentalmente los procedimientos anteriormente mencionados, empleando autómatas programables.

En este contexto se destaca el trabajo de grado desarrollado por Rincón *et al.* (2016) quienes bajo la dirección de J. Barrero construyeron un banco para el laboratorio de máquinas eléctricas que permite realizar maniobras de arranque (directo, estrella-delta y suave) en modo local y remoto a través de LabVIEW, pero que sin embargo se limita a soluciones con lógica cableada. De manera similar, Arias y Rangel (2013) presentan la adecuación de un módulo de laboratorio para efectuar el arranque controlado en motores de inducción y de corriente continua con excitación independiente, mediante el PLC Twido de Schneider-Electric. No obstante, este sistema se encuentra actualmente inoperante debido al deterioro de sus interfaces de potencia y a la obsolescencia (falta de soporte comercial) del autómata programable para el cual fue diseñado.

Más aún, la E3T cuenta con un espacio destinado a la realización de prácticas de laboratorio para las asignaturas relacionadas con el control, la instrumentación electrónica y la automatización de procesos (*Laboratorio de Control e Instrumentación - LAT 209*).

Trabajos de grado recientes como Robles y Galvis (2018) y Camacho (2019), evidencian los esfuerzos encaminados a dotar el mencionado recinto con prototipos funcionales que permitan a los estudiantes fortalecer sus experiencias formativas mediante actividades de laboratorio cercanas al mundo industrial. Particularizando al caso de accionamientos eléctricos, Muñoz *et al.* (2013) desarrollaron la construcción para un banco que permite realizar en dicho laboratorio el control de velocidad de un motor de inducción trifásico sometido a perturbaciones de torque, a través de un PID industrial. Sin embargo, no se exploraron rutinas de arranque más allá de las rampas configuradas por defecto en un variador de velocidad, ni se realizaron análisis sobre procedimientos de frenado y/o cambio de giro.

Desarrollos similares en otras universidades a nivel colombiano e iberoamericano incluyen: Gómez (2018) implementando una estrategia de control sobre una máquina de inducción basada en lógica difusa sobre un PLC; Sanabria y Sánchez (2016) construye un sistema SCADA para el control por PLC de un motor trifásico; Gaguancela y Layedra (2011) emula el control de una grúa en un prototipo a escala a partir de maniobras de arranque y frenado y Taipanta (2011); Piñero (2015) orientados al desarrollo de un módulo didáctico para el control de velocidad en motores

trifásicos mediante variadores de frecuencia.

A partir de lo anterior, se plantean inquietudes como las siguientes: ¿Qué elementos se requieren para construir un prototipo (banco) de laboratorio que facilite la programación en PLC de diferentes tipos de maniobra para el arranque de motores industriales? ¿Cómo hacer para que dicho prototipo sea didáctico? ¿Puede un prototipo de laboratorio simple ejemplificar situaciones típicas en la industria? ¿Puede el diseño del prototipo realizarse para integrar actividades de lógica cableada y programada?

El presente trabajo de grado busca realizar aportes direccionados a la formación de recurso humano en el uso de tecnologías aplicadas a la automatización de procesos industriales, constituyendo una base para posteriores desarrollos en el contexto del control y accionamiento de motores eléctricos.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Diseñar un prototipo de banco de laboratorio para ejecutar accionamiento de motores de inducción empleando un PLC Siemens.

1.2. Objetivos específicos

Determinar la topología de un banco experimental para el accionamiento de motores eléctricos mediante PLC, que permita aprovechar elementos disponibles en los laboratorios de la E3T-UIS.

Configurar los elementos del prototipo de manera que permitan realizar maniobras de arranque en un motor de inducción, tanto por lógica cableada como programada.

Realizar pruebas de simulación para arranques del tipo: directo, delta-estrella y controlado por variador de velocidad.

Desarrollar la programación para una interfaz HMI que facilite la operación del sistema en modos manual y automático.

2. Concepción del banco experimental

El presente *Capítulo* aborda el diseño conceptual para el prototipo de laboratorio que permitirá realizar las maniobras de arranque y cambio de giro en una máquina de inducción. Se partirá de la definición para la estructura del sistema experimental y a partir de ello se realizará la descripción detallada de cada etapa, determinando los elementos requeridos para su implementación física, hasta constituir el banco de laboratorio completo.

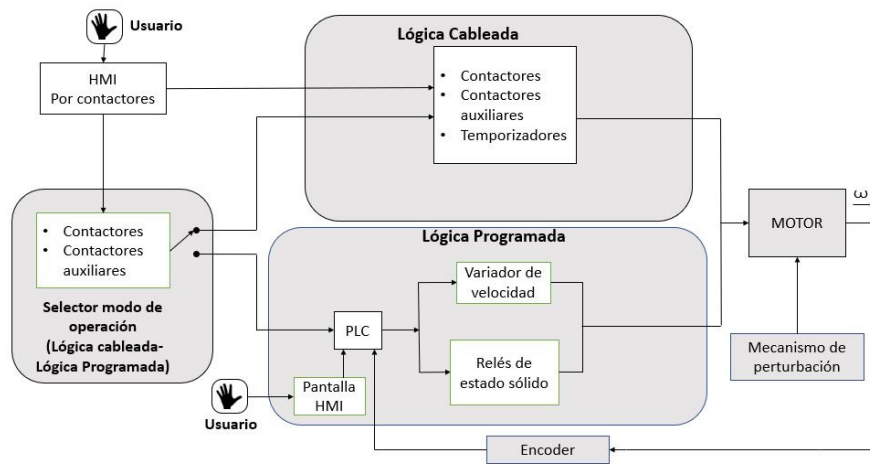
2.1. Descripción general del sistema

La Fig. 2 muestra el esquema general para el diagrama de bloques del prototipo de laboratorio a ser implementado. Dicha configuración responde a las siguientes necesidades que deberán ser satisfechas por el prototipo de laboratorio, a manera de especificaciones de requerimiento:

- El prototipo deberá permitir realizar arranques del tipo: directo, estrella-delta y suave por variador de frecuencia, sobre un motor de inducción;
- El prototipo deberá permitir realizar maniobras de arranque a través de lógica programada y lógica cableada;
- El prototipo deberá permitir implementar un control de velocidad para el motor a través de un algoritmo PID sometido a perturbaciones.

A continuación, se realizará la descripción detallada para cada una de las etapas que cons-

Figura 2. Diagrama de bloques para el prototipo experimental de arranque de motores



tituyen el sistema.

2.1.1. Motor.

El elemento más importante del prototipo de laboratorio será el motor de inducción trifásico a ser accionado mediante las diferentes maniobras de arranque que serán implementadas. Este dispositivo corresponderá con un tipo jaula de ardilla de marca *Siemens*, con potencia nominal de 2 [HP] y velocidad de 1800 [rpm] a 60 [Hz]. Como datos de alimentación se tienen 220 / 240 [VAC] a 60 [Hz] y una corriente máxima de 7.0 / 3.5 [A] (en conexión estrella/triángulo respectivamente). La apariencia física del elemento se muestra en la Fig. 3.

Figura 3. Motor de inducción trifásico



2.1.2. VFD.

Al momento de realizarse maniobras de arranque suave, será necesario el empleo de un variador de frecuencia (VFD - *variable frequency drive*). Tomando en cuenta las características nominales descritas para el motor de inducción, se selecciona el variador *Siemens Sinamics G110* como el dispositivo encargado de modificar su velocidad de operación. Este variador posee capacidad de potencia para impulsar máquinas de hasta 3 [kW], y opera con voltajes de alimentación de 200/240 [V] a 50 a 60 [Hz]. La apariencia física del dispositivo se muestra en la Fig. 4.

Figura 4. Variador Siemens Sinamics G110



2.1.3. Relés de estado sólido.

Un relé de estado sólido (SSR - *solid state relay*) es un dispositivo interruptor electrónico que conmuta el paso de la electricidad cuando una pequeña corriente es aplicada en sus terminales de control. En términos prácticos, cumple la misma función que su versión electromecánica, aunque con todas las ventajas asociadas a una mayor velocidad de respuesta (evitando fenómenos de histéresis magnética) y por supuesto, con un mayor tiempo de vida útil por no presentar desgaste de contactos por conmutación.

A nivel de conexiones, el SSR dispone de un terminal de entradas correspondiente con una señal de control (generalmente en corriente continua) que define mediante un nivel binario el instante de cierre o apertura para un conmutador en su salida. Comercialmente, se pueden encontrar versiones para conexiones de salida en corriente directa o alterna (monofásica o trifásica). La Fig. 5 ilustra la apariencia física de un SSR trifásico, seleccionado en el presente proyecto para conectar de manera controlada la alimentación trifásica del motor. En el banco se incluirán adicionalmente otros cuatro SSR para las conexiones de: 1) sentido de giro a la derecha; 2) sentido de giro a la izquierda; 3) conexión en estrella y 4) conexión en triángulo. A su vez, todos los SSR empleados poseen la capacidad de conectar cargas trifásicas en corriente alterna consumiendo hasta 40 [A], para un rango de voltaje eficaz de 40-530 [V], frecuencia 47-63 [Hz] y una tensión de comando en corriente directa de 4-32 [V] y 15-20 [mA]. Las conexiones de los SSR se realizarán a través de borneras para uso flexible por parte del usuario.

Figura 5. Relé de estado sólido



2.1.4. PLC.

El controlador lógico programable (PLC - *programmable logic controller*), será el dispositivo encargado de almacenar las instrucciones de código correspondientes con las rutinas de automatización a partir de lógica programada. Para objetivos del presente proyecto, se selecciona el modelo *Siemens S7-1500* con CPU de referencia *1512C-1PN*. El aspecto físico del dispositivo se muestra en la Fig. 6.

Este PLC corresponde con una solución tecnológica de gama alta dentro de la línea de controladores industriales ofrecida por el fabricante *Siemens*. En particular, el dispositivo cuenta (entre otras) con las siguientes características: 250 [kB] de memoria para código; 1 [MB] de memoria para datos y una velocidad de respuesta entre datos de 48 [ns]. Adicionalmente, se dispone de un módulo de 16 entradas y salidas digitales de 24 [V] / 0.5 [A]; un módulo de 5 entradas y salidas analógicas de 16 bits; 6 canales para conteo rápido de pulsos y medición de encoders incrementales de 24 V (hasta 100 kHz) y 4 canales de salida por modulación por ancho de pulso (PWM) de hasta 100 [kHz].

La programación y configuración del PLC se realiza a través del paquete integrado de software *TIA Portal*, específicamente empleando la herramienta *Step 7*.

Figura 6. Controlador lógico programable *Siemens S7-1500*



2.1.5. Mecanismo de perturbación.

Con el objetivo de realizar pruebas de regulación PID sobre la velocidad del motor de inducción, se adaptará una perturbación de tipo mecánica al eje de rotación de la máquina. Para ello, se aprovechará el torque de oposición producido por otra máquina eléctrica correspondiente con un alternador de automóvil como el presentado en la Fig. 7.

De esta manera, tomando en cuenta que la polarización del circuito de rotor del alternador eléctrico es en corriente continua (precisamente esto permite cargar la batería de un automóvil), al aplicar una tensión en este punto se creará una magnetización que posibilita transferir la energía mecánica rotacional de su eje hacia una potencia eléctrica en sus terminales de salida. Así, conec-

Figura 7. Alternador de automóvil empleado como perturbación



tando cargas resistivas en dicho punto, la potencia consumida generará un efecto de frenado a partir del torque de oposición producido en el eje de rotación del alternador, acoplado mecánicamente al eje de rotación del motor de inducción.

Esta configuración busca replicar el montaje implementado por Muñoz *et al.* (2013), a partir de la utilización de un alternador de 30 [A], una batería de 12 [V] / 12 [A] y 2 bombillas de 100 [W] a manera de carga, que representan una disminución de 100 [rpm] en el valor de velocidad nominal de la máquina.

2.1.6. Encoder.

A pesar que el VFD implementa un lazo de regulación V/f basado en mediciones internas de la potencia entregada como alimentación a la máquina, uno de los objetivos principales del banco de laboratorio a ser diseñado corresponde con la implementación de un lazo de control PID para la regulación de velocidad de rotación del motor. Para ello, será fundamental un dispositivo

de sensado que permita capturar el valor en [rpm] de rotación del eje de la máquina.

Dentro de las diferentes alternativas existentes para realizar esta medición, se selecciona un encoder de tipo incremental como el mostrado en la Fig. 8. Este dispositivo posee una resolución de 600 [pulsos/revolución]. Adicionalmente, es posible realizar una lectura de los pulsos entregados por el dispositivo a través de los contadores rápidos de entrada (y configurables para dicho propósito) en el PLC S7-1500 de *Siemens*.

Figura 8. Encoder incremental para sensado de velocidad



2.1.7. Interfaz HMI.

La interacción del usuario con el sistema experimental se realizará mediante una interfaz (HMI - human machine interface, de su sigla en inglés).

Dicha interfaz se implementará a partir de dos tecnologías: 1) por lógica programada em-

pleando una pantalla táctil; 2) por lógica cableada a partir de arreglos de contactores.

A continuación se realizarán descripciones particulares para cada caso.

2.1.7.1. Pantalla táctil. Para este propósito se empleará la pantalla *Siemens* de referencia *KTP700 Basic PN* mostrada en la Fig 9, la cual corresponde con un panel táctil de 7" a color, que soporta el protocolo de comunicación PROFINET y programación mediante el paquete integrado de software *TIA Portal*, específicamente empleando la herramienta Step 7.

Figura 9. Panel táctil Siemens



2.1.7.2. Arreglo de contactores. De otro lado, la interfaz correspondiente a la lógica cableada dispondrá de un arreglo de botones y contactores (principales y auxiliares) interconectados para asignar comandos e instrucciones de entrada. Asimismo, se hará uso de bombillas para indicar el estado de ciertas variables importantes del proceso de accionamiento de la máquina, como pueden ser: indicadores de marcha, sentido de giro, alarmas o activación de protecciones,

entre otros.

Adicionalmente, esta interfaz de lógica cableada posee la importante labor de habilitar o deshabilitar (seleccionar) el tipo de lógica a ser empleado en el accionamiento del motor de inducción. Lo anterior, para garantizar condiciones de seguridad que eviten instrucciones de control paralelo sobre la máquina, que pueden repercutir en corto circuitos, mal funcionamiento y correspondiente daño a los elementos (de potencia y mando) del sistema de automatización propuesto.

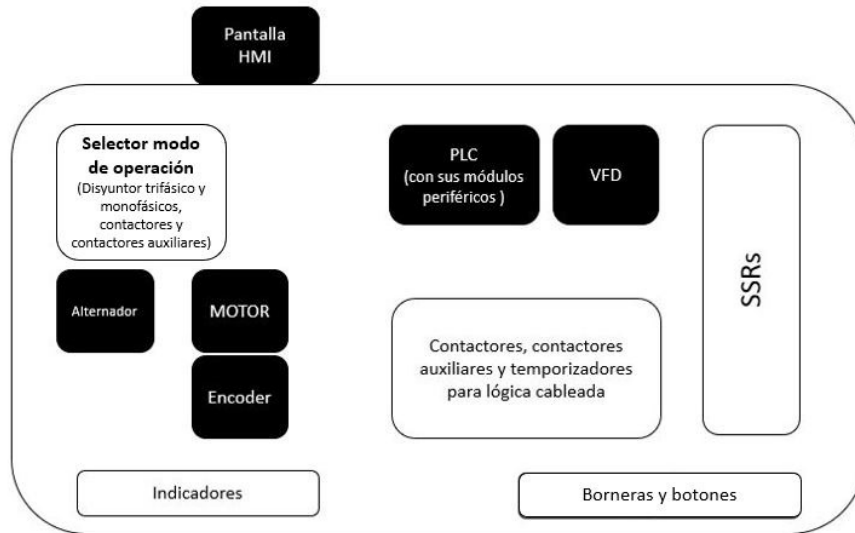
2.2. Distribución e interconexión física de elementos en el banco de laboratorio

Los elementos anteriormente descritos se ubicarán en un cofre metálico y rectangular de dimensiones: 70 (alto) x 80 (ancho) x 100 (largo) [cm], recuperado de un antiguo montaje y disponible para uso en el nuevo banco de laboratorio.

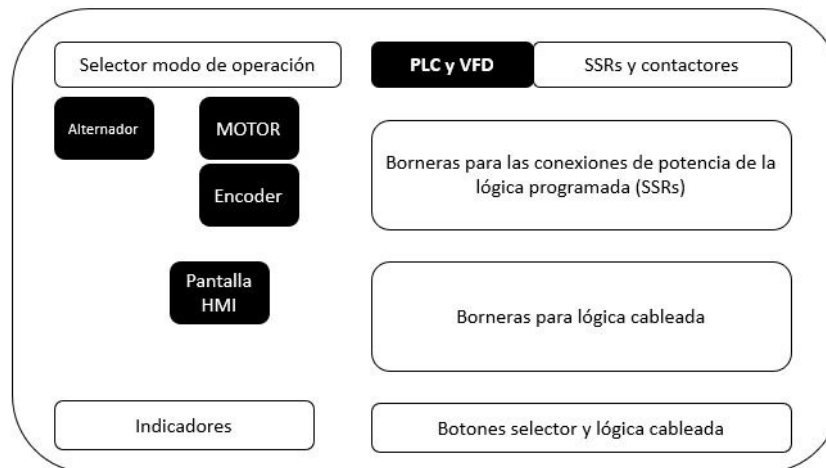
De manera más puntual, la distribución de los dispositivos al interior del espacio del cofre se realiza siguiendo el sentido común. Inicialmente, se posicionan elementos importantes como: el motor de inducción, el alternador, el PLC (con todos sus módulos periféricos) y el VFD, según ilustrado por los bloques de color negro en la Fig. 10, indicando localizaciones a partir de las vistas frontal y superior del prototipo.

En un segundo momento, se procedió a ubicar todos los elementos de protección, así como también los dispositivos de lógica cableada necesarios para realizar la operación del sistema. Pa-

Figura 10. Ubicación de elementos en banco de laboratorio



(a) Vista frontal



(b) Vista superior

ra ello, se consideraron los esquemas de potencia y maniobra presentados respectivamente en las Figs. 11 y 12, a partir de los cuales se resaltan los selectores de modo de operación, las borneras de conexión, los contactores (principales, auxiliares y temporizados), los relés de estado sólido y los elementos indicadores, representados mediante bloques de color blanco en la Fig. 10.

Como complemento a lo anterior, la Fig. 13 presenta un modelo tridimensional desarrollado en SolidWorks para el prototipo de banco de laboratorio, permitiendo ilustrar mejor la distribución de los elementos en el espacio. En particular, la Fig. 13(b) muestra los elementos para interactuar con el usuario, incluyendo la pantalla táctil y la interfaz construida a partir de pulsadores (*PI*, *P2*, *P3*, *P4*, *P5*, *LP*, *LC* y *STOP Principal*), indicadores luminosos (*B1*, *B2*, *B3*, *LP* y *LC*) y un interruptor (para activar la perturbación). Por su parte, el detalle al interior del cofre se presenta mediante el esquema de la Fig. 14, evidenciando formas y proporciones. De manera similar, la Fig. 15(a) presenta un acercamiento sobre los dispositivos de protección y de selección para el tipo de lógica, mientras que la Fig. 15(b) realiza lo propio para la ubicación de los elementos mecánicos en el prototipo de laboratorio.

2.2.1. Conexión para módulos del banco.

La operación del banco de laboratorio destaca arranques del tipo: directo, estrella-delta y suave por variador de frecuencia. De ellos, los dos primeros se realizarán empleando lógica cableada e incorporarán inversión de giro.

Figura 11. Esquema de potencia para el banco de laboratorio

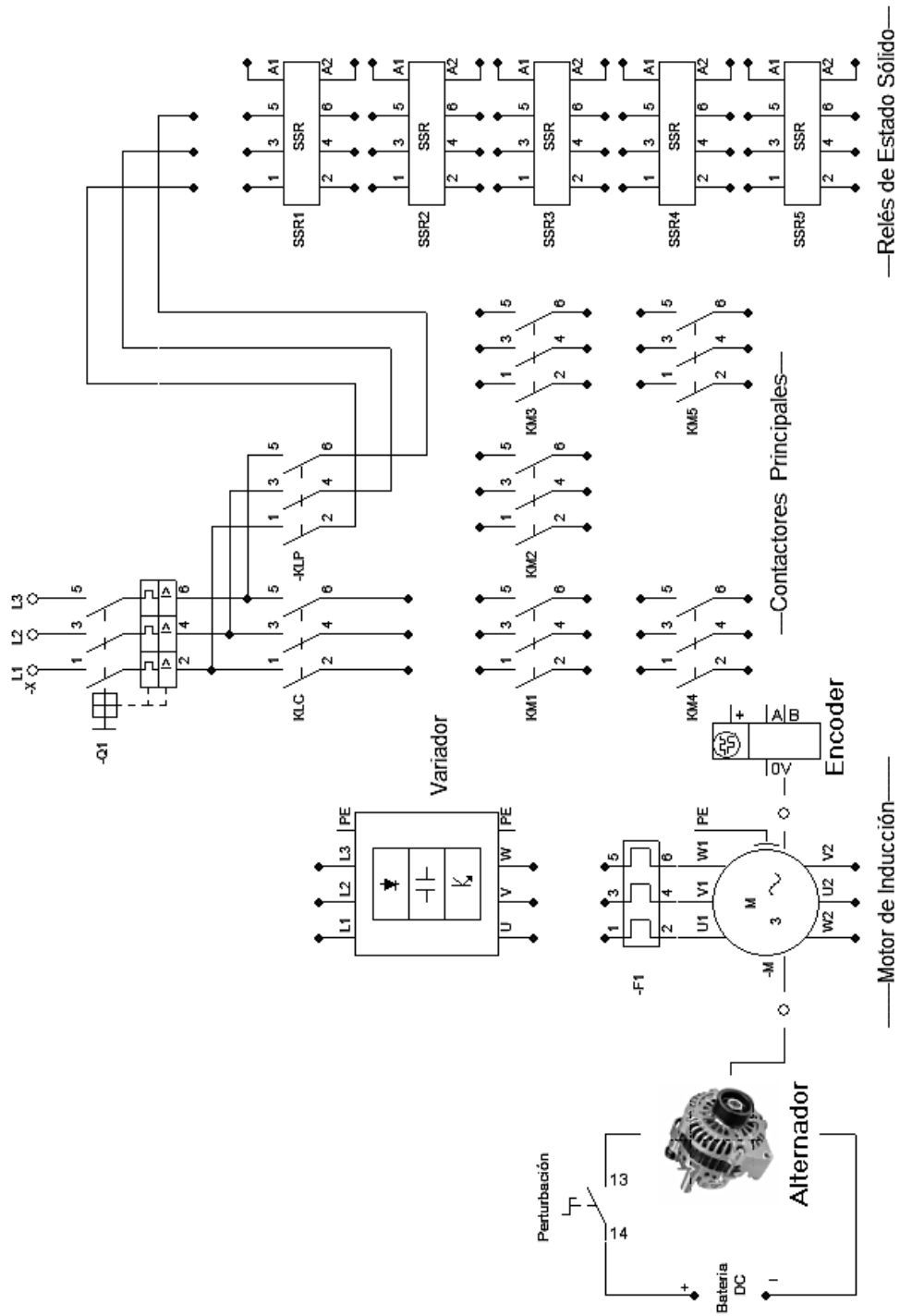
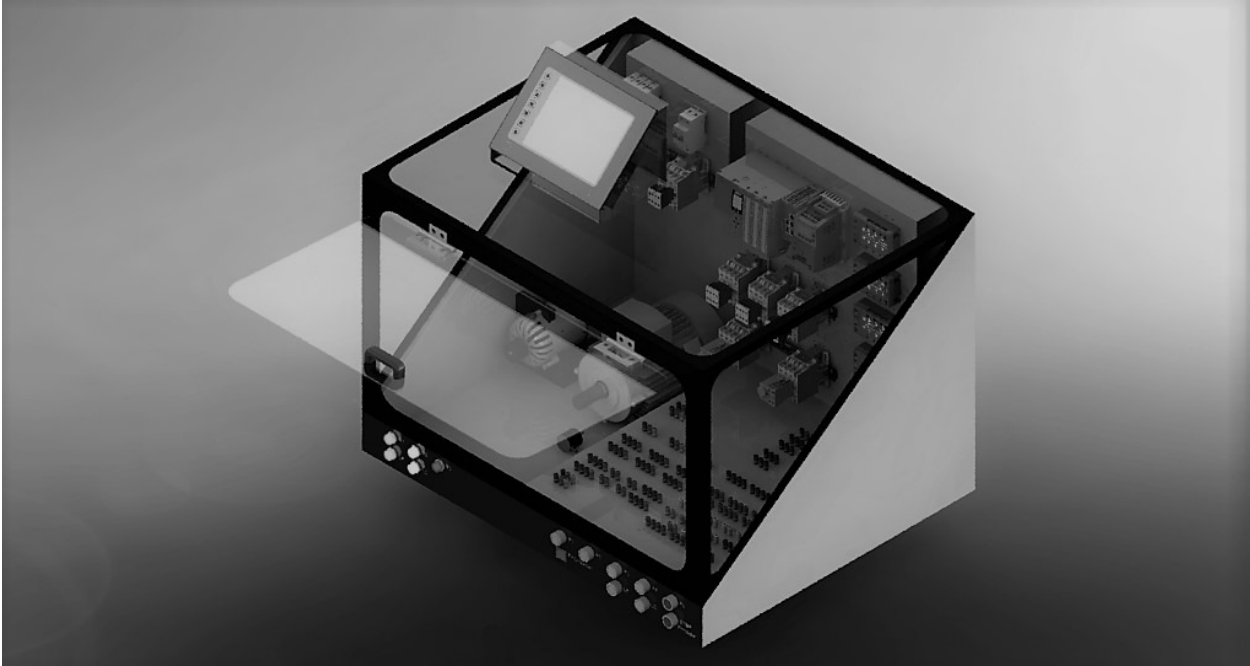
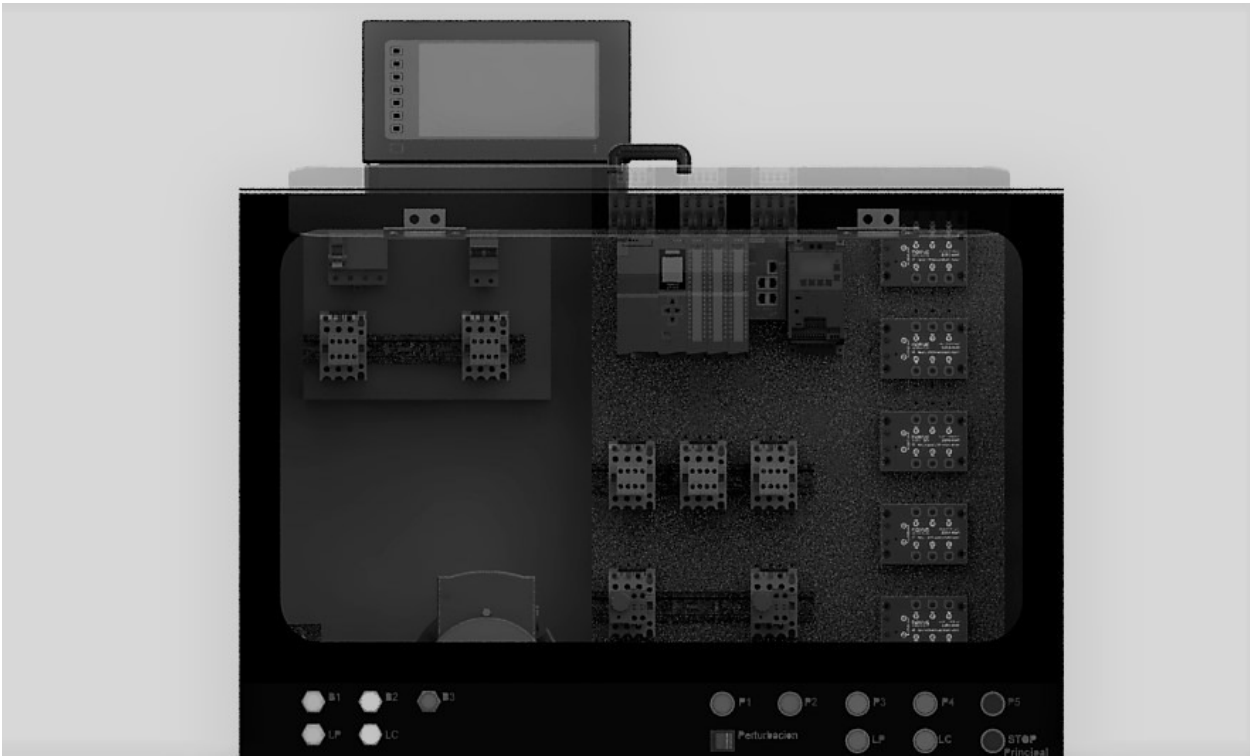


Figura 13. Modelo 3D para banco de laboratorio

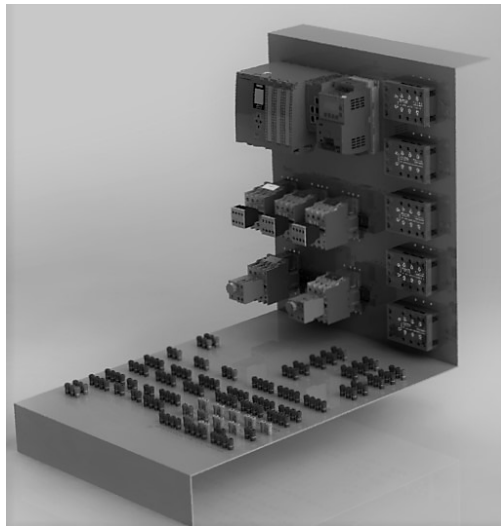


(a) Vista isométrica

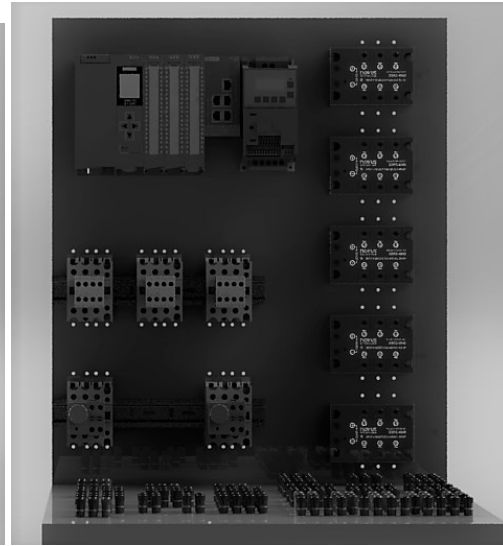


(b) Vista frontal

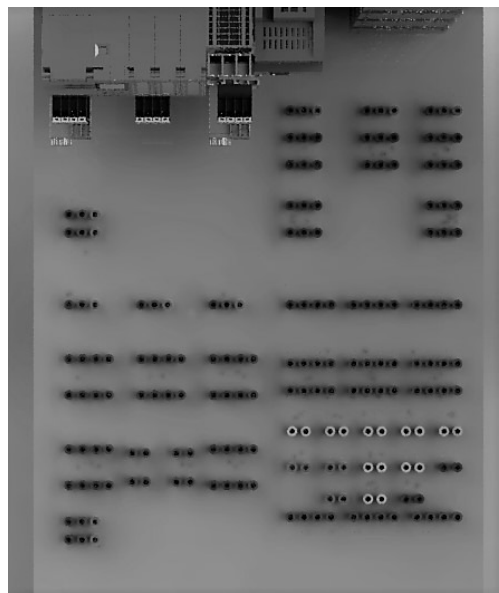
Figura 14. Modelo 3D para distribución interna en banco de laboratorio



(a) Vista isométrica

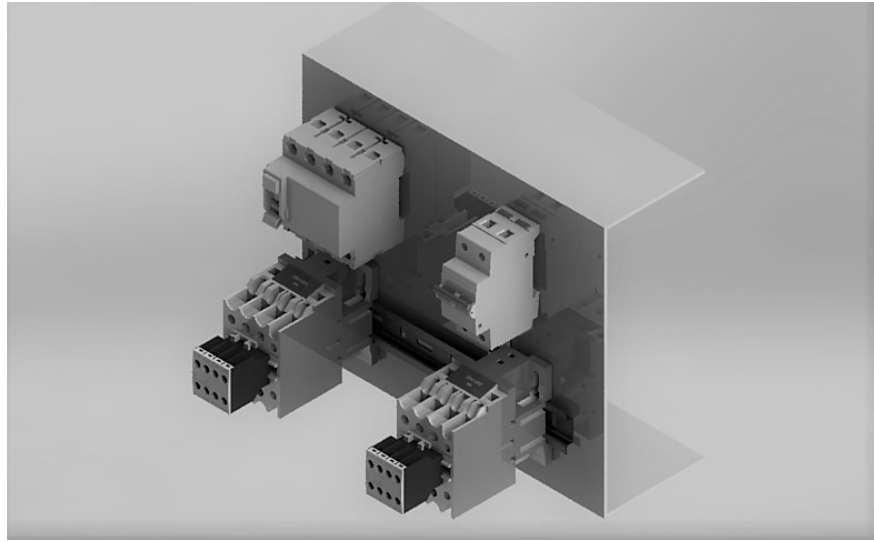


(b) Vista frontal

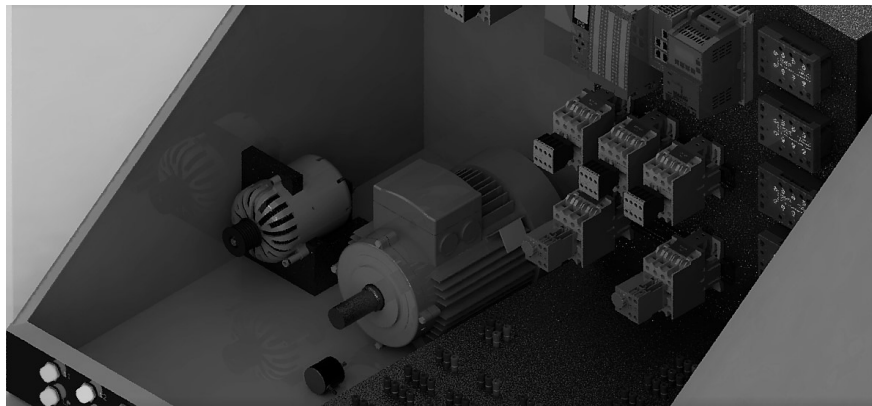


(c) Vista superior

Figura 15. Detalles específicos en modelo 3D



(a) Dispositivos de protección y selección del tipo de lógica



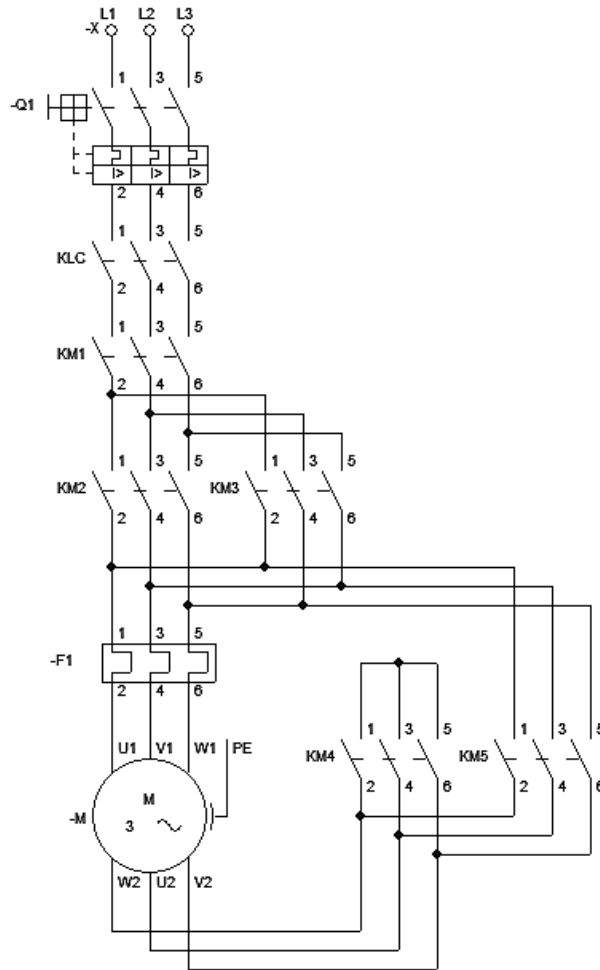
(b) Ubicación para motor, alternador y encoder

Así entonces, refiriendo nuevamente la Fig. 11, se observa que el motor de inducción se conecta a la alimentación principal a través de varias opciones: variador de frecuencia (VFD), un grupo de contactores principales y un grupo de relés de estado sólido, dependiendo del tipo de lógica y de arranque a ser configurado por el usuario a través de las borneras dispuestas para dicho propósito. Lo anterior ilustra la modularidad del banco de laboratorio diseñado.

A manera de ejemplo, se ilustrará la configuración para la maniobra de arranque estrella-delta con inversión de giro. Para ello, el usuario deberá implementar el *esquema de potencia* mostrado en la Fig. 16 a partir de la configuración siguiente:

- 1) Conectar protecciones a líneas de alimentación trifásica, en nuestro caso un disyuntor trifásico de 220/400 [VAC] y 10 [A], dimensionado según la norma técnica colombiana *NTC2050*, al 125 % de la corriente nominal de la carga (i.e. 7 [A]). De otro lado, la protección térmica *FI* es interna del motor;
- 2) Conectar el contactor (*KLC*) encargado de habilitar la energización de los esquemas de lógica cableada;
- 3) Conectar los contactores principales de modo tal que *KM1* sea el encargado de mantener activo el proceso; *KM2* sea el encargado de activar el sentido de giro del motor hacia la derecha y *KM3* sea el encargado de activar el sentido de giro del motor hacia la izquierda, a través del cambio en una de las fases de alimentación al motor;

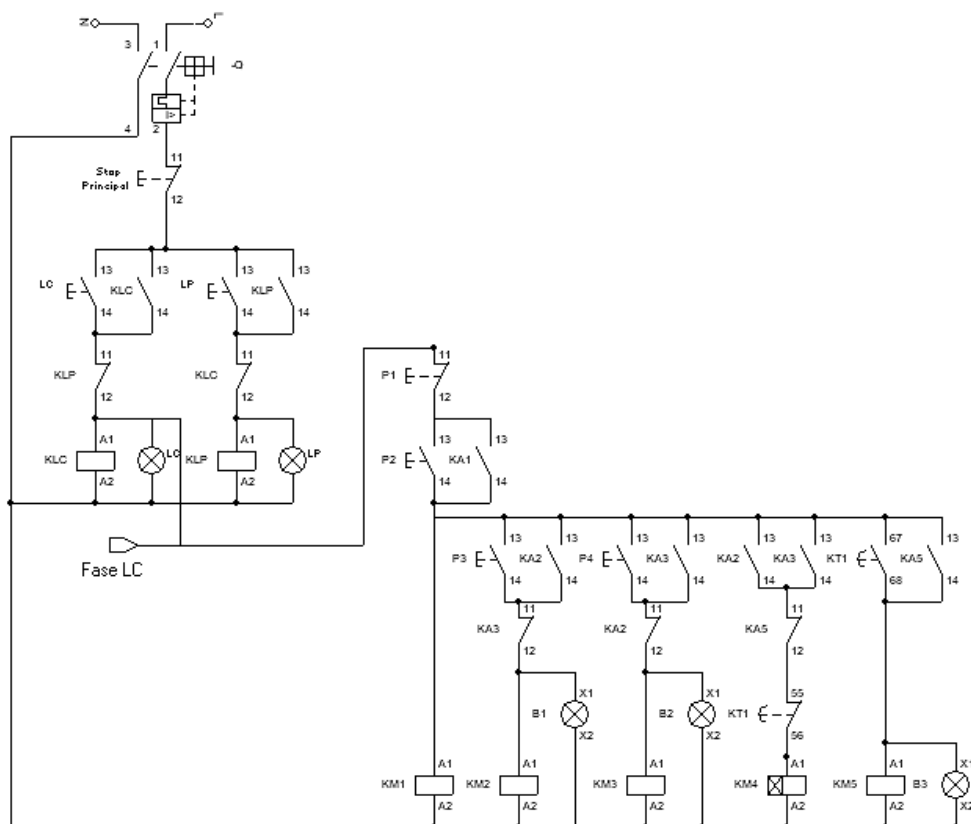
Figura 16. Esquema de potencia para arranque estrella-delta



- 4) Conectar las borneras de alimentación del motor, tanto de las líneas que vienen desde *KM2* y *KM3* como también de las que van hacia dos contactores adicionales, encargados de configurar las conexiones en estrella (*KM4*) y delta (*KM5*).

Posteriormente, se deben configurar en el esquema general de la Fig. 12 todos los contactos auxiliares y elementos de visualización que sean requeridos para implementar el *esquema de maniobra* de la Fig. 17. En particular:

Figura 17. Esquema de maniobra para arranque estrella-delta



- 5) Conectar la alimentación del esquema de maniobra, a través de un transformador reductor de 110/24 [VAC] acoplado a un disyuntor bipolar de 24 [VAC] / 1 [A] en serie con un pulsador normalmente cerrado (*Stop Principal*) que realiza la parada de emergencia;
- 6) Conectar la selección para el tipo de lógica a través de los contactores *KLP* (para la lógica programada) y *KLC* (para la lógica cableada), los pulsadores *LC* y *LP*, además de sus indicadores luminosos respectivos. A partir de lo anterior, la línea denominada *Fase LC* alimentará el circuito en lógica cableada;
- 7) Conectar los contactos auxiliares para ejecutar el arranque, mediante un pulsador normalmente cerrado (*P1*) en serie con el paralelo entre un pulsador normalmente abierto (*P2*) y un contacto normalmente abierto (*KAI*), a su vez conectados en serie con la bobina del contactor principal (*KMI*). Es conveniente aclarar que el contacto *KAI* es auxiliar al contactor principal (*KMI*). Adicionalmente, el pulsador *P2* ejecutará el arranque de la máquina mientras que *P1* realizará su parada;
- 8) Conectar los contactos auxiliares para configurar el sentido de giro a la derecha, conectando en paralelo un pulsador (*P3*) y un contacto normalmente abierto (*KA2*) auxiliar al contactor principal *KM2*. Estos a su vez se conectan en serie con un contacto normalmente cerrado (*KA3*) auxiliar al contactor que selecciona el sentido de giro contrario (*KM3*). A su vez, este último se conecta en serie con el paralelo entre la bobina del contactor (*KM2*) y un indicador luminoso (*BI*). La conexión para el sentido de giro a la izquierda se realiza de la misma forma, empleando el pulsador *P4*, el contacto normalmente abierto *KA3*, el contacto

normalmente cerrado *KA2*, la bobina del contactor *KM3* y el indicador luminoso *B2*. Como se observa, la ejecución independiente del accionamiento evita cambios de sentido de giro simultáneos;

- 9) Configurar el arranque en estrella por defecto, conectando en paralelo contactos normalmente abiertos (*KA2* y *KA3*) auxiliares a los contactores de sentido de giro. A su vez, el paralelo anterior se conecta en serie con dos contactos normalmente cerrados (*KA5* y *KTI*) y la bobina del contactor de conexión en estrella (*KM4*). Para este caso, *KA5* representa la conexión en delta mientras que *KTI* corresponde con un contactor temporizado con retardo a la conexión, acoplado mecánicamente al contactor *KM4*. El tiempo de conexión debe ajustarse al intervalo que tarde el motor en alcanzar el 90 % de su velocidad nominal (Roldán, 2012);
- 10) Configurar la conmutación a conexión delta, conectando un contacto normalmente abierto (*KTI*) del contactor temporizado que energiza la bobina del contactor de conexión en delta (*KM5*) y activa el indicador luminoso *B3* una vez transcurrido el tiempo programado para la conexión. Adicionalmente, se conecta en paralelo con *KTI* un contacto normalmente abierto (*KA5*) auxiliar del contacto principal *KM5* a manera de retención. A partir de este punto, el usuario puede realizar el cambio de sentido de giro o bien detener la operación del motor.

Las conexiones para los módulos del banco en el caso de los diagramas de fuerza y maniobra para otras configuraciones de arranque, bajo esquemas de lógica cableada y programada, se presentan en el *Apéndice A*.

2.3. Esquemas eléctricos del banco de laboratorio

En complemento a la información proporcionada en las secciones anteriores, para las cuales se indicó la distribución física de los elementos del banco de laboratorio al igual que su interconexión modular (cableado) durante las diferentes maniobras de arranque a ser implementadas, se requiere definir la interconexión eléctrica para los elementos del sistema a manera de diagrama esquemático (plano eléctrico).

A partir de ello, la Fig. 18 muestra el esquema eléctrico general de conexiones (realizado en la herramienta de software KiCad) para todos los módulos del banco. Por su parte, la Fig. 19 muestra el detalle para las conexiones del módulo en la selección del tipo de lógica, mientras que las Figs. 20 y 21 se ocupan del detalle para las conexiones de los módulos de lógica cableada y programada, respectivamente. Todo lo anterior, en concordancia con la notación introducida previamente a través de los esquemas de potencia y maniobra presentados en las Figs. 11 y 12.

Figura 18. Plano eléctrico del banco de laboratorio

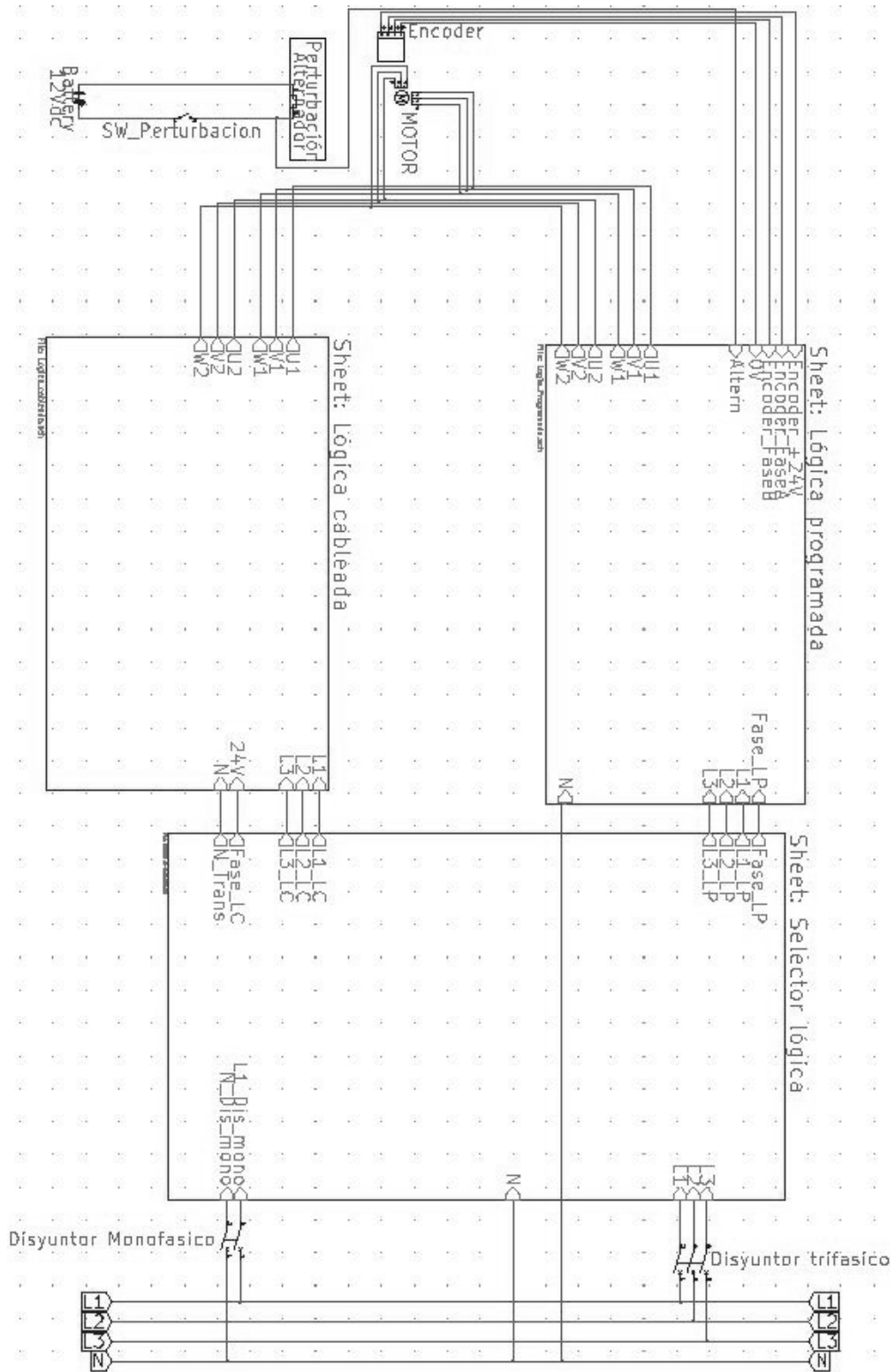


Figura 19. Plano eléctrico para módulo selector de lógica

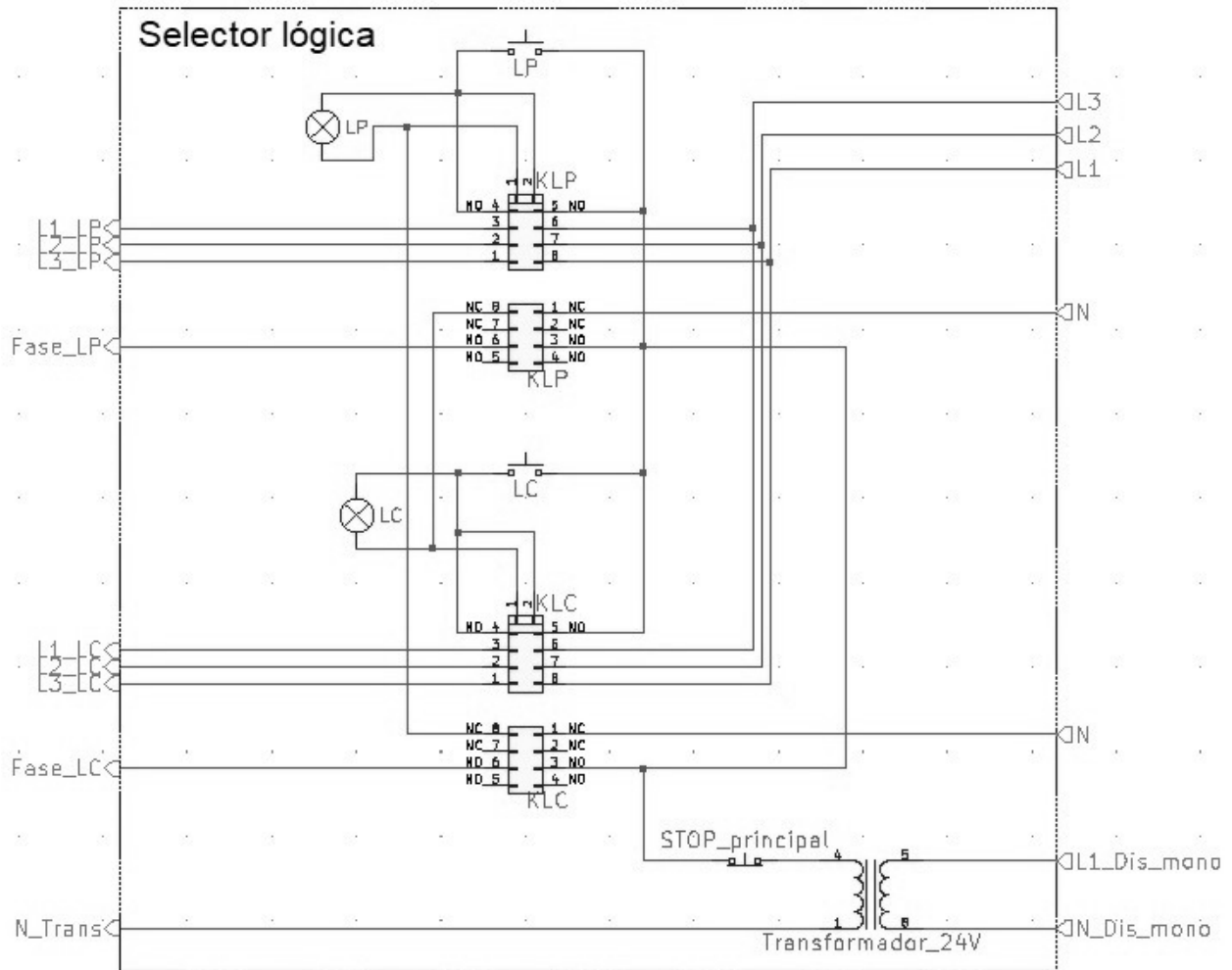


Figura 20. Plano eléctrico para módulo de lógica cableada

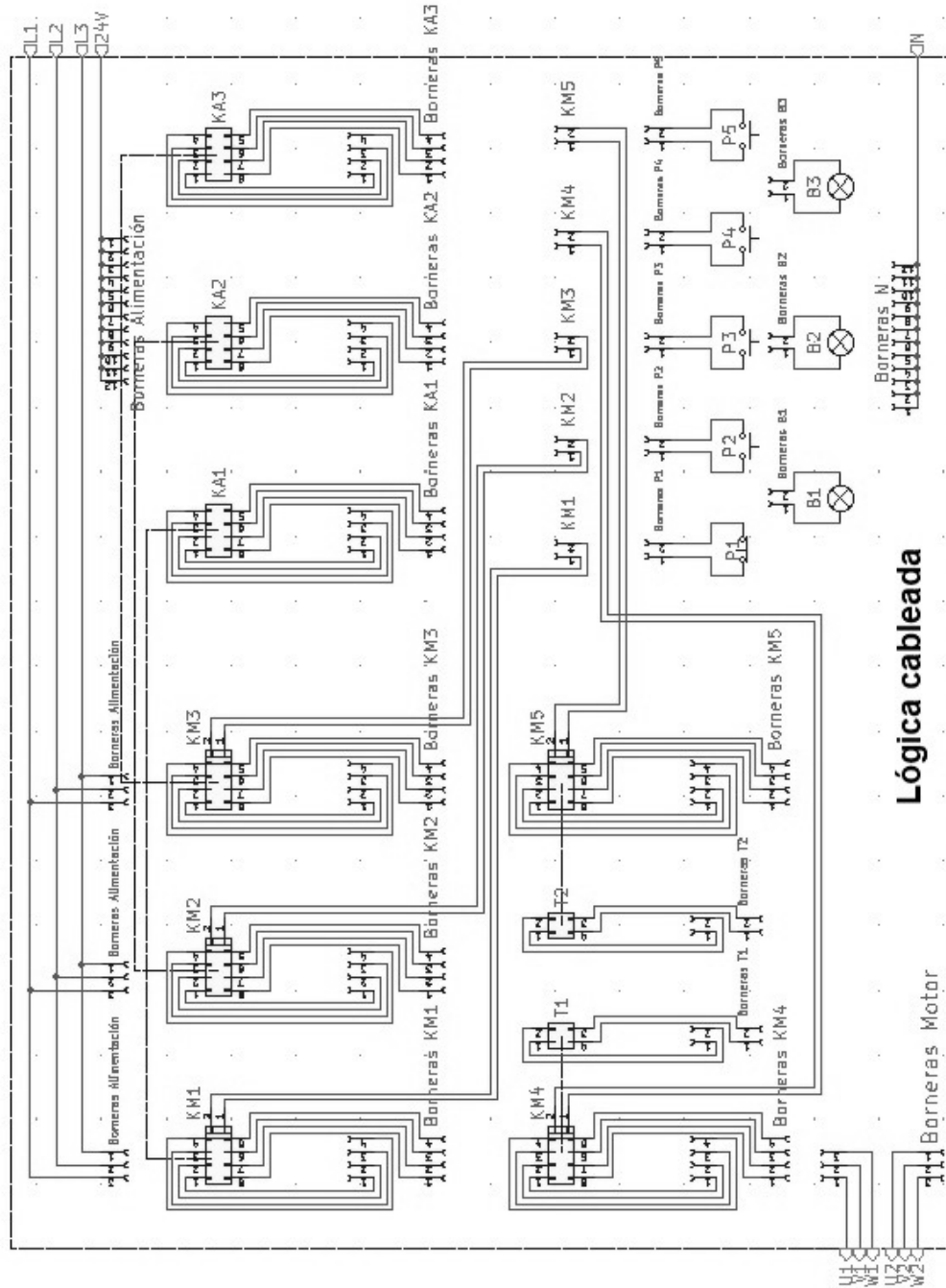
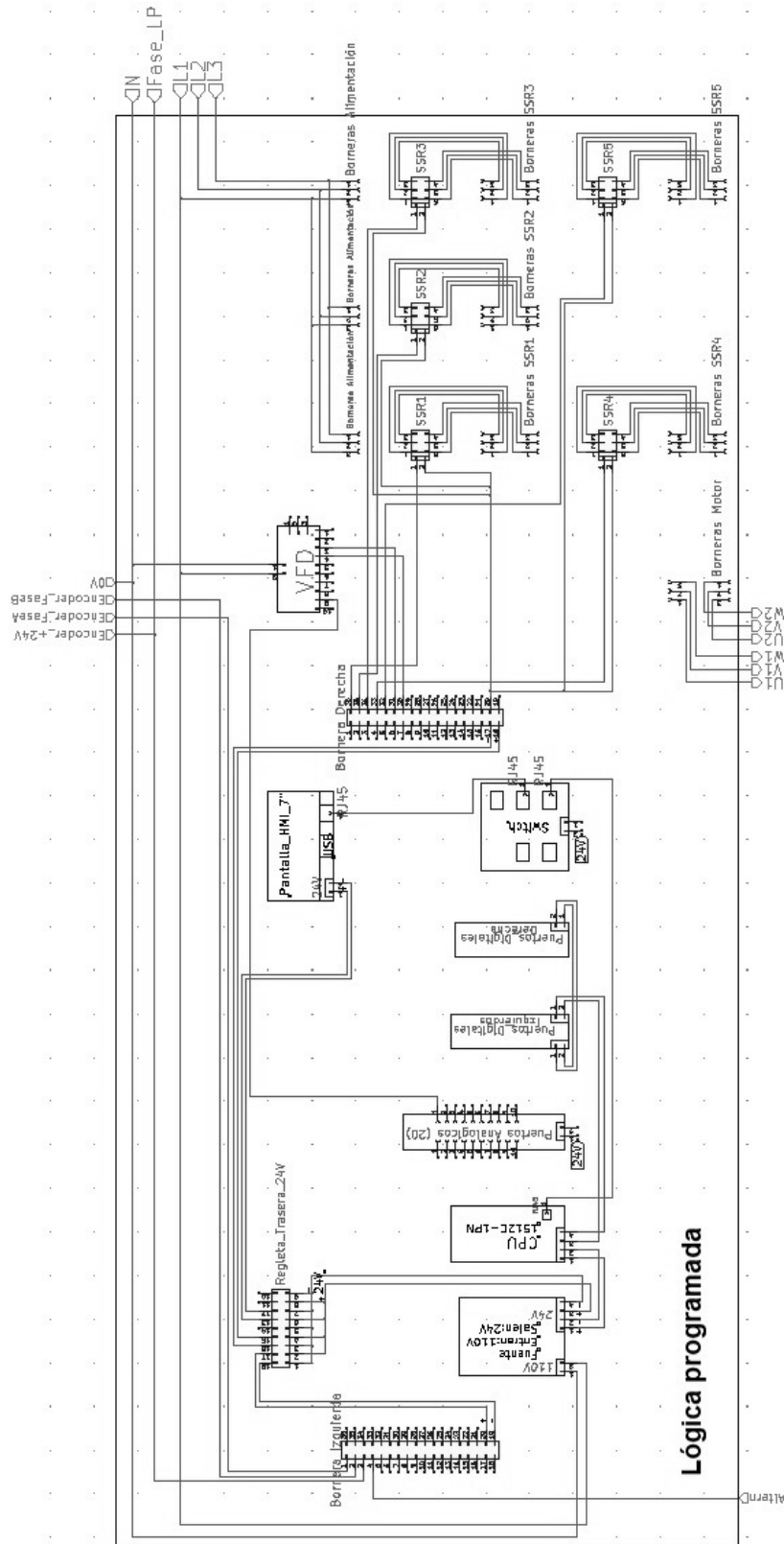


Figura 21. Plano eléctrico para módulo de lógica programada



3. Verificación de operación por simulación

Inicialmente, el presente trabajo de grado fue formulado pensando en la implementación real en laboratorio del banco para arranque de motores.

Sin embargo, como consecuencia de la emergencia sanitaria causada por el virus SARS-CoV-2 (COVID 19) fue necesario redireccionar los alcances del mismo hacia el diseño del prototipo y la validación de sus operaciones en el autómata empleando técnicas de simulación.

De esta manera, el presente *Capítulo* aborda el desarrollo y ejecución para un conjunto de rutinas de simulación en la herramienta *PLC Sim* del entorno integrado *TIA Portal V.14* de SIEMENS, como una manera de ambientar los escenarios de operación para las diferentes maniobras a ser ejecutadas en el banco de laboratorio previamente diseñado.

3.1. Estructura general del simulador

La Fig. 22 ilustra el esquema general para el entorno de simulación que permite verificar numéricamente las maniobras de operación a ser ejecutadas en el prototipo de banco de laboratorio.

Dichas rutinas se complementan con una interfaz que permite para cada caso, ingresar las acciones de entrada y visualizar los efectos de la ejecución de las rutinas mediante indicadores de salida. La Fig. 23 ilustra el menú de bienvenida para dicha interfaz.

Figura 22. Árbol de rutinas para esquema de simulación

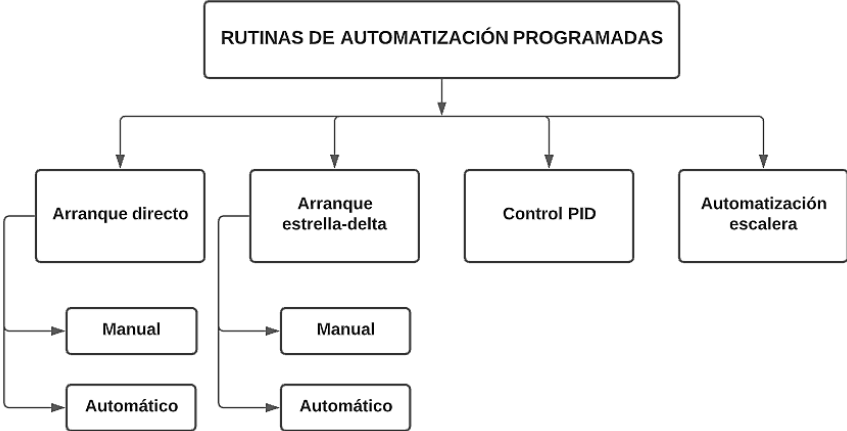


Figura 23. Menú principal para interfaz de simulación



A continuación, se abordará el detalle específico para cada caso.

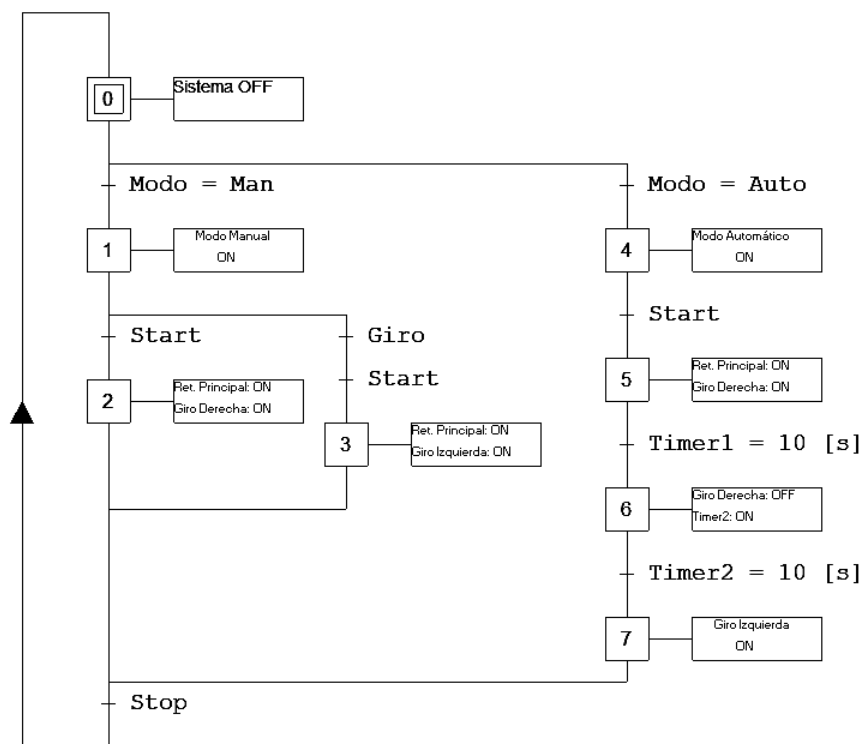
3.1.1. Arranque directo con inversión de giro.

Considerando como base los esquemas de mando y potencia presentados en el *Anexo 1*, se implementa la rutina de automatización para un arranque directo en PLC a través de realizaciones en lógica de contactos programadas en lenguaje escalera (LADDER).

El diagrama de funciones secuenciales (también llamado GRAFCET) para esta maniobra específica se presenta en la Fig. 24. Como se observa, la rutina se subdivide en dos ramas principales: una para operación *manual* y otra para el modo *automático*. La variable modo, define la condición de transición para el flujo de datos a través de las ramas según el tipo de operación.

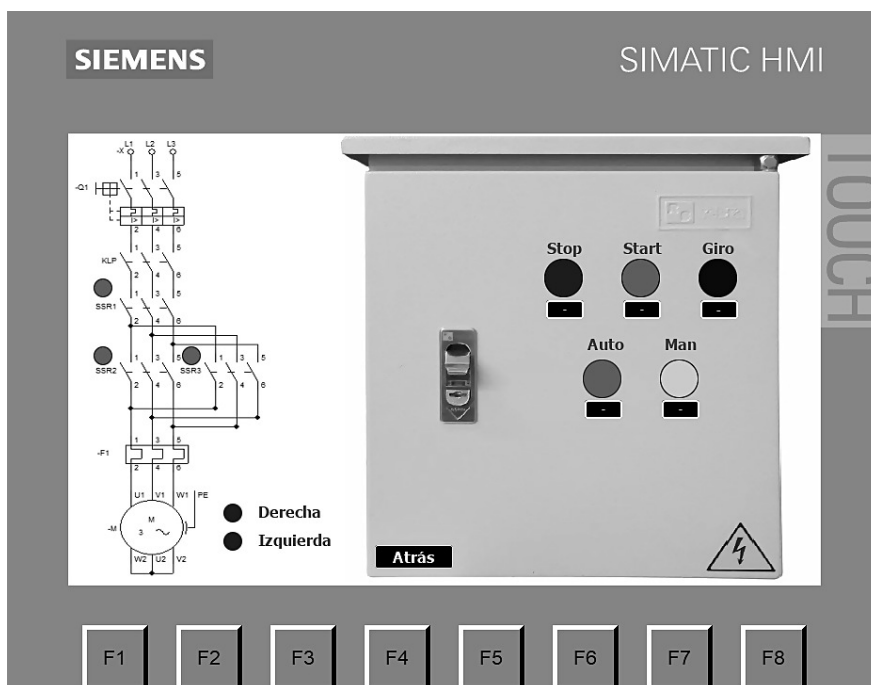
Para el caso del *modo manual*, una vez seleccionado, se activa el indicador luminoso *Man* y el algoritmo queda a la espera que el usuario seleccione el arranque directo en el sentido de giro configurado por defecto (activando *Start*) o bien modificando el sentido de giro (activando en secuencia los pulsadores *Giro* y *Start*). En el primer caso el sistema acciona el contactor de conexión a la línea de alimentación (*SSR1*) y el contactor de sentido de giro a la derecha (*SSR2*). En el segundo, se acciona la conexión de alimentación (*SSR1*) y el contactor de sentido de giro a la izquierda (*SSR3*). En ambos casos, posterior al arranque el algoritmo queda a la espera que el usuario seleccione el parado de la máquina (activando *Stop*).

Figura 24. Diagrama GRAFCET para maniobra de arranque directo con inversión de giro



Ahora bien, para el caso del *modo automático* se activa el indicador luminoso *Auto* y el algoritmo queda a la espera que el usuario seleccione el arranque de la máquina (activando Start). En este caso la secuencia de arranque se realiza a través de intervalos de tiempo, comenzando por un giro a la derecha durante 10 [s] (configurados en la variable Timer1), pasando por una parada del motor durante 10 [s] (configurados en la variable Timer2) y terminando con un giro a la izquierda a tiempo indefinido, hasta que el usuario seleccione el paro de la máquina (activando Stop). Los elementos de potencia empleados para este caso son los mismos que aquellos bajo el modo de operación manual. La interfaz de interacción con el usuario para esta maniobra de arranque se muestra en la Fig. 25.

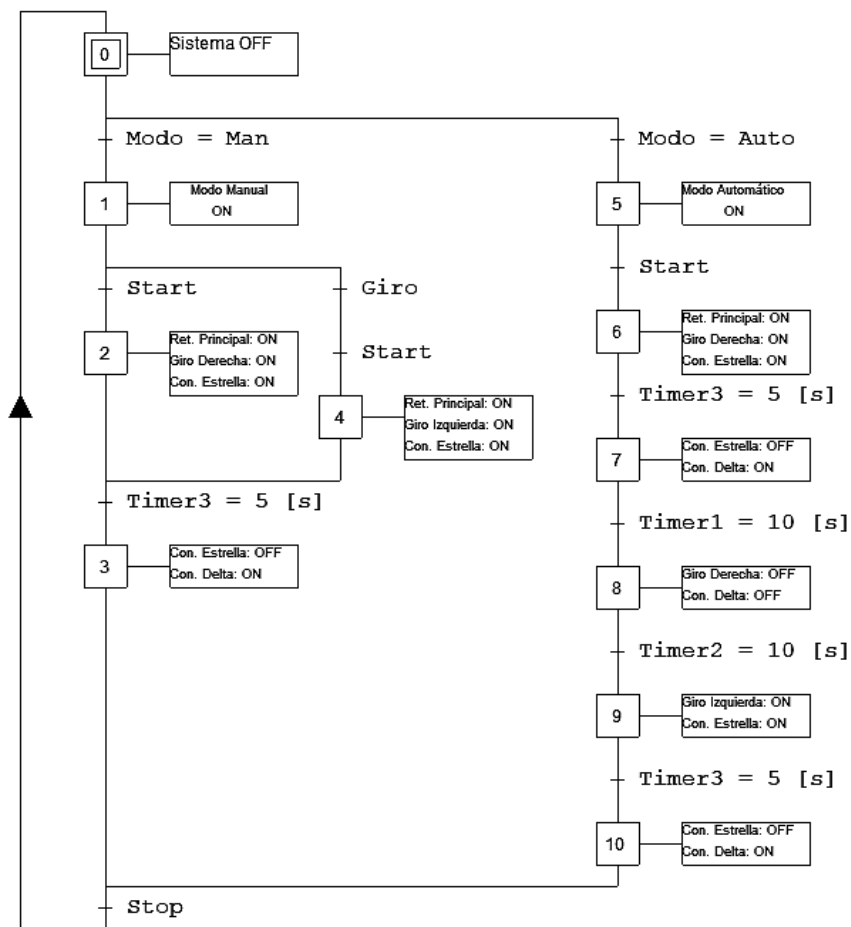
Figura 25. Interfaz HMI para arranque directo con inversión de giro



3.1.2. Arranque estrella-delta con inversión de giro.

Siguiendo un orden lógico similar al presentado en el caso anterior, la Fig. 26 ilustra el diagrama de funciones secuenciales para la maniobra de arranque estrella-delta con inversión de giro.

Figura 26. Diagrama GRAFCET para maniobra de arranque estrella-delta con inversión de giro

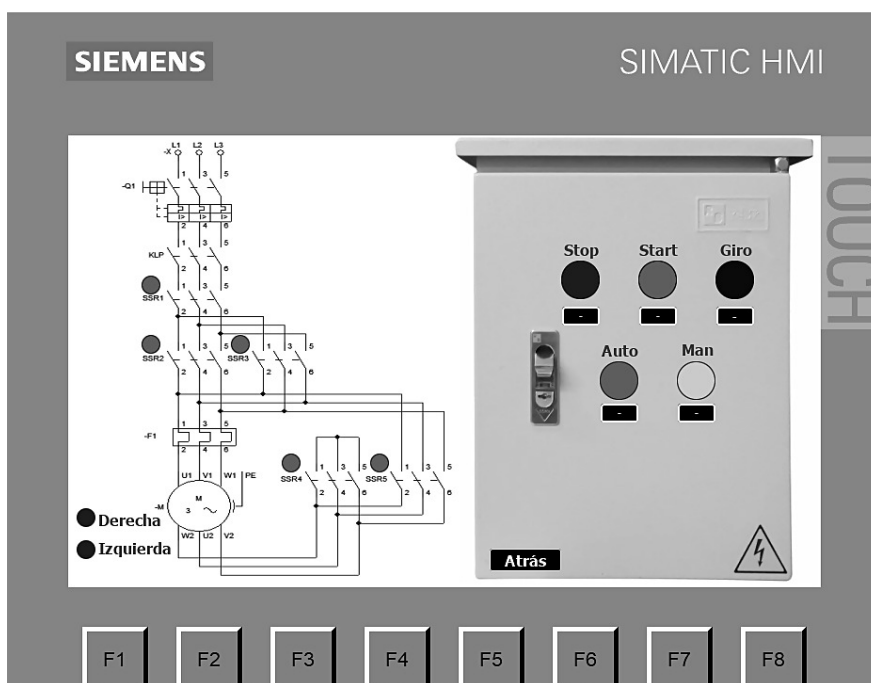


La diferencia fundamental entre esta configuración y la planteada para el caso de un arran-

que directo, está en la inclusión de dos contactores adicionales para realizar la conexión en estrella (*SSR4*) y delta (*SSR5*) del devanado de estator de la máquina. A partir de ello, la operación en *modo manual* adiciona un tiempo de conmutación de 5 [s] (configurados en la variable *Timer3*) entre la conexión inicial en estrella y su paso a conexión delta. De manera similar, la operación en *modo automático* introduce este retardo entre configuraciones de conexión, realizándolo dos veces dependiendo del sentido de giro ejecutado en la secuencia.

La interfaz de interacción con el usuario para esta maniobra de arranque se muestra en la Fig. 27, en la cual el único cambio visible con respecto a la correspondiente para el caso del arranque directo, se aprecia en el esquema de potencia ubicado en la parte izquierda de la imagen.

Figura 27. Interfaz HMI para arranque estrella-delta con inversión de giro



3.1.3. Control PID.

Con el ánimo de incluir elementos de tiempo continuo en la automatización de las maniobras de arranque del motor (complementarios a las rutinas discretas realizadas hasta el momento) se realizó la incorporación de una rutina de regulación de velocidad mediante la estrategia de control *proporcional-integral-derivativo* (PID).

La Fig. 28 muestra el diagrama GRAFCET del esquema lógico implementado para este caso, el cual consta de dos etapas bien diferenciadas: un *arranque suave* por variador de velocidad y el *modo de control PID*. A partir de ello, partiendo desde el reposo la máquina realiza un incremento en su velocidad de modo lineal a partir de una rampa previamente programada en el VFD. Una vez se alcanza la velocidad de referencia (programada en este caso a un valor fijo de 1330 [rpm]) se realiza la activación del regulador PID posterior a 10 [s]. Durante este modo de operación se experimentan perturbaciones manifestadas en cambios del valor medido de velocidad en [rpm]. El proceso se mantiene hasta que el usuario decida detener la máquina activando Stop. Asimismo, la reactivación de operación puede realizarse pulsando Start (o activando en secuencia los pulsadores Giro y Start para el sentido de giro contrario).

La Fig. 29 ilustra la interacción de estados de operación y condiciones de transición de naturaleza discreta con el modo continuo del lazo de regulación PID, constituyendo un autómata híbrido en términos del tipo de variables involucradas.

Figura 28. Diagrama GRAFCET para regulación de velocidad mediante control PID

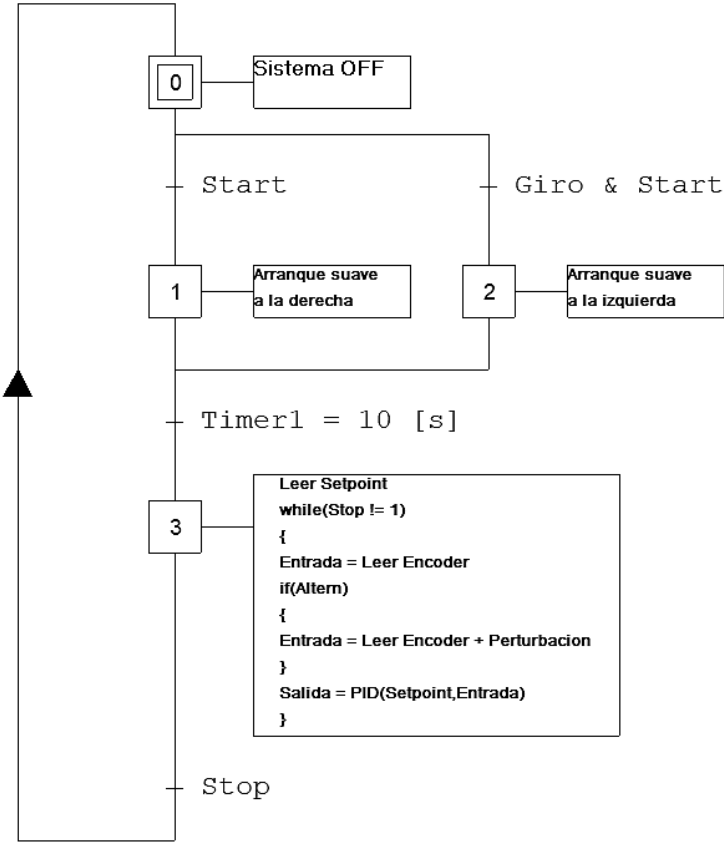
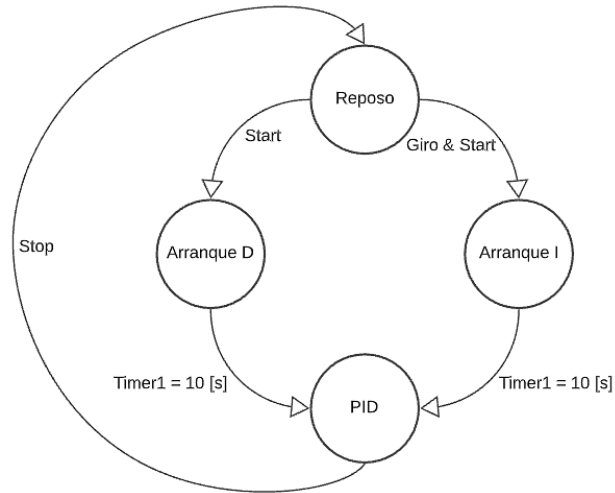


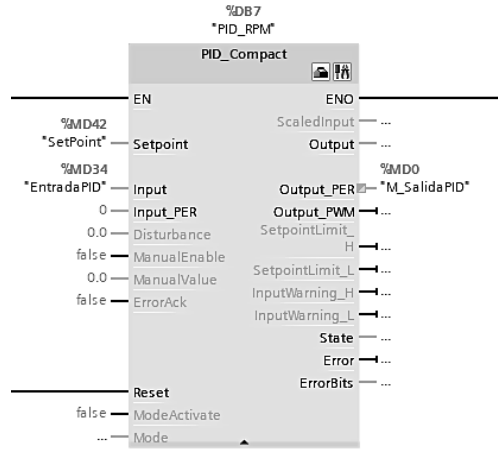
Figura 29. Máquina de estados para operación de control PID



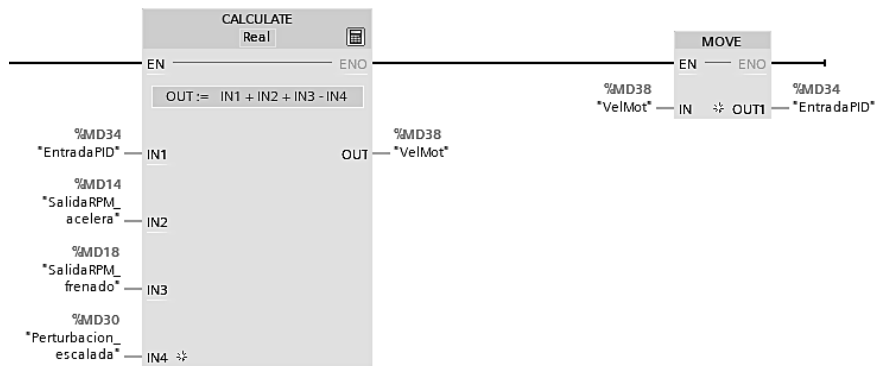
Por su parte, la Fig. 30 muestra los bloques configurados en la herramienta *PLC Sim* para efectuar simulación del lazo de control PID. El bloque principal se denomina *PID_Compact*, al cual se asigna el registro de *referencia* o *set-point* y la correspondiente medida del sensor en la variable *EntradaPID* (*input*). El bloque calcula la señal de control PID entregada en el terminal *M_SalidaPID* (*Output_PER*) hacia el actuador. Otros bloques complementarios incluyen *CALCULATE* empleado para realizar la suma de las señales en el lazo y *MOVE* para asignar la señal de realimentación. El cálculo de los parámetros de control se realiza utilizando la función *autoset*.

A su vez, la Fig. 31 ilustra la interfaz de interacción con el usuario para esta maniobra de regulación.

Figura 30. Bloques funcionales empleados en PLC Sim para lazo de control PID

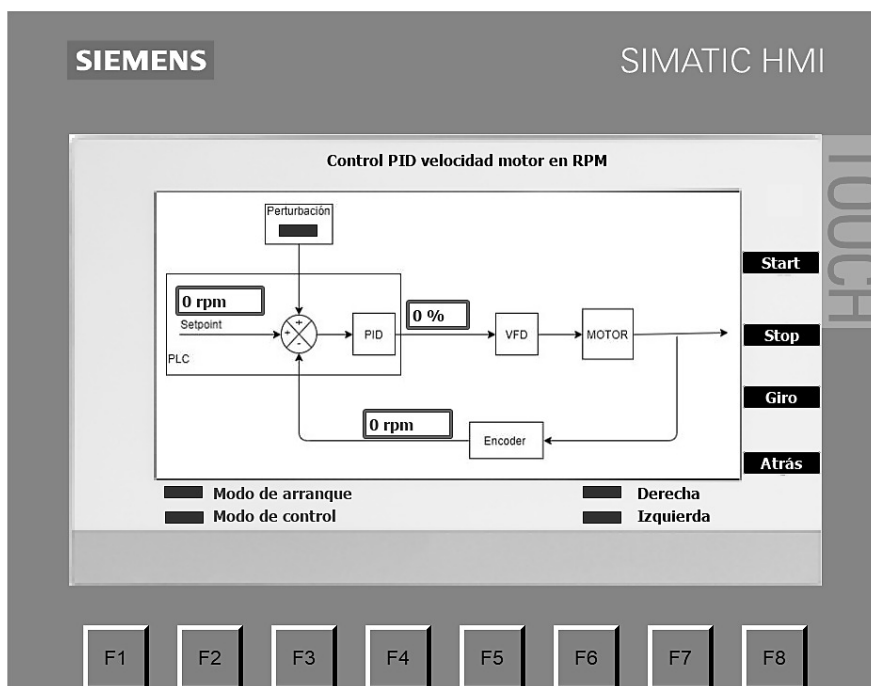


(a) Bloque de función PID



(b) Bloques complementarios

Figura 31. Interfaz HMI para control PID



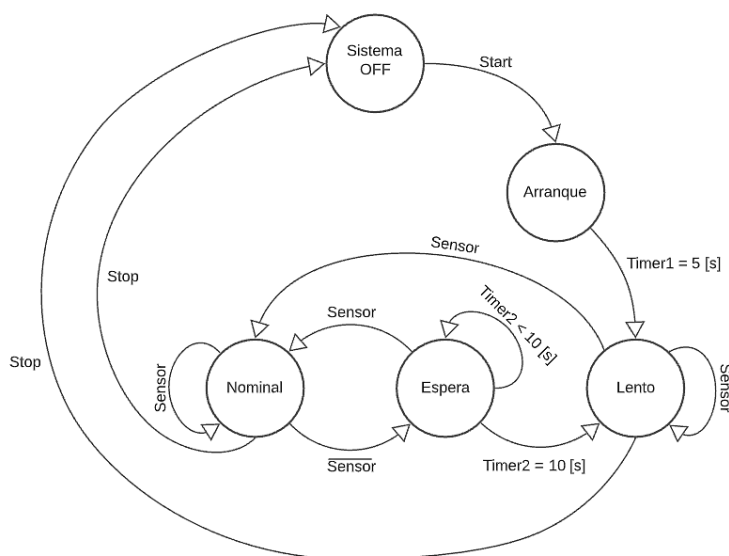
3.1.4. Automatización escalera.

Finalmente, como ejemplo de aplicación de un problema en el mundo industrial se considera la automatización de una escalera eléctrica, y particularmente, el control de su velocidad de reposo y de operación nominal.

Para este propósito, la Fig. 32 incluye el diagrama de estados de la situación que representa la operación de la escalera. Como se observa, el sistema parte con un *arranque suave* que pasa a la condición de *velocidad lenta* y se mantiene allí mientras no se detecte la presencia de un *usuario* a través del *sensor*. De otro lado, al detectarse la presencia de un *usuario* el sistema entra en modo de *velocidad nominal* y lo conserva hasta pasados 10 [s] sin *detección*. En cualquiera de los dos

modos de operación (i.e. *lento* y *nominal*) es posible abortar la operación de la escalera a partir de un *parado de emergencia* pulsando Stop.

Figura 32. Máquina de estados para operación de escalera



Como complemento a lo anterior se propone el diagrama GRAFCET de la Fig. 33, en el cual se brindan detalles específicos de los modos de operación, como por ejemplo las velocidades de referencia y el hecho de ser un bloque de control PID el encargado de garantizar las condiciones de operación ante la presencia de perturbaciones mecánicas representadas por el peso del usuario.

Por su parte, la Fig. 34 ilustra la interfaz de interacción con el autómata.

Las realizaciones en lenguaje LADDER para la correspondiente programación del PLC en cada uno de los casos simulados se presenta en el *Apéndice B*.

Figura 33. Diagrama GRAFCET para automatización de escalera

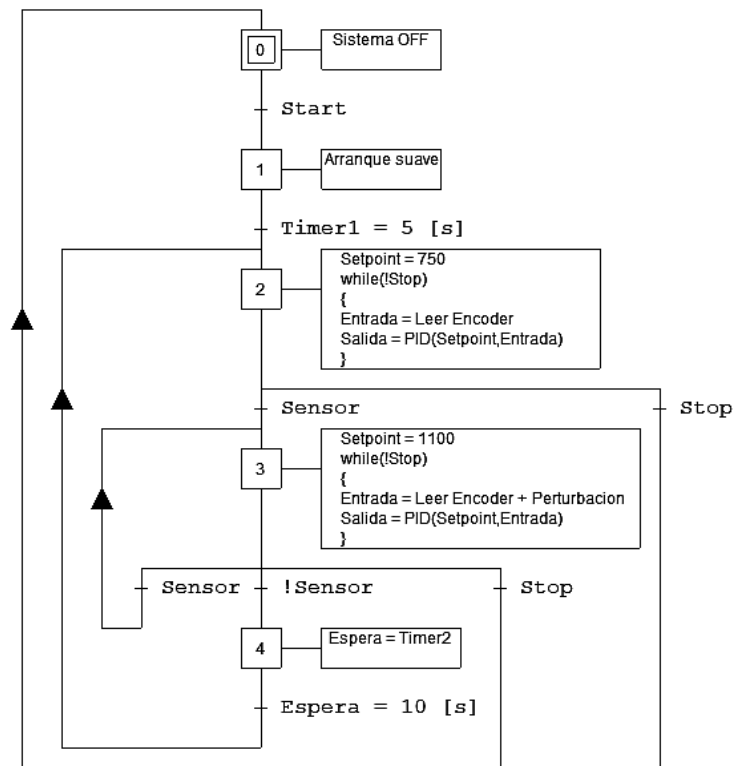
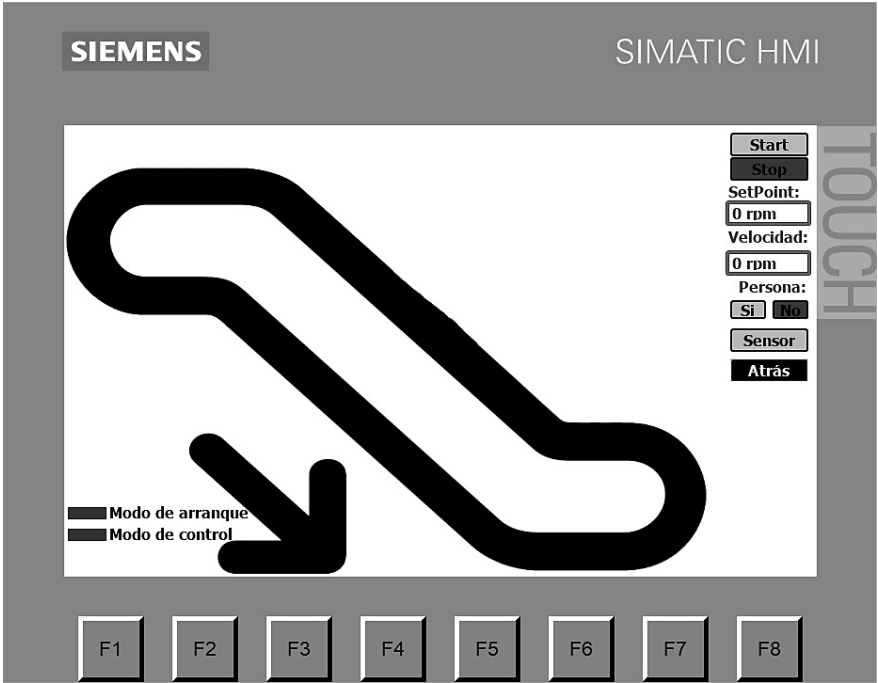


Figura 34. Interfaz HMI para automatización de escalera



4. Conclusiones

A partir de los desarrollos presentados y los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado, es posible enunciar la siguiente conclusión general:

Se diseñó un prototipo de banco de laboratorio para ejecutar accionamiento de motores de inducción empleando un PLC Siemens, a partir de la reutilización y configuración de elementos disponibles en el inventario del *Laboratorio de Control e Instrumentación* de la E3T-UIS, de manera tal que permitieran ejecutar un conjunto básico de maniobras de arranque mediante lógica cableada y programada, y que además facilitaran la verificación experimental para el desempeño de un lazo de control de velocidad mediante un algoritmo PID configurable en el autómata. A falta de una validación experimental de los diseños, se realizaron análisis de simulación para la operación de las rutinas programadas en el PLC.

De manera más puntual:

Se determinó la topología de un banco experimental para el accionamiento de motores eléctricos mediante PLC, que permitió aprovechar elementos disponibles en los laboratorios de la E3T-UIS. Tal y como fue abordado en la *Sección 2.1*, se realizó la descripción de los requerimientos del banco de laboratorio a construir al igual que cada uno de los elementos esenciales para constituirlo. Un aspecto importante en este punto correspondió con la reutilización de elementos

disponibles como parte del inventario del *Laboratorio de Control e Instrumentación de la E3T-UIS*. Otros elementos menores podrán ser adquiridos por un bajo costo. La concepción general del banco de laboratorio se resume en el diagrama de bloques de la Fig. 2.

Se configuraron los elementos del prototipo de manera que permitieran realizar maniobras de arranque en un motor de inducción, tanto por lógica cableada como programada. En particular, la *Sección 2.2* abordó la descripción para la distribución e interconexión física de los elementos en el banco de laboratorio haciendo uso del sentido común para localizar los dispositivos en el espacio de trabajo e ilustrando con detalle la interconexión eléctrica de los diferentes módulos para ejecutar acciones en lógica programada y cableada. A partir de ello, los esquemas de potencia y maniobra para el banco de laboratorio se presentan en las Figs. 11 y 12, respectivamente. Asimismo, detalles específicos para la distribución espacial de componentes se ilustran en las Figs. 13, 14 y 15, mientras que la *Sección 2.3* define los planos de interconexión eléctrica entre componentes.

Se realizaron pruebas de simulación para arranques del tipo: directo, delta-estrella y controlado por variador de velocidad. A partir de la configuración propuesta en la *Subsección 2.2.1* para el arranque estrella-delta con inversión de giro, se evidenció la modularidad del banco de laboratorio diseñado para configurar diferentes maniobras de arranque, tanto en lógica cableada como programada, complementándose en el *Apéndice A* por información similar para otras maniobras de arranque. A su vez, el *Capítulo 3* fue dedicado enteramente al diseño de rutinas de simulación para la verificación de esquemas lógicos de operación en el autómata programable. Principalmente

se destacan los diagramas de funciones secuenciales (GRAFCET) para maniobras de arranque directo con inversión de giro (Fig. 24), de arranque estrella-delta con inversión de giro (Fig. 26), de regulación de velocidad a través de control PID (Fig. 28) y para la automatización de una escalera eléctrica a manera de ejemplo de aplicación industrial (Fig. 33). Dichos esquemas de simulación fueron complementados por realizaciones programadas en lenguaje escalera (LADDER) según presentado en el *Apéndice B*.

Se desarrolló la programación para una interfaz HMI que facilitó la operación del sistema en modos manual y automático. Más precisamente, en la *Subsección 2.1.7* se asumió como parte de la concepción del banco experimental, la inclusión de interfaces de usuario tanto del tipo físico (a través de arreglos de contactores) como virtual (mediante una pantalla táctil). De ellas, el segundo tipo de interfaz fue ampliamente utilizado en las rutinas de simulación desarrolladas en el *Capítulo 3* para recrear la operación de las maniobras programadas en el autómeta y ejecutadas según los estímulos de entrada y los elementos de visualización incluidos para verificar el comportamiento de las variables en los diferentes procesos de prueba.

5. Recomendaciones

Para la correcta utilización del bloque de control PID (PID_Compact) en el lazo de regulación de velocidad, se requieren señales que reflejen la dinámica de las variables de un sistema físico. Lo anterior, no pudo ser realizado en el presente trabajo de grado debido a las limitaciones propias de las herramientas de simulación empleadas, al momento de interactuar con terminales físicos de entrada y salida en el autómata programable.

Por tanto, para mejorar el esquema de simulación propuesto se recomienda la inclusión de un modelo matemático que emule la operación del motor y que por tanto permita analizar con mayor detalle el efecto de regulación proporcionado por el algoritmo PID en el PLC. Esta configuración es comúnmente denominada *hardware-in-the-loop* (HIL).

6. Trabajo futuro

Evidentemente, la acción inmediata que debe ser realizada al momento de superarse la emergencia sanitaria causada por el virus SARS-CoV-2 (COVID 19), corresponde con la implementación real del banco de laboratorio diseñado y la verificación experimental para todas las maniobras de arranque y de regulación de velocidad propuestas.

Referencias Bibliográficas

- Arias, A. M. & Rangel, C. A. (2013). Arranque y frenado del motor de inducción y de corriente continua de excitación independiente. control mediante PLC. Trabajo de grado (ingeniero electricista), Bucaramanga - Colombia.
- Camacho, D. (2019). Instalación y puesta en marcha de un sensor de flujo industrial SIEMENS en el Laboratorio de Control e Instrumentación de la E3T-UIS. Trabajo de grado (ingeniero electrónico), Bucaramanga - Colombia.
- Gaguancela, X. & Layedra, G. (2011). Dotación y aplicación de un módulo con variador de velocidad para simulación de control de arranque y velocidad del motor de una grúa para el laboratorio de control industrial. Trabajo de grado (ingeniero de mantenimiento), Chimborazo - Ecuador.
- Gómez, P. A. (2018). Estrategia para la implementación de un controlador basado en lógica difusa en un PLC. Trabajo de grado (ingeniero en control, Bogotá - Colombia.
- Muñoz, S. F., Guarín, D. F., & Sarmiento, G. R. (2013). Instrumentación y control de velocidad para un motor de corriente alterna en el laboratorio de control e instrumentación de la E3T-UIS. Trabajo de grado (ingeniero electrónico e ingeniero electricista), Bucaramanga - Colombia.
- Piñero, J. (2015). Control de un motor de inducción usando un variador de frecuencia. Trabajo de grado (ingeniero en tecnologías de telecomunicación), Sevilla - España.

- Rincón, E. A., Gómez, C. D., & Prada, A. F. (2016). Banco de pruebas dinámico para arrancadores de un motor de inducción trifásico para prácticas de laboratorio mediante el software LABVIEW. Trabajo de grado (ingeniero electricista), Bucaramanga - Colombia.
- Robles, I. A. & Galvis, J. A. (2018). Instrumentación y puesta en marcha de un sistema de tanques rectangulares para realizar el control de nivel empleando el PLC COMPACT-LOGIX 1769-L32E. Trabajo de grado (ingeniero electrónico), Bucaramanga - Colombia.
- Roldán, J. (2012). *Tecnología y circuitos de aplicación de neumática, hidráulica y electricidad*. Paraninfo, Madrid - España.
- Sanabria, E. & Sánchez, D. (2016). Sistema de control de velocidad de un motor trifásico mediante un variador de frecuencia y sistema SCADA. Trabajo de grado (ingeniero mecatrónico), Pereira - Colombia.
- Taipanta, R. (2011). Implementación de un módulo didáctico para el control de motores trifásicos utilizando el variador de velocidad Micromaster 4. Trabajo de grado (tecnólogo en electrónica), Latacunga - Ecuador.

Apéndice A. Esquemas de conexión para maniobras de arranque

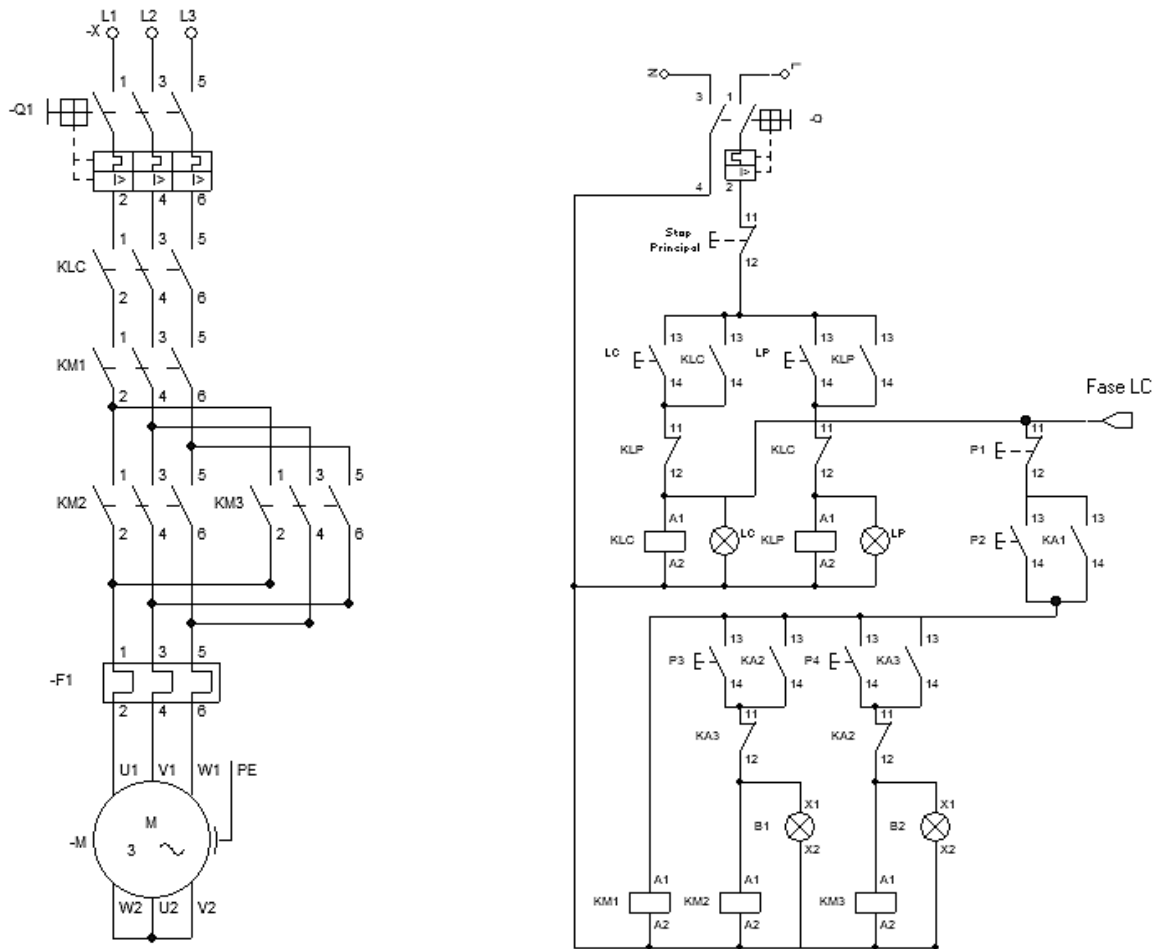
En complemento a los desarrollos presentados en el *Capítulo 2* para la maniobra de arranque del tipo *estrella-delta* mediante lógica cableada, el presente *Apéndice* aborda la configuración de los esquemas de mando y potencia para las demás estrategias a ser implementadas en el banco de laboratorio diseñado. En particular y según presentado a continuación, dichas maniobras corresponden con: 1) arranque *directo* con inversión de giro por lógica cableada, 2) arranque *suave* con variador de frecuencia, 3) esquema de control PID sometido a perturbaciones, 4) arranque *directo* con inversión de giro por PLC y 5) arranque *estrella-delta* con inversión de giro por PLC.

Arranque directo con inversión de giro por lógica cableada

La Fig. 35 presenta los esquemas de potencia y maniobra para la configuración de los módulos del banco de laboratorio durante un arranque del tipo *directo con inversión de giro por lógica cableada*. Para constituir este arranque se requieren:

- Cuatro contactores principales (*KLC, KM1, KM2, KM3*);
- Tres contactores auxiliares (*KA1, KA2 y KA3*) acoplados mecánicamente a tres contactores principales (*KM1, KM2 y KM3*);
- Dos pulsadores normalmente cerrados (*Stop Principal y P1*);
- Cinco pulsadores normalmente abiertos (*LC, LP, P2, P3 y P4*);
- Cuatro indicadores luminosos (*LC, LP, B1 y B2*);

Figura 35. Configuración para arranque directo con inversión de giro por lógica cableada



- Protecciones para circuitos de potencia y maniobra.

Es de notar que a pesar de tratarse de un montaje en *lógica cableada*, se consideran también elementos de configuración para la *lógica programada* (*KLP* y *LP*) debido a que forman parte integral del *módulo selector del tipo de lógica*. Con lo anterior se asegura que bajo ninguna circunstancia se ejecuten simultáneamente maniobras cableadas y programadas, previniendo el deterioro de los equipos.

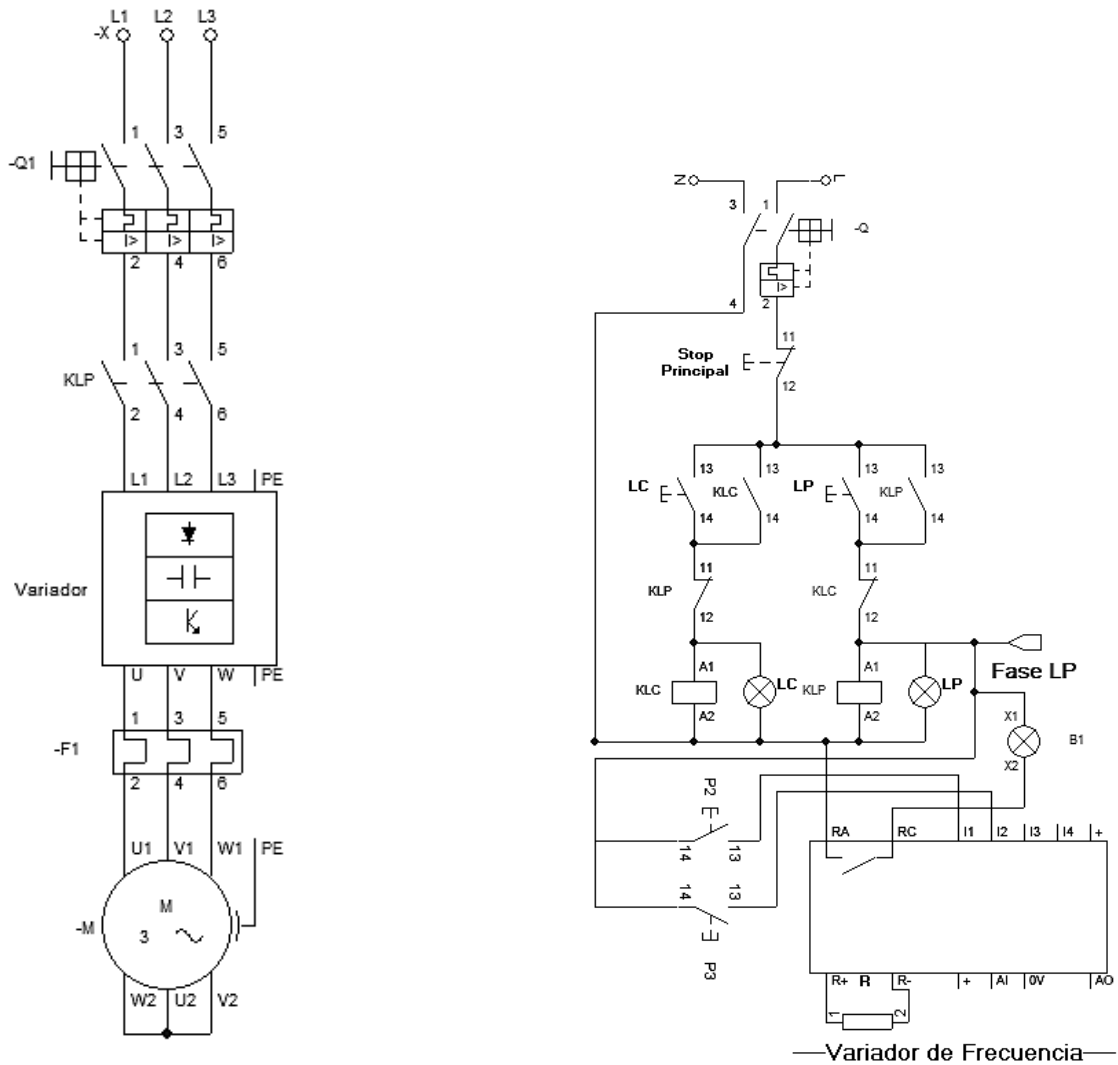
Adicionalmente, a través del uso de contactos auxiliares normalmente cerrados (*KA2* y *KA3*) el sentido de giro podrá modificarse únicamente después de efectuar el paro de la máquina.

Arranque suave con variador de frecuencia

La Fig. 36 presenta los esquemas de potencia y maniobra para la configuración de los módulos del banco de laboratorio durante un arranque *suave con variador de frecuencia*. Para constituir este arranque se requieren:

- Un contactor principal (*KLP*);
- Cuatro pulsadores normalmente abiertos (*LC*, *LP*, *P2* y *P3*);
- Un pulsador normalmente cerrado (*Stop Principal*);
- Tres indicadores luminosos (*LC*, *LP* y *BI*). Para este caso *BI* indicará la acción de puesta en marcha;

Figura 36. Configuración para arranque suave con variador de frecuencia



(a) Esquema de potencia

(b) Esquema de maniobra

- Un resistor de frenado;
- Un variador de frecuencia, al cual se conecta el resistor de frenado y dos pulsadores (*P2* y *P3*) como entradas digitales para activar las tareas de marcha (directa e inversa) y paro;
- Protecciones para circuitos de potencia y maniobra.

Para configurar este arranque no es necesario emplear un PLC. En su lugar, se aprovechan las rampas de arranque programadas en el variador de frecuencia.

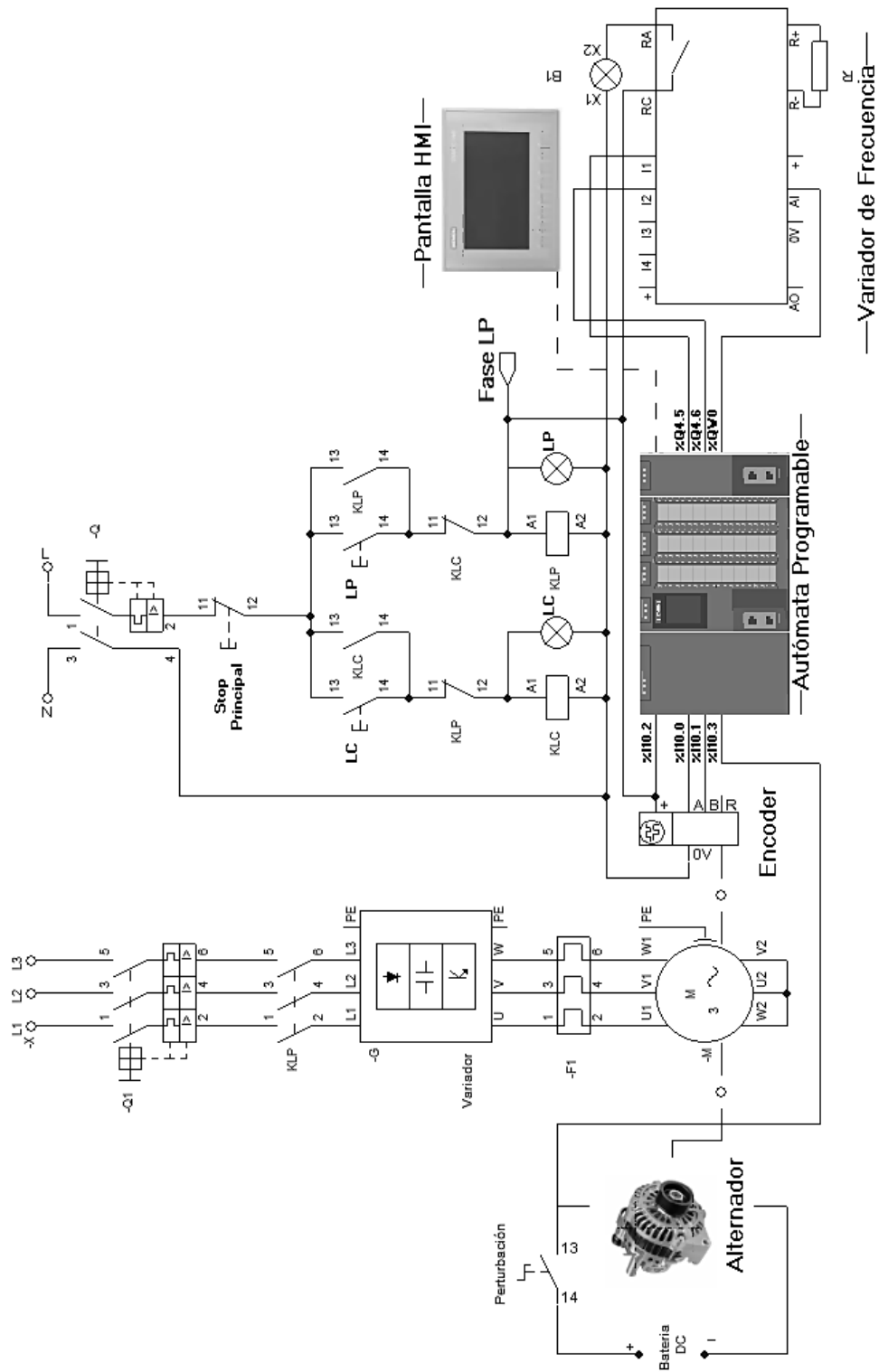
La combinación de un PLC con un variador de frecuencia se hace útil en la regulación de la velocidad de la máquina, según mostrado a continuación.

Esquema de control PID sometido a perturbaciones

La Fig. 37 presenta los esquemas de potencia y maniobra para la configuración de los módulos del banco de laboratorio durante la regulación de velocidad del motor empleando un *esquema PID*. Para constituir este lazo se requieren:

- Un contactor principal (*KLP*);
- Un pulsador normalmente cerrado (*Stop Principal*);
- Dos pulsadores normalmente abiertos (*LC* y *LP*);

Figura 37. Configuración para lazo de control PID



- Tres indicadores luminosos (*LC*, *LP* y *BI*). Para este caso *BI* indicará la acción de puesta en marcha;
- Un variador de frecuencia;
- Un resistor de frenado;
- Un codificador de pulsos (encoder);
- Un mecanismo de perturbación (alternador);
- Un PLC;
- Una pantalla táctil para interacción con el usuario (HMI);
- Protecciones para circuitos de potencia y maniobra.

Es de notar que a pesar de tratarse de un montaje en *lógica programada*, se consideran también elementos de configuración para la *lógica cableada* (*KLC* y *LC*) debido a que forman parte integral del *módulo selector del tipo de lógica*.

Asimismo, se observa que el mando del *variador de frecuencia* se realiza desde el PLC a través de una salida analógica. De manera similar, el *encoder* se conecta a contadores rápidos en el PLC mientras que la *perturbación* es detectada mediante una entrada digital en el mismo dispositivo.

Por tanto, la programación del autómatas por parte del usuario permitirá realizar una gestión apropiada para dichas señales de entrada y salida en términos de una correcta operación del control de velocidad.

Arranque directo con inversión de giro por PLC

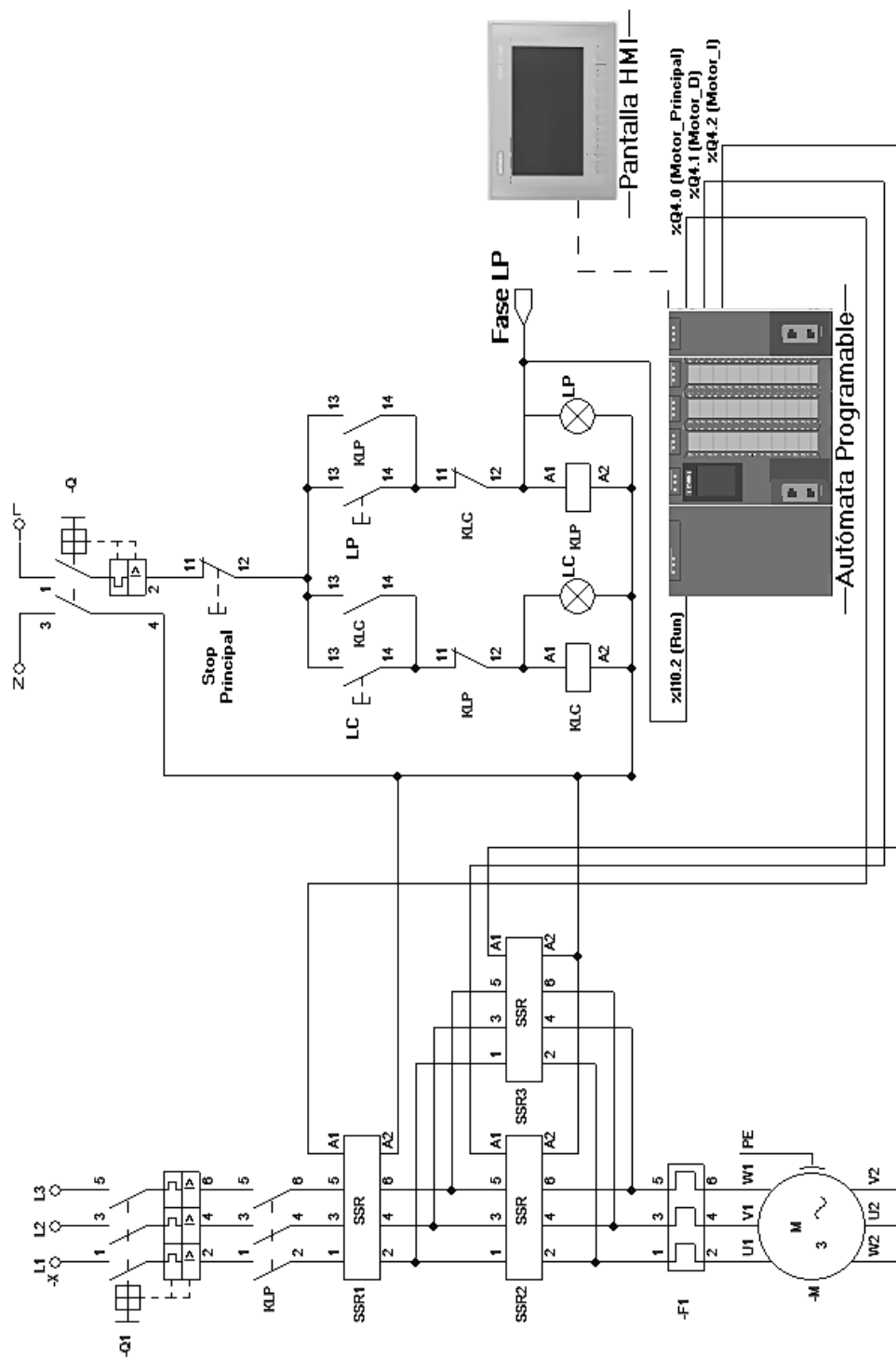
La Fig. 38 presenta los esquemas de potencia y maniobra para la configuración de los módulos del banco de laboratorio durante un arranque *directo con inversión de giro usando un PLC*.

Para constituir este arranque se requieren:

- Tres relés de estado sólido (*SSR1, SSR2, SSR3*);
- Un contactor principal (*KLP*);
- Un pulsador normalmente cerrado (*Stop Principal*);
- Dos pulsadores normalmente abiertos (*LC, LP*);
- Dos indicadores luminosos (*LC, LP*);
- Un PLC;
- Una pantalla táctil para interacción con el usuario (HMI);
- Protecciones para circuitos de potencia y maniobra.

Arranque estrella-delta con inversión de giro por PLC

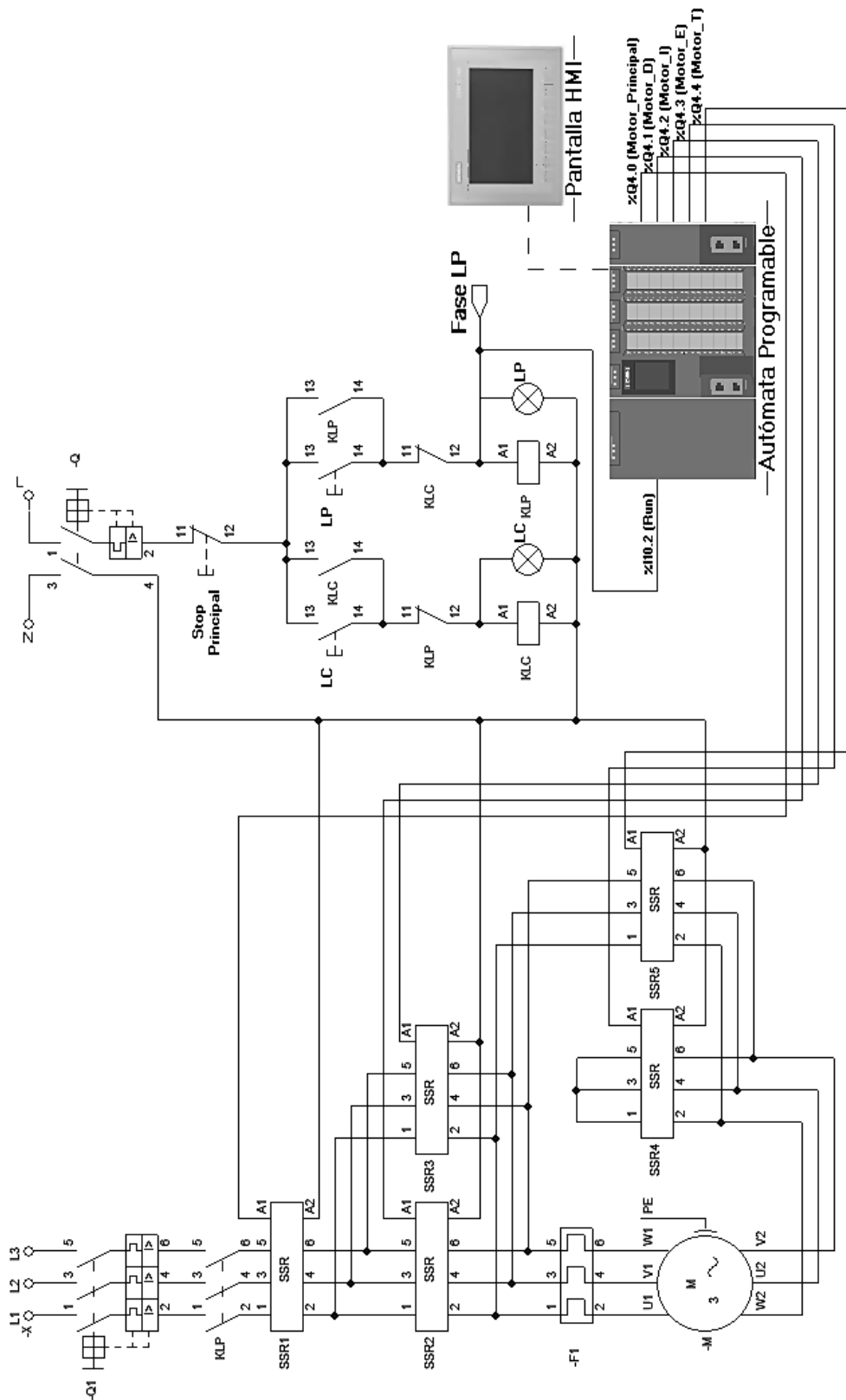
Figura 38. Configuración para arranque directo con inversión de giro usando un PLC



La Fig. 39 presenta los esquemas de potencia y maniobra para la configuración de los módulos del banco de laboratorio durante un arranque *estrella-delta con inversión de giro usando un PLC*. Para constituir este arranque se requieren:

- Cinco relés de estado sólido (*SSR1, SSR2, SSR3, SSR4 y SSR5*);
- Un contactor principal (*KLP*);
- Un pulsador normalmente cerrado (*Stop Principal*);
- Dos pulsadores normalmente abiertos (*LC, LP*);
- Dos indicadores luminosos (*LC, LP*);
- Un PLC;
- Una pantalla táctil para interacción con el usuario (*HMI*);
- Protecciones para circuitos de potencia y maniobra.

Figura 39. Configuración para arranque *estrella-delta* con inversión de giro usando un PLC



Apéndice B. Rutinas programadas en LADDER

A continuación se presentan las rutinas codificadas en lenguaje escalera (LADDER) para las diferentes maniobras de arranque de motores simuladas en la herramienta *PLC Sim*, como estrategia de verificación de operación para el banco de laboratorio diseñado.

Arranque directo con inversión de giro

En las Figs. 40, 41, 42 y 43 se presentan los diagramas correspondientes a la programación realizada para el caso del *arranque directo con inversión de giro*, ilustrando respectivamente las rutinas para: 1) la asignación de memoria, 2) la inicialización del arranque, 3) la inversión de giro en los modos manual y automático y 4) la operación del botón Stop.

Figura 40. Asignación de memorias para el arranque *directo*

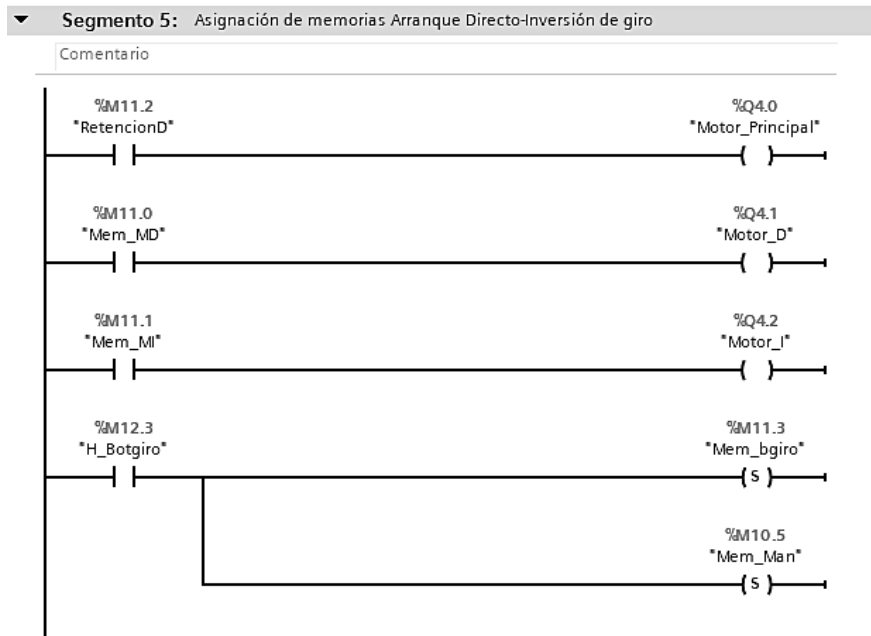
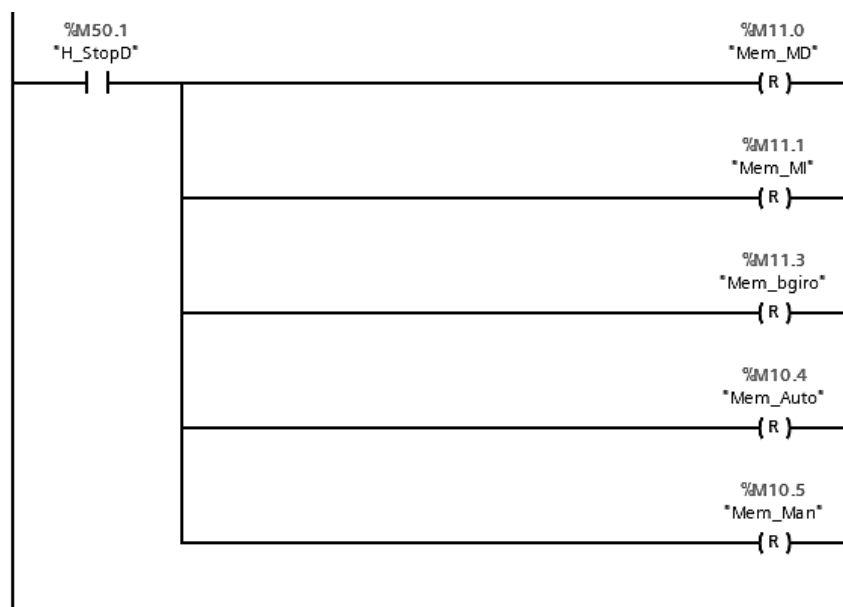


Figura 43. Funcionamiento Stop *directo*

Arranque estrella-delta con inversión de giro

En las Figs. 44, 45, 46, 47, 48, 49 y 50 se presentan los diagramas correspondientes a la programación realizada para el caso del *arranque estrella-delta con inversión de giro*, ilustrando respectivamente las rutinas para: 1) la asignación de memoria, 2) la operación de los botones Automático/Manual/Giro, 3) inicialización del arranque, 4) el arranque hacia la derecha, 5) la inversión de giro en los modos *manual* y *automático*, 6) el arranque hacia la izquierda y 7) la operación del botón Stop.

Control PID

En las Figs. 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60 y 61 se presentan los diagramas correspondientes a la programación realizada para el caso del *control PID*, ilustrando respectivamente las

Figura 44. Asignación de memorias para el arranque *estrella-delta*

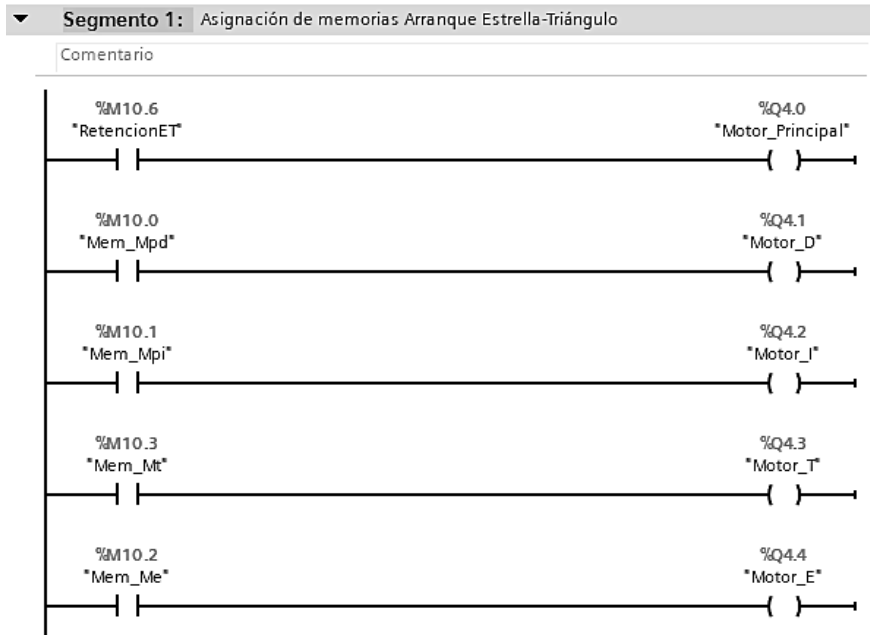


Figura 45. Funcionamiento de los botones Automático, Manual y Giro

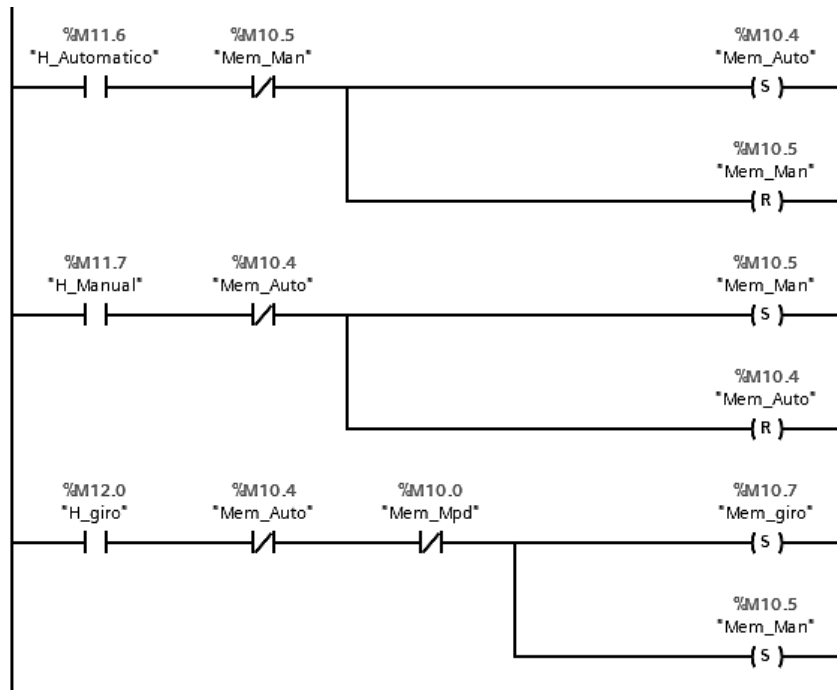


Figura 46. Inicialización del arranque *estrella-delta*

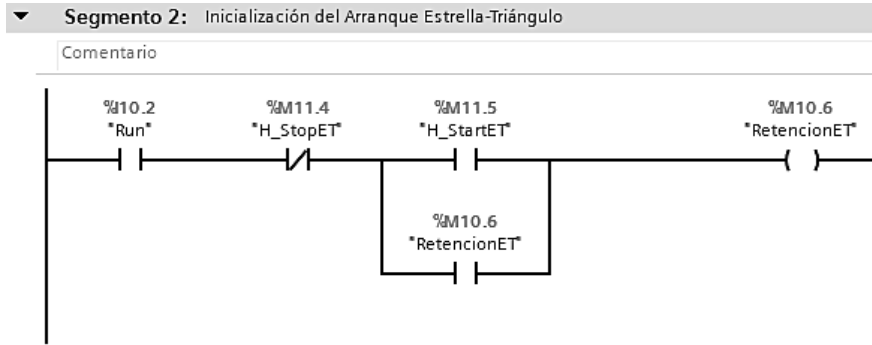


Figura 47. Arranque *estrella-delta* hacia la derecha

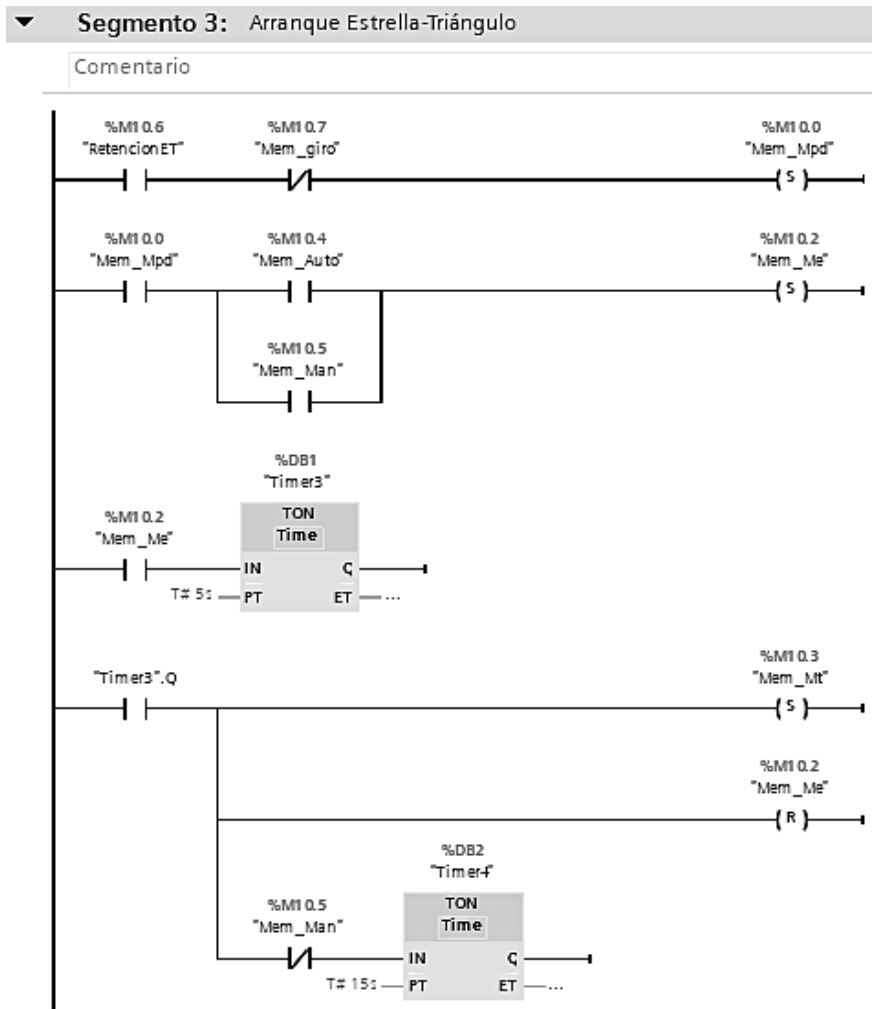


Figura 48. Inversión de giro modo *automático* (primera rama) y modo *manual* (segunda rama)

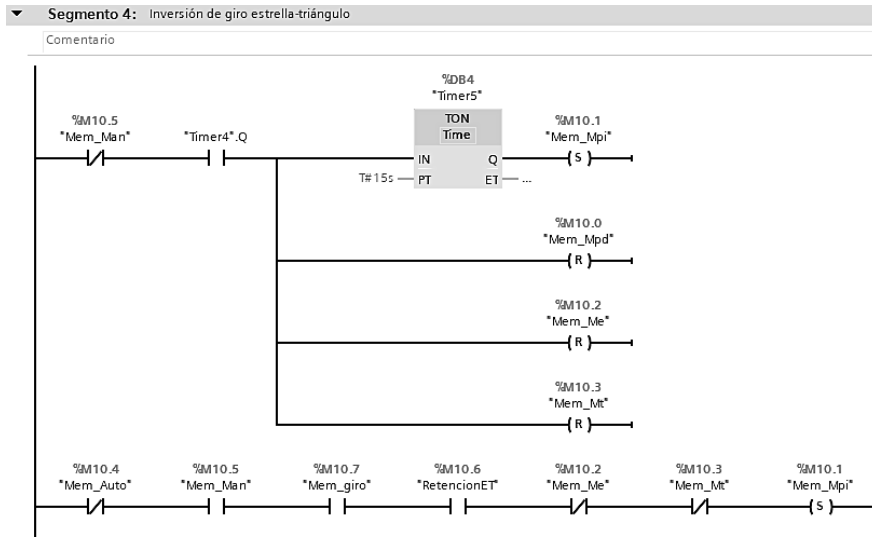


Figura 49. Arranque *estrella-delta* hacia la izquierda

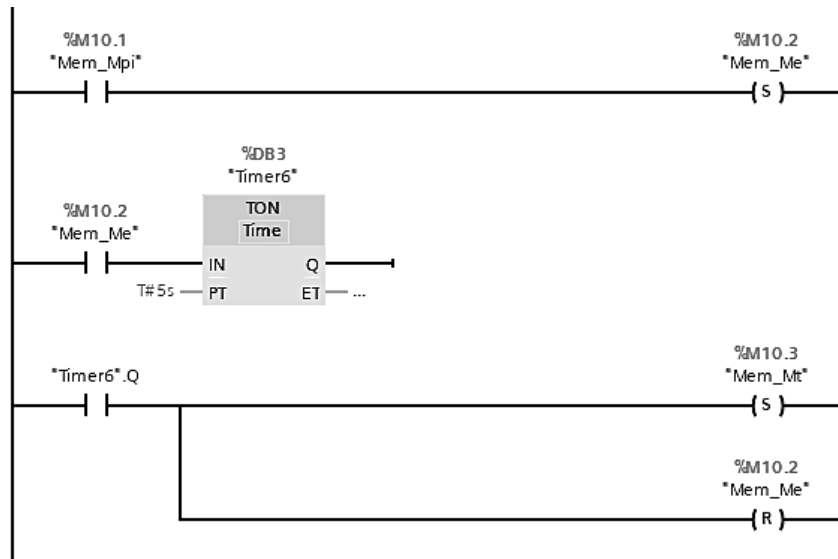
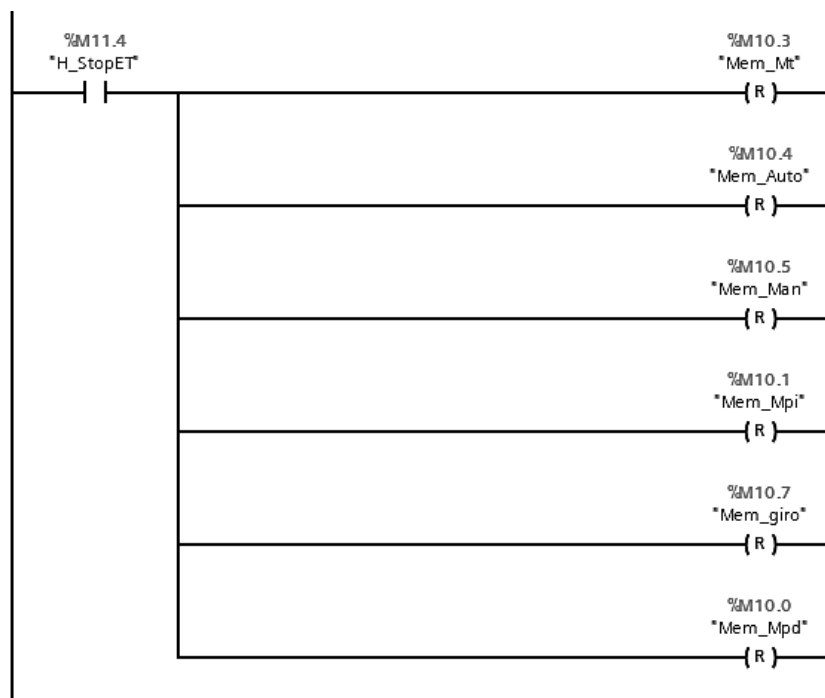


Figura 50. Funcionamiento Stop *estrella-delta*

rutinas para: 1) el ajuste de la variable de salida PID, 2) el ajuste de la variable de perturbación, 3) la realimentación del lazo en modo de *arranque*, 4) la realimentación del lazo en modo de *control*, 5) la realimentación del lazo en *paro de máquina*, 6) los límites de variables, 7) la asignación de memoria, 8) la operación de los botones Stop/Giro, 9) la inicialización del control PID, 10) la operación en modos de *giro/control/arranque* y 11) los modos de perturbación.

Automatización escalera

En las Figs. 62, 63, 64, 65 y 66 se presentan los diagramas correspondientes a la programación realizada para el caso de la *automatización de una escalera eléctrica*, ilustrando respectivamente las rutinas para: 1) el funcionamiento de los modos de *control* y *arranque*, 2) el comporta-

Figura 51. Ajuste de variable M_SalidaPID

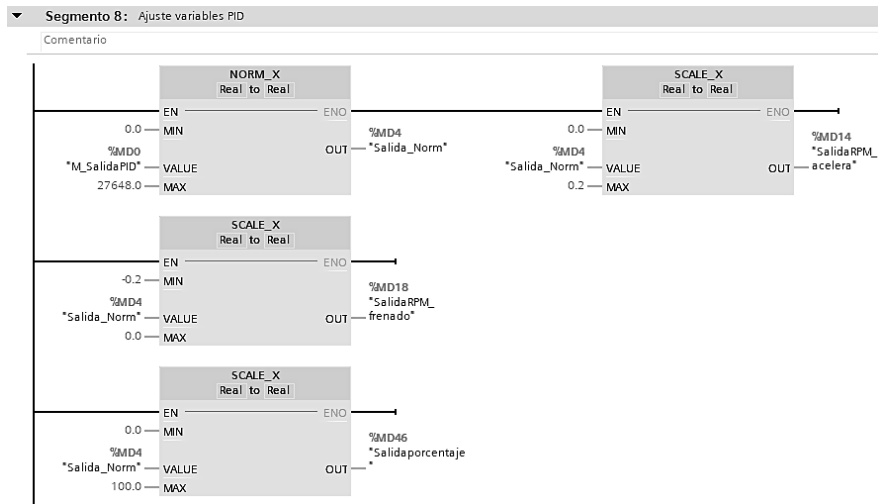


Figura 52. Ajuste de variable PerturbacionRPM

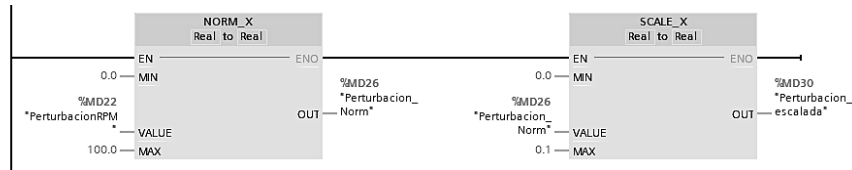


Figura 53. Realimentación de lazo en modo arranque

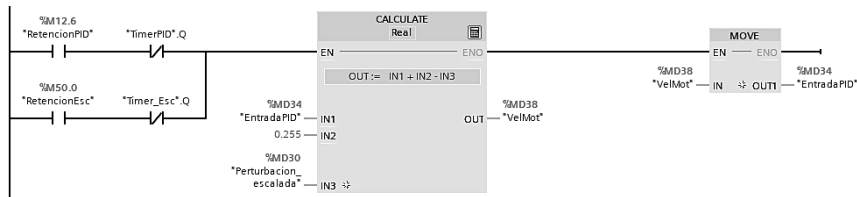


Figura 54. Realimentación de lazo en modo control

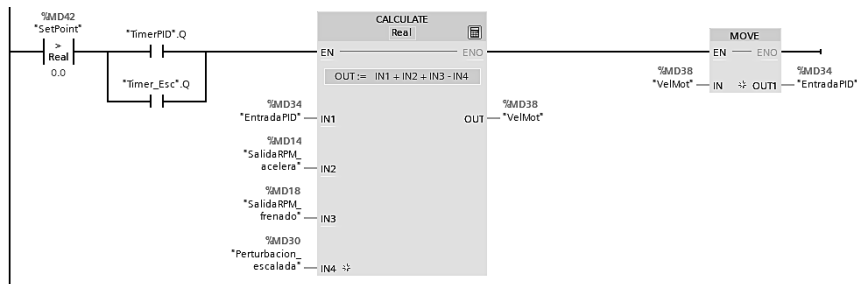


Figura 55. Realimentación de lazo en paro de máquina

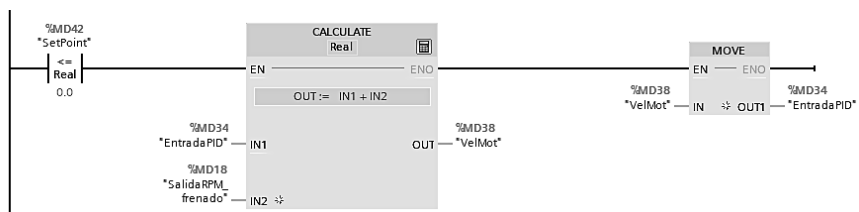


Figura 56. Límites de variables: EntradaPID, Setpoint y M_salidaPID

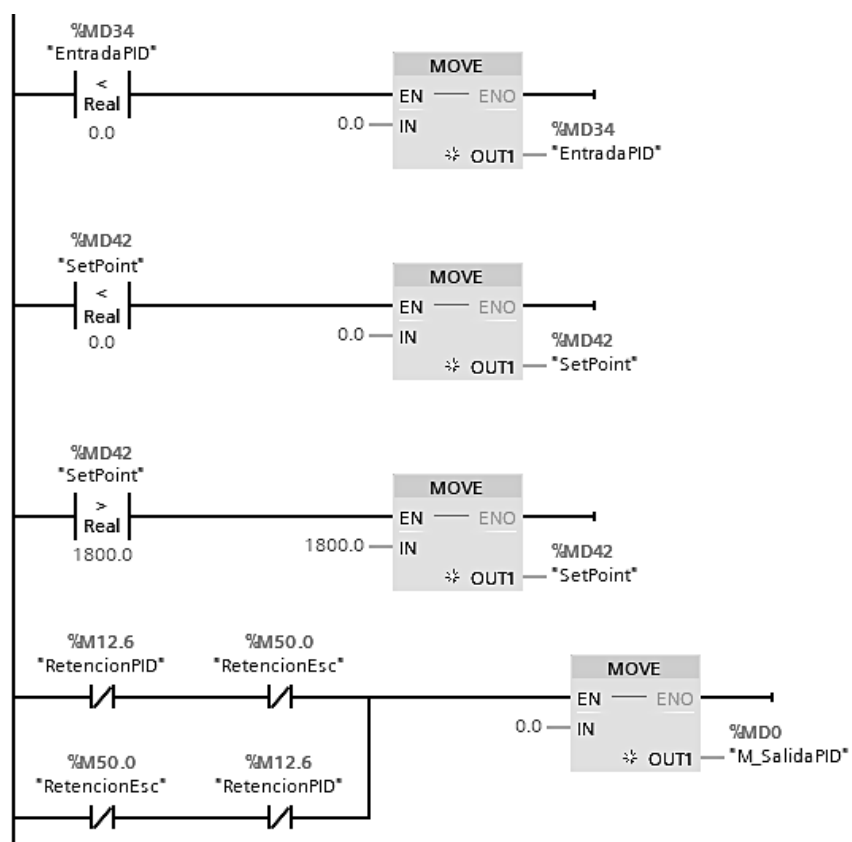


Figura 57. Asignación de memoria para control PID

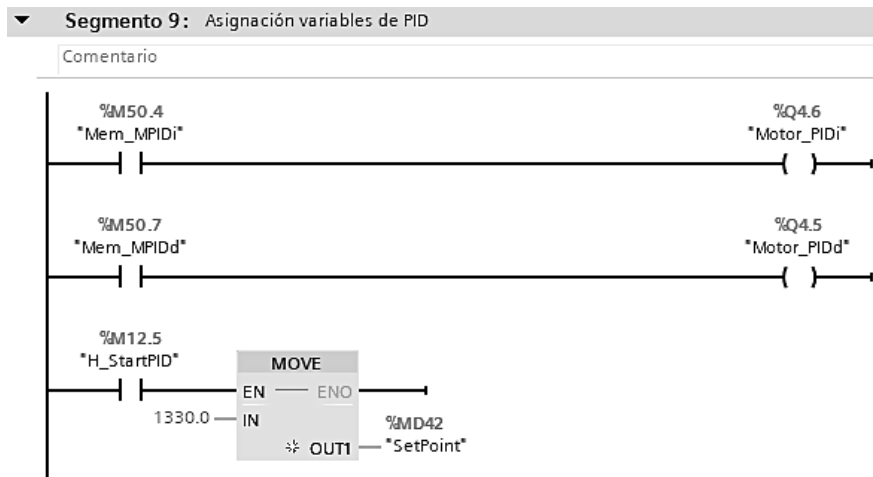


Figura 58. Funcionamiento de botones: Stop y Giro

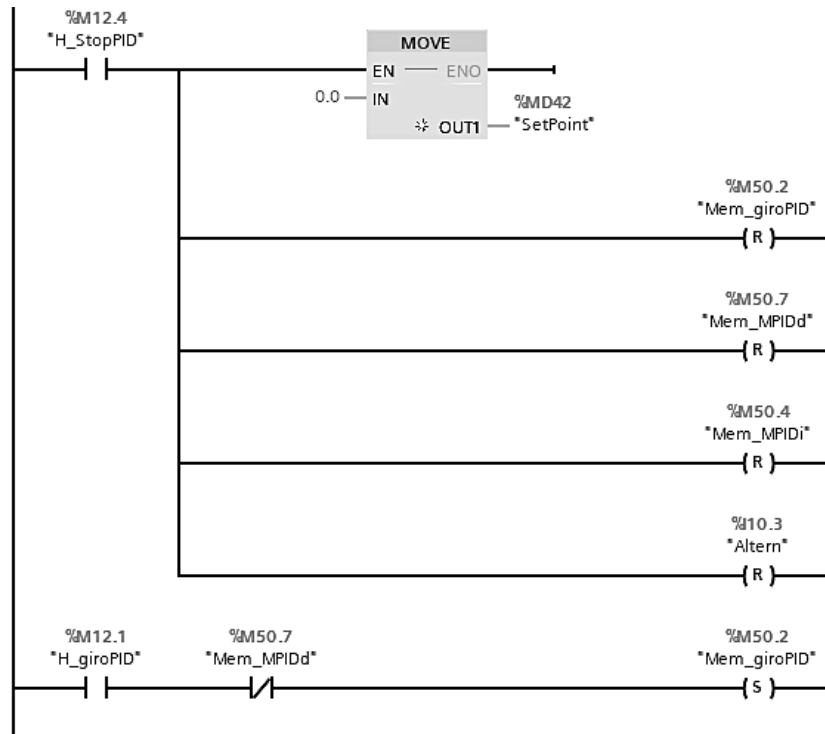


Figura 59. Inicialización de operación de rutina control PID

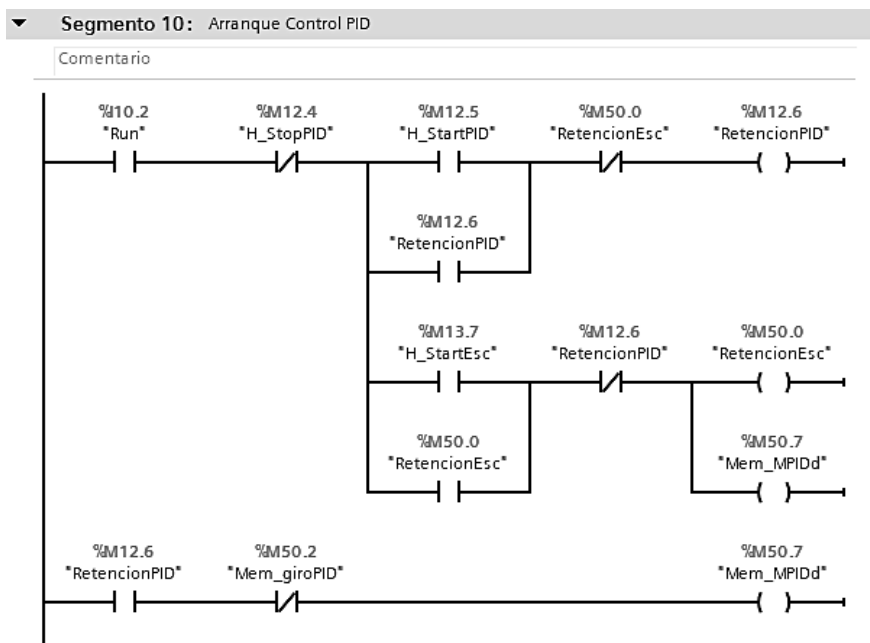


Figura 60. Funcionamiento de operación en giro, modo control y modo arranque

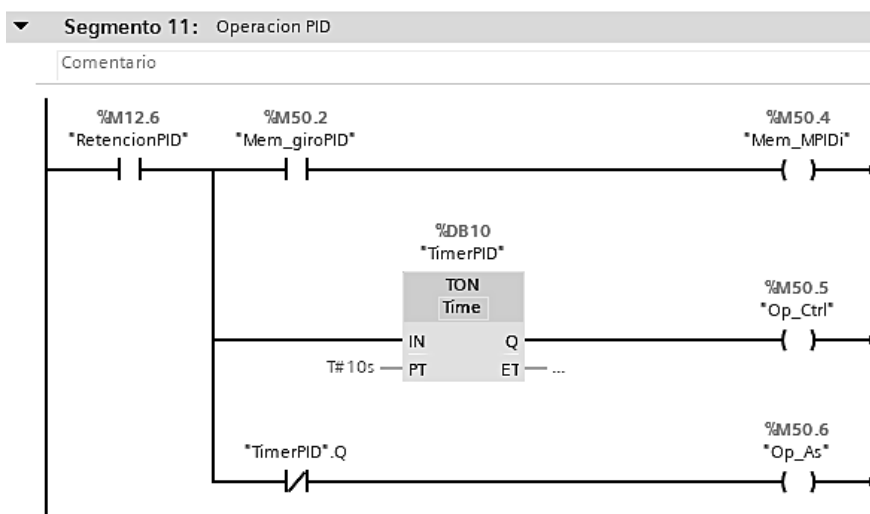
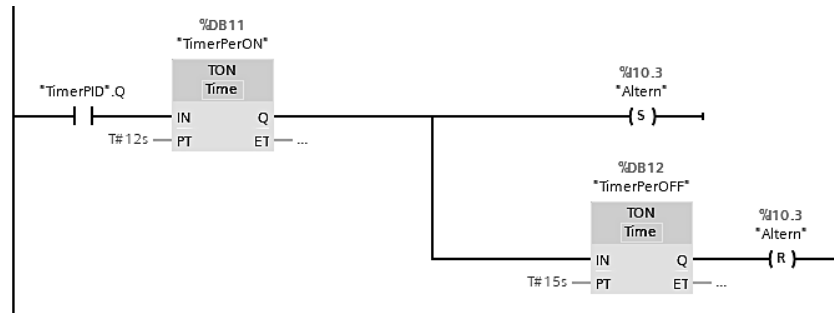


Figura 61. Encendido y apagado de perturbación



miento de una persona en la escalera, 3) el comportamiento del sensor, 4) el ajuste de la referencia y 5) la retención de la velocidad.

Figura 62. Funcionamiento de modos de control y arranque

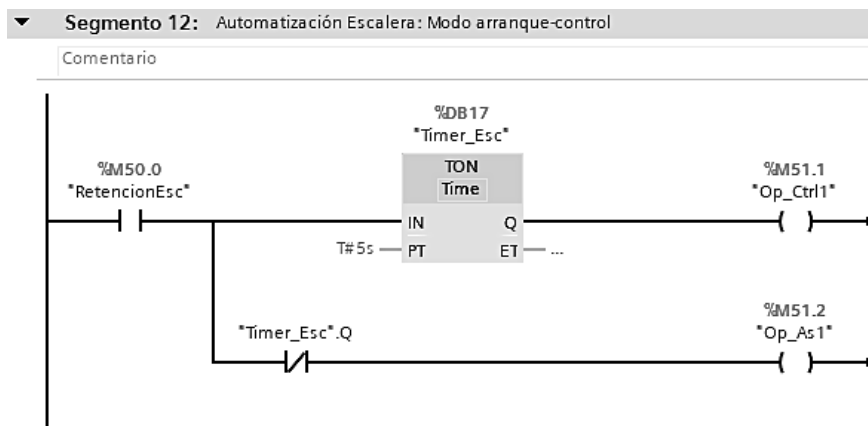


Figura 63. Simulación de comportamiento de *persona en escalera*

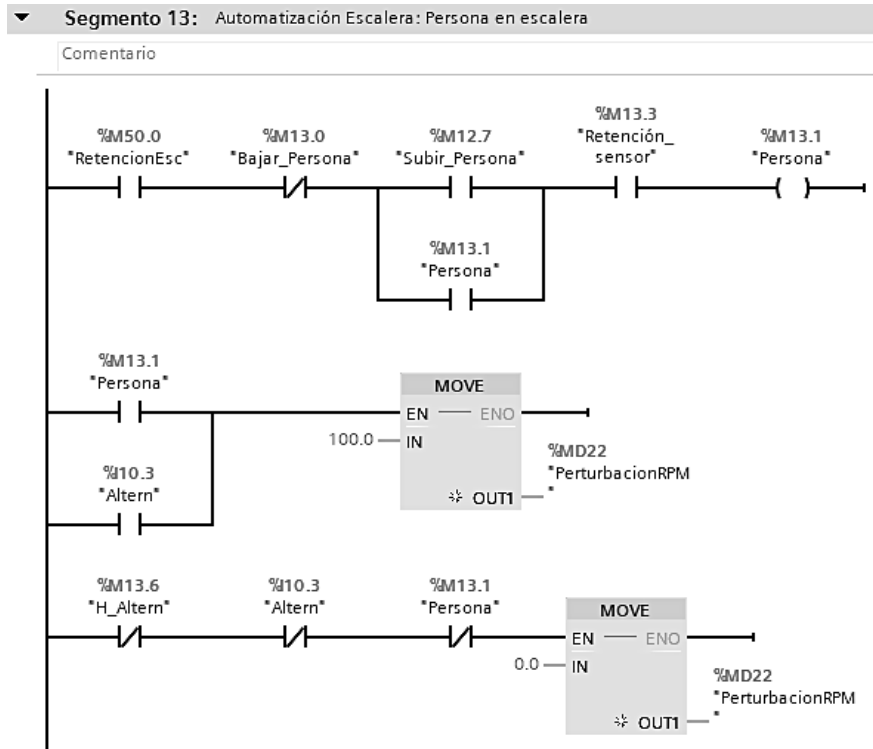


Figura 64. Simulación de comportamiento del *sensor*

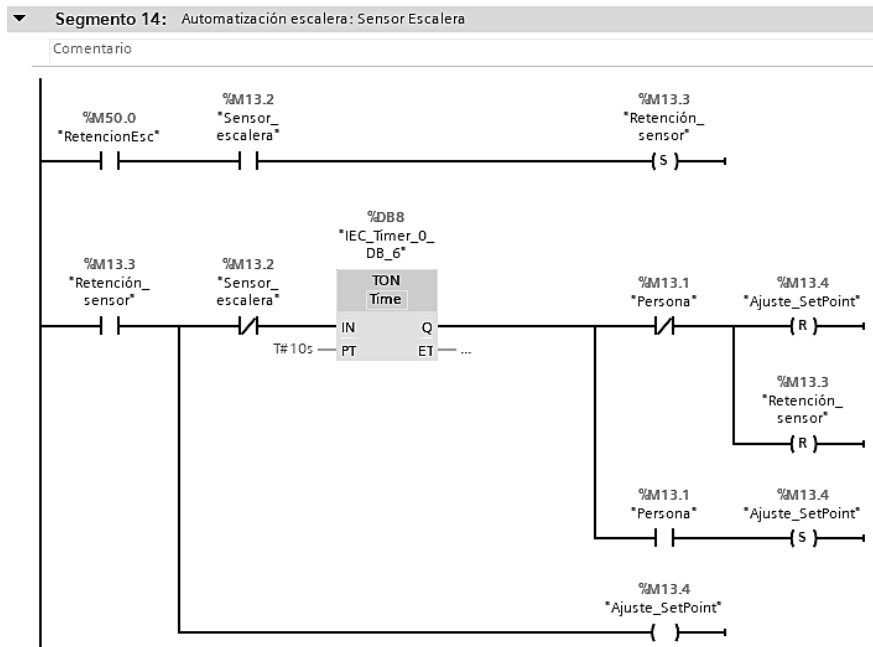


Figura 65. Ajuste de referencia según estado de *sensor*

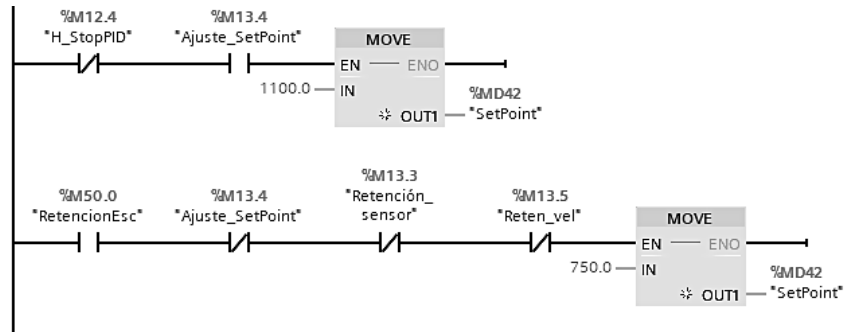


Figura 66. Retención de velocidad en modo de *espera*

