



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

**Unidad Profesional “Adolfo López Mateos”
ZACATENCO**

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MULTI-ACCIONAMIENTO
MEDIANTE REDES DE COMUNICACIÓN”**

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN**

PRESENTA:

MARCELINO ISAI REYES SOLACHE

ASESOR:

ING. PEDRO FRANCISCO HUERTA GONZÁLEZ



CDMX, NOVIEMBRE DEL 2018

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

T E M A D E T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN
POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN TESIS Y EXAMEN ORAL INDIVIDUAL
DEBERA (N) DESARROLLAR C. MARCELINO ISAI REYES SOLACHE

“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MULTI-ACCIONAMIENTO MEDIANTE REDES DE COMUNICACIÓN”

IMPLEMENTAR UN SISTEMA MULTI-ACCIONAMIENTO MEDIANTE LA RED DE COMUNICACIÓN ETHERNET/IP Y EL ESTÁNDAR RS485 PARA EL CONTROL DE MOTORES DE INDUCCIÓN APLICADOS EN UN SISTEMA DE BANDAS TRANSPORTADORAS.

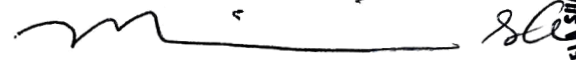
- ❖ MARCO TEÓRICO
- ❖ DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL
- ❖ CONFIGURACIÓN Y PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL
- ❖ PRUEBAS Y RESULTADOS DEL SISTEMA MULTIDRIVE
- ❖ COSTOS

CIUDAD DE MÉXICO, A 05 DE NOVIEMBRE DE 2018.

A S E S O R



**ING. PEDRO FRANCISCO HUERTA
GONZÁLEZ**



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



Instituto Politécnico Nacional
P r e s e n t e

Bajo protesta de decir verdad el que suscribe **Marcelino Isai Reyes Solache**, manifiesto ser autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada **“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MULTI-ACCIONAMIENTO MEDIANTE REDES DE COMUNICACIÓN”**, en delante **“La Tesis”** y de la cual se adjunta copia, un impreso y un cd por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgo al **Instituto Politécnico Nacional**, en adelante **EI IPN**, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales o en cualquier otro medio; para apoyar futuros trabajos relacionados con el tema de la **“La Tesis”** por un periodo de 1 año contado a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso a **EI IPN** de su determinación.

En virtud de lo anterior, **EI IPN** deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de **“La Tesis”**.

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

Ciudad de México., a 26 de noviembre de 2018

Atentamente



Marcelino Isai Reyes Solache

Agradecimientos

Agradezco a mi madre por su gran esfuerzo que hizo para apoyarme en mis estudios, por estar siempre pendiente de mí y brindarme lo que necesitaba, por su confianza y motivación en momentos difíciles. Sin su apoyo esta meta no hubiera sido posible.

A mis hermanos por su apoyo y comprensión.

Quiero manifestar admiración y respeto a mis profesores Ivone y Pedro por sus consejos y apoyo al momento de realizar este trabajo, sin su ayuda este trabajo no hubiera sido posible. Gracias por tenerme paciencia y por ayudarme a descubrir que es lo que más me gusta hacer dentro del campo de la ingeniería.

A la maestra Miriam por su apoyo durante la carrera.

A mis amigos que me acompañaron durante esta aventura haciéndola más amena.

Al Instituto Politécnico Nacional por brindarme una oportunidad para desarrollar mi carrera profesional.

Dedicado a todas las personas que quiero.

ATENTAMENTE

MARCELINO ISAI REYES SOLACHE

Índice General

Objetivo general	viii
Objetivos particulares	ix
Justificación	x
Introducción	xi
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	1
1.1 Sistema de accionamiento eléctrico	2
1.1.1 Definición.....	2
1.1.2 Elementos de un sistema de accionamiento eléctrico.....	2
1.1.3 Objetivos del sistema de accionamiento eléctrico	3
1.1.4 Ventajas del sistema de accionamiento eléctrico	3
1.2 Motor de inducción trifásico	4
1.2.1 Estator	4
1.2.2 Rotor jaula de ardilla	4
1.2.3 Principio de operación del motor de inducción trifásico tipo jaula de ardilla	5
1.2.4 Velocidad síncrona	5
1.2.5 Deslizamiento del rotor	6
1.3 Drive	6
1.3.1 Variador de frecuencia (Drive CA)	6
1.3.2 Estructura de un variador de frecuencia	7
1.3.3 Modos de control de velocidad variable	8
1.4 Red de comunicación industrial	9
1.5 Protocolo de comunicación EtherNet/IP	9
1.5.1 Elementos del protocolo EtherNet/IP	10
1.5.2 Características del protocolo EtherNet/IP	12
1.6 Norma física RS485	13
1.6.1 Funcionamiento	13
1.6.2 Características.....	13
1.7 Topología de redes	14
1.7.1 Bus	14
1.7.2 Estrella	15
1.8 Controlador de automatización programable	15
1.9 Interfaz humano-máquina	16
CAPÍTULO 2. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL	17
2.1 Descripción del proceso	18

2.1.1 Alternativa de entradas y salidas digitales del variador de frecuencia.....	18
2.1.2 Envío de señales al drive de CA mediante un módulo salidas digitales del controlador	19
2.1.3 Sistema con adaptador EtherNet/IP por drive	20
2.1.4 Sistema multidrive con adaptador EtherNet/IP.....	21
2.2 Selección de dispositivos de entrada	22
2.2.1 Dimensionamiento del número de entradas.....	22
2.2.2 Módulo de entradas digitales 1756-IB16.....	22
2.3 Selección de dispositivos de salida.....	24
2.3.1 Dimensionamiento del número de salidas	24
2.3.2 Módulo de salidas digitales 1756-OB32.....	25
2.3.3 Torre de señales.....	25
2.3.4 Elementos finales de control.....	26
2.4 Selección de las redes de comunicación	27
2.4.1 Módulo de EtherNet/IP 1756-EN2T	27
2.5 Selección del Controlador	28
2.5.1 ControlLogix 1756-L62	28
2.5.2 Chasis 1756-A7/B.....	29
2.6 Diseño de los circuitos de alimentación.....	30
2.6.1 Alimentación del PAC	30
2.6.2 Alimentación del PowerFlex 40.....	31
2.6.3 Diagrama general de alimentación del tablero	34
2.6.4 Diagrama de alimentación de los variadores	35
2.7 Diseño de los circuitos de alimentación de entradas y salidas	36
2.7.1 Circuito de activación de entradas y salidas	36
2.7.2 Conexión de las entradas y salidas digitales al variador	38
2.7.3 Conexión de torre de señales con la salida de relevador del drive.....	40
2.8 Diseño de la topología de red.....	41
2.8.1 Topología estrella Ethernet/IP	41
2.8.2 Bus RS485	42
2.9 Implementación	43
2.9.1 Instalación de la tarjeta 22-COMM-E en del drive tipo maestro.....	43
2.9.2 Activación de modo multidrive en la tarjeta 22-COMM-E	44
2.9.3 Distribución de los dispositivos en el tablero de control	45
2.9.4 Descripción del riel de clemas de conexión	46
2.9.5 Accionamiento del tablero de control	47
2.9.6 Instalación de las redes	48
CAPÍTULO 3. CONFIGURACIÓN Y PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL.....	50

3.1 Configuraciones de la red EtherNet/IP	51
3.1.1 Asignación de dirección IP de la computadora	51
3.1.2 Asignación IP al módulo 1756-EN2T y a la tarjeta 22-COMM-E	51
3.1.3 Configuración del driver de comunicación RSLinx Classic.....	51
3.2 Configuración del estándar RS485	54
3.2.1 Parámetros de comunicación de los variadores conectados en cadena	54
3.2.2 Configuración de la tarjeta 22-COMM-E en modo multidrive en el software Connected Components Workbench	55
3.3 Configuración de los variadores conectados en red para puesta en marcha	59
3.3.1 Parametrización con datos de motor.....	59
3.4 Proyecto en RSLogix 5000	66
3.4.1 Creación de proyecto y configuración de módulos.....	66
3.4.2 Adición del sistema multidrive al módulo de comunicación	70
3.5 Secuencias de operación de las bandas transportadoras	73
3.5.1 Control individual de cada motor.....	73
3.5.2 Secuencia temporizada del motor-0	74
3.5.3 Secuencia temporizada 2 motores.....	75
3.5.4 Secuencia Temporizada 3 Motores	75
3.6 Programación en el RSLogix 5000	76
3.6.1 Programación en lenguaje escalera.....	76
3.6.2 Tags del sistema multidrive	76
3.6.3 Cálculo de frecuencia a partir de RPM.....	77
3.6.4 Cálculo de RPM de salida del drive	78
3.6.5 Instrucción Add-on para cálculo de frecuencia y RPM	78
3.6.6 Rutina de control manual para los motores.....	80
3.6.7 Control de velocidad del motor en secuencia automática	81
3.7 Integración del sistema multidrive con la HMI	81
3.7.1 Enlace de la HMI con el controlador	82
3.7.2 Estructura de pantallas de la HMI	83
3.7.3 Pantalla de menú.....	84
3.7.4 Pantalla de control manual del motor.....	86
3.7.5 Pantalla de control de secuencia automática.....	88
CAPÍTULO 4. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL SISTEMA MULTIDRIVE	91
4.1 Prueba de comunicación de la tarjeta 22-COMM-E con los drives	92
4.2 Prueba de enlace de la tarjeta 22-COMM-E con el RSLogix 5000	92
4.3 Prueba de velocidad de salida del drive	93
4.3.1 Respuesta de velocidad mediante control manual.....	93

4.3.2 Control de velocidad a bajas frecuencias.....	94
4.4 Monitoreo de instrucciones en control manual.....	95
4.4.1 Control manual del motor 0.....	95
4.4.2 Control manual del motor 1.....	96
4.4.3 Control manual del motor 2.....	97
4.5 Monitoreo de instrucciones de secuencias automáticas	97
4.5.1 Secuencia automática 1.....	97
4.5.2 Secuencia automática 2.....	98
4.5.3 Secuencia automática 3.....	99
CAPÍTULO 5. COSTOS	101
5.1 Costos de los equipos del tablero de control	102
5.2 Costos de material eléctrico.....	103
5.3 Costo de ingeniería	103
5.4 Costo total del proyecto.....	104
Conclusiones.....	105
Trabajos futuros	106
Anexos	107
Referencias.....	117

Índice de figuras

Figura 1-1. Ejemplo de aplicación de accionamiento eléctrico.....	2
Figura 1-2. Esquema general de un sistema de accionamiento eléctrico.....	3
Figura 1-3. Estator montado sobre carcasa de hierro.	4
Figura 1-4. Rotor tipo jaula de ardilla.....	5
Figura 1-5. Campo magnético que envuelve al rotor.	5
Figura 1-6. Drive AC (Variador de frecuencia) alimentado a sistema trifásico.	6
Figura 1-7. Partes de un variador de frecuencia.....	7
Figura 1-8. Regiones de operación V/F	8
Figura 1-9. Capas del protocolo industrial EtherNet/IP	11
Figura 1-10. Capas de aplicación del CIP.....	12
Figura 1-11. Principio de transmisión de niveles lógicos en un sistema balanceado	13
Figura 1-12. Topología tipo bus.....	14
Figura 1-13. Topología tipo estrella	15
Figura 1-14. Panel View	16
Figura 1-15. Integración de un sistema de automatización	16
Figura 2-1. Panel básico de operación del PowerFlex 40	18
Figura 2-2. Accionamiento mediante entradas y salidas.....	19
Figura 2-3. Envío de señales al variador mediante un módulo de salidas digitales.....	19
Figura 2-4. Adaptador EtherNet/IP 22-COMM-E.....	20
Figura 2-5. 1 Instalación típica del adaptador EtherNet/IP	21
Figura 2-6. Sistema Multidrive hasta 5 variadores por nodo	21

Figura 2-7. Pulsador eléctrico NA.....	22
Figura 2-8. Bloque de terminales del módulo 1756-IB16	23
Figura 2-9. Esquema simplificado de alimentación de entradas.	23
Figura 2-10. Luces piloto para el sistema multidrive	24
Figura 2-11. Torre de señales de 3 niveles.....	25
Figura 2-12. Chasis 1756-A7/B	29
Figura 2-13. Instalación de módulos de la familia 1756 en chasis	29
Figura 2-14. ControlLogix 1756-L62 instalado en chasis.	30
Figura 2-15. Bloque de terminales de alimentación de la fuente 1756-PA75/B.....	31
Figura 2-16. Bloque de terminales de alimentación eléctrica PowerFlex 40	33
Figura 2-17. Conexión típica a tierra del PowerFlex 40	34
Figura 2-18. Diagrama general de alimentación.	34
Figura 2-19. Diagrama de alimentación de los drives PowerFlex 40.....	35
Figura 2-20. Estación de botones de activación	36
Figura 2-21. Circuito de alimentación de entradas y salidas digitales	36
Figura 2-22. Relevador de control maestro modelo MK2P-S	37
Figura 2-23. Arreglo de terminales del relevador	37
Figura 2-24. Diagrama de conexión de las entradas digitales.....	37
Figura 2-25. Diagrama de conexión de salidas digitales.....	38
Figura 2-26. Bloque de terminales de control del PowerFlex 40	39
Figura 2-27. Diagrama del bloque de terminales de control del PowerFlex 40	39
Figura 2-28. Cables de alimentación de la torre de señales	40
Figura 2-29. Contactos de relevador del PowerFlex 40	40
Figura 2-30. Diagrama de cableado de entradas y salidas digitales del PowerFlex 40.....	41
Figura 2-31. Topología estrella protocolo EtherNet/IP	42
Figura 2-32. Bus de comunicación RS485 con 3 variadores.....	42
Figura 2-33. Conector AK-U0-RJ45-TB2P	43
Figura 2-34. Grupo de cables UTP	43
Figura 2-35. Puerto DSI y cables de interfaz internos.....	44
Figura 2-36. Ajuste de modo multidrive de operación.	44
Figura 2-37. Distribución de elementos en el tablero	45
Figura 2-38. Riel de clemas de conexión.....	46
Figura 2-39. Tablero de control instalado	47
Figura 2-40. Mediciones de voltaje en tablero	48
Figura 2-41. Terminales del bus RS485	48
Figura 2-42. Distribución de la red en los tableros de control	49
Figura 3-1. Conexión de área local.....	51
Figura 3-2. Menú Communications.....	52
Figura 3-3. Nueva configuración de driver	52
Figura 3-4. Nombre para nuevo driver	52
Figura 3-5. Asignación de configuración a tarjeta de red	53
Figura 3-6. Red AB_ETHIP-1 EtherNet/IP	53
Figura 3-7. Panel básico de operación del PowerFlex 40	54
Figura 3-8. Proyecto Multidrive en CCW.....	56
Figura 3-9. Acceso a Device Toolbox	56
Figura 3-10. Asignación de la tarjeta Multidrive 22-COMM-E al proyecto en CCW	57
Figura 3-11. Tarjeta 22-COMM-E en la ventana de trabajo del CCW	57
Figura 3-12. Parámetros de la tarjeta 22-COMM-E para 3 variadores	58
Figura 3-13. Descarga de la nueva configuración a la tarjeta 22-COMM-E	59
Figura 3-14. Barra de estado en CCW con 3 variadores.	59
Figura 3-15. Ventana de trabajo del PowerFlex 40 en CCW	60

Figura 3-16. Acceso de configuración de inicio PowerFlex 40	60
Figura 3-17. Asistente de puesta en marcha para PowerFlex 40.....	61
Figura 3-18. Elección de control vectorial sin sensor en PowerFlex 40	61
Figura 3-19. Datos de los motores en la configuración de puesta en marcha.....	62
Figura 3-20. Configuración de frenado por rampa	63
Figura 3-21. Configuración de rampas de aceleración y desaceleración	63
Figura 3-22. Configuración de entradas digitales y frecuencias predeterminadas	64
Figura 3-23. Configuración de salida a relevador el PowerFlex 40	64
Figura 3-24. Configuración de salidas a optoacoplador.....	65
Figura 3-25. Configuración de salida analógica del PowerFlex 40.....	65
Figura 3-26. Finalización de la configuración de puesta en marcha.....	66
Figura 3-27. Creación de proyecto en RSLogix 5000	67
Figura 3-28. Nuevo módulo en el RSLogix 5000.	67
Figura 3-29. Selección de tipo de módulo.....	68
Figura 3-30. Adición del módulo EtherNet/IP al proyecto RSLogix 5000	68
Figura 3-31. Módulo de comunicaciones DeviceNet.....	69
Figura 3-32. Lista de módulos añadidos en RSLogix 5000.....	69
Figura 3-33. Descarga de configuración de módulos al CPU Logix 5562	70
Figura 3-34. Adición del sistema Multidrive al módulo EtherNet/IP 1756-EN2T	71
Figura 3-35. Asignación IP al módulo Multidrive en RSLogix 5000.....	71
Figura 3-36. Número de revisión del sistema Multidrive	72
Figura 3-37. Conexión con el variador.....	72
Figura 3-38. Variadores añadidos al proyecto de RSLogix 5000	73
Figura 3-39. Módulos completos en el RSLogix 5000.....	73
Figura 3-40. Diagrama de flujo de operación manual de motor	74
Figura 3-41. Diagrama de flujo de la secuencia automática 1.....	74
Figura 3-42. Diagrama de flujo de la secuencia automática 2.....	75
Figura 3-43. Diagrama de flujo de la secuencia automática 3.....	75
Figura 3-44. Acceso a control de tags	76
Figura 3-45. Tags de entrada del drive A	76
Figura 3-46. Tags de salida del drive A	77
Figura 3-47. Gráfica RPM vs frecuencia del motor 0	78
Figura 3-48. Creación de instrucción Add-on.....	79
Figura 3-49. Parámetros de entrada y salida de la instrucción Add-on	79
Figura 3-50. Cálculo de frecuencia en instrucción CPT	80
Figura 3-51. Subrutinas de control manual de los motores.....	80
Figura 3-52. Envío de frecuencia calculada al drive PowerFlex 40.....	80
Figura 3-53. Programación de sentido de giro del motor	81
Figura 3-54. Cambio de frecuencia con instrucción move	81
Figura 3-55. Enlace de la HMI con el controlador	82
Figura 3-56. Nuevo proyecto en FactoryTalk View Studio	82
Figura 3-57. Acceso a dispositivo en FactoryTalk View	83
Figura 3-58. Diagrama de flujo de secuencia de pantallas de la HMI	84
Figura 3-59. Elementos de la pantalla de menú	84
Figura 3-60. Asignación de tag al push botón.....	86
Figura 3-61. Pantalla de control manual de motor	86
Figura 3-62. Configuración de la entrada numérica.	88
Figura 3-63. Pantalla de control de secuencia automática 1.....	89
Figura 4-1. Estado del drive 0 integrado en sistema multidrive.....	92
Figura 4-2. Forzado de bits para envío de señales al PowerFlex 40.....	93
Figura 4-3. Frecuencia máxima de operación del motor 0	93

Figura 4-4. Indicación de RPM y frecuencia en panel.....	94
Figura 4-5. Comportamiento de bits en control manual motor 0.	96
Figura 4-6. Pantalla de control manual del motor 1.	96
Figura 4-7. Pantalla de control manual del motor 2.	97
Figura 4-8. Comportamiento de bits de secuencia automática 1	98
Figura 4-9. Pantalla secuencia automática 2.....	98
Figura 4-10. Comportamiento de bits de secuencia automática 2	99
Figura 4-11. Pantalla de operación de la secuencia 3	100

Índice de tablas

Tabla 2-1. Características de la tarjeta 22-COMM-E	20
Tabla 2-2. Especificaciones técnicas del módulo 1756-IB16	23
Tabla 2-3. Número de salidas digitales.....	24
Tabla 2-4. Especificaciones técnicas de luz piloto	24
Tabla 2-5. Especificaciones técnicas del módulo de salidas digitales 1756-0B32.....	25
Tabla 2-6. Especificaciones técnicas de la torre de señales LCE-302U	26
Tabla 2-7. Datos del motor 0	26
Tabla 2-8. Datos del motor 1	26
Tabla 2-9. Datos del motor 2	26
Tabla 2-10. Especificaciones técnicas del módulo 1756-EN2T.....	27
Tabla 2-11. Características y especificaciones técnicas del ControlLogix 1756-L62.....	28
Tabla 2-12. Características del chasis 1756-A7/B	29
Tabla 2-13. Especificaciones técnicas de la fuente de alimentación 1756-PA75/B.....	30
Tabla 2-14. Características de alimentación y salida del Drive 0: 22B-B5P0N104.....	31
Tabla 2-15. Características de alimentación y salida del Drive 1: 22B-A5P0N114.....	31
Tabla 2-16. Características de alimentación y salida del Drive 1: 22B-A2P3N104.....	32
Tabla 2-17. Características nominales del variador	32
Tabla 2-18. Descripción de bloque de terminales de alimentación PowerFlex 40.....	33
Tabla 2-19. Simbología de señales de entrada	38
Tabla 2-20. Descripción de elementos del tablero	46
Tabla 3-1. Lista de parámetros para variadores conectados en cadena.....	54
Tabla 3-2. Descripción de los elementos del panel básico de operación	55
Tabla 3-3. Tags utilizados en la programación	77
Tabla 3-4. Descripción de los elementos de la pantalla menú	85
Tabla 3-5. Descripción de elementos de la pantalla de control manual	86
Tabla 3-6. Elementos de la pantalla de control de secuencia automática.....	89
Tabla 4-1. Frecuencias mínimas de operación de los motores.....	95
Tabla 5-1. Costos de los equipos del tablero de control.	102
Tabla 5-2. Costos de material eléctrico	103
Tabla 5-3. Costos de sistema de bandas transportadoras.....	103
Tabla 5-4. Costos de horas-hombre	104
Tabla 5-5. Costo total del proyecto.....	104

Objetivo general

Implementar un sistema multi-accionamiento mediante la red de comunicación EtherNet/IP y el estándar RS485 para el control de motores de inducción aplicados en un sistema de bandas transportadoras.

Objetivos particulares

- Diseñar y construir el tablero de control que incluye los elementos necesarios para el funcionamiento del sistema multi-accionamiento.
- Integrar los drives mediante el estándar RS485, con topología bus considerando los requerimientos de control de los motores a bajas frecuencias.
- Integrar el sistema multi-accionamiento con el controlador de automatización programable mediante la red de comunicación EtherNet/IP y la interfaz hombre máquina para el monitoreo de señales del sistema.
- Elaborar y aplicar las secuencias de operación en las bandas transportadoras programadas en el RSLogix 5000 resaltando la eficiencia de un sistema multi-accionamiento mediante un protocolo de comunicación.

Justificación

Los accionamientos eléctricos son empleados en gran parte de los procesos que requieren controlar la velocidad de un motor eléctrico, a nivel industrial dispositivos desarrollados a partir de electrónica de potencia, como es un variador de frecuencia (o drive de CA), permiten este control teniendo beneficios como es el ahorro de energía.

Un variador de frecuencia es enlazado a un controlador para llevar una programación y controlar a los motores, si el proceso tiene un considerable número de elementos a controlar, y no se implementa una red de comunicación para conectar estos dispositivos, se tiene una gran demanda de las salidas del controlador, esto obliga a elegir un controlador con un mayor número de salidas y no aprovechar estas salidas en otra parte del proceso.

En la actualidad los variadores de frecuencia soportan protocolos de comunicación para poder transferir información, la red de comunicación EtherNet/IP es utilizada en diversas industrias, esto debido a su robustez y la integración de diversos dispositivos.

Las comunicaciones industriales juegan un papel importante en la actualidad, dado que los procesos industriales cada vez son más exigentes, la integración de un sistema multi-accionamiento con un protocolo de comunicación para controlar varios motores simultáneamente tiene una instalación más fácil que un cableado tradicional permitiendo enviar órdenes y monitorear el sistema. La implementación de un sistema de multi-accionamiento tiene beneficios económicos, ya que no se requiere insertar módulos de entradas, salidas digitales y analógicas para accionar los variadores de frecuencia, por otra parte, el eliminar el cableado tradicional reduce los costos de instalación y mantenimiento.

Introducción

Los sistemas de multi-accionamiento (o sistema multidrive) tienen diversas aplicaciones tales como ventiladores, bandas transportadoras, bombas, etc. De aquí su importancia en los procesos de automatización industrial. En este proyecto se implementó un sistema de multi-accionamiento para el control de motores de inducción instalados en bandas transportadoras. La integración de los variadores se llevó a cabo mediante la instalación de una tarjeta de comunicación que añade a un variador a la red EtherNet/IP manejando la jerarquía maestro-esclavo.

Se utiliza un estándar de comunicación RS485 para la comunicación entre los drives tipo esclavo, ya que tiene las características de tener una resistencia a interferencias electromagnéticas y ofrece velocidades de hasta 10 Mbps. Cada variador puede enviar y recibir datos del controlador además de que puede ser controlado y monitoreado para hacer una retroalimentación.

La integración del sistema consiste en la elaboración del tablero de control instalando todos los dispositivos auxiliares para que el sistema pueda funcionar, posteriormente se diseñó la topología de red, para poder llevar a cabo las configuraciones y programación. Se integró una interfaz hombre máquina para el monitoreo de los drives conectados en red y poder enviar ordenes de operación. En el proyecto se trabajó con él con el sistema ControlLogix y los variadores PowerFlex 40.

La parte central de este trabajo es la integración de redes de comunicación para controlar motores de inducción a través de un controlador de automatización programable (PAC) y variadores de frecuencia.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

En este apartado se describen los principios teóricos fundamentales que permiten comprender el funcionamiento de un sistema de accionamiento y protocolos de comunicación implementados.

1.1 Sistema de accionamiento eléctrico

La mayor parte de equipo de producción industrial está compuesto por 3 elementos fundamentales: un motor eléctrico, el dispositivo de transmisión de energía, y el equipo que desarrolla el trabajo deseado. La función de los dos primeros componentes es producir y operar al tercero.

1.1.1 Definición

El agregado de un motor eléctrico, el eje transmisor de potencia y el equipo de control mediante el cual las características del motor se pueden ajustar, y sus condiciones de operación con respecto a la carga mecánica para satisfacer un rendimiento particular, se conoce como accionamiento eléctrico. (Enriquez, 2009)

El accionamiento eléctrico comprende la técnica a través de la cual se da un arranque a un conjunto: motor eléctrico-impulsor, acoples y una carga determinada. Incluye a los equipos que facilitan, optimizan y controlan la operación de una máquina rotativa, a través de elementos de electrónica, comunicación y potencia. (Vázquez, 2010)

1.1.2 Elementos de un sistema de accionamiento eléctrico

Dependiendo la aplicación el sistema puede tener equipos de arrancadores suaves, variadores de frecuencia, convertidores de corriente continua, convertidores de corriente alterna, entre los más comunes. En la Figura 1-1 se muestra un sistema de accionamiento el cual se compone de un equipo desarrollado en base a electrónica de potencia, que controla un motor eléctrico y cuya carga es un fluido.

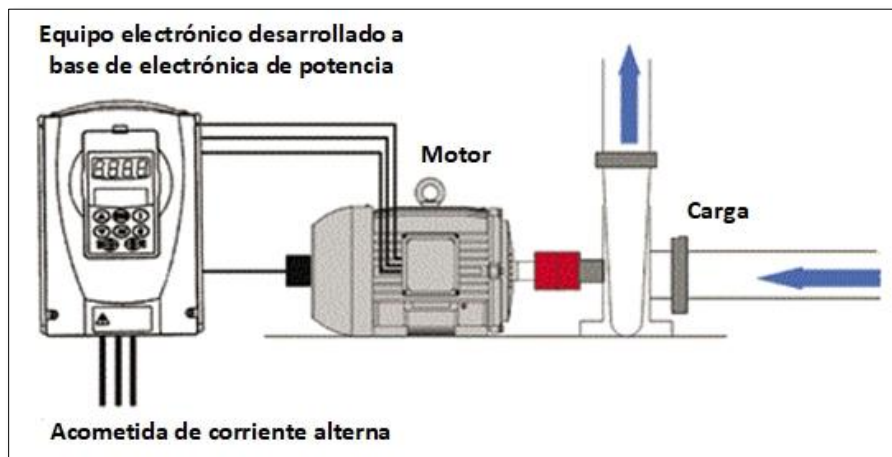


Figura 1-1. Ejemplo de aplicación de accionamiento eléctrico.

El accionamiento eléctrico es capaz de convertir la energía eléctrica en energía mecánica, teniendo bajo control el proceso de conversión. Los accionamientos eléctricos normalmente son utilizados para accionar máquinas o equipamientos que requieren un tipo de movimiento controlado.

Un accionamiento eléctrico moderno está formado por los siguientes elementos:

Motor Eléctrico: Convierte la energía eléctrica en mecánica.

Dispositivo electrónico: Mediante el mismo se comanda y controla la potencia eléctrica, la velocidad y otros parámetros necesarios para el funcionamiento del accionamiento.

Transmisión mecánica: Adapta la velocidad y la inercia entre el motor y la máquina (carga).

Las cargas industriales exigen operar dentro de un rango de velocidades variables, esto conlleva a un ajuste preciso de velocidad. Las cargas pueden ser de par constante. En la Figura 1-2, se muestra el diagrama general de un sistema de accionamiento eléctrico. (Enriquez, 2009)

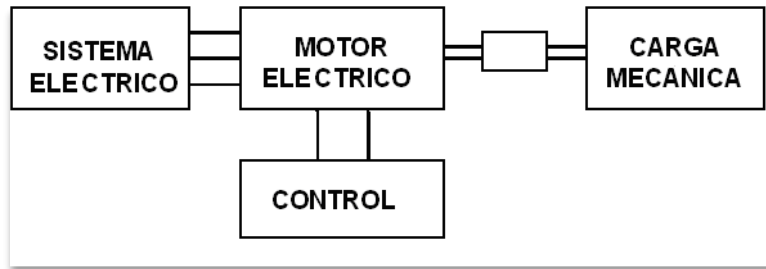


Figura 1-2. Esquema general de un sistema de accionamiento eléctrico.

1.1.3 Objetivos del sistema de accionamiento eléctrico

Los objetivos del sistema de accionamiento dependen del sistema donde es implementado. Entre los cuales están:

- Fijar o mantener una velocidad determinada
- Un arranque y paro suave
- Sincronizar la velocidad de los motores
- Sincronizar posición de los motores
- Control de par y aceleración

Los modernos sistemas de accionamiento permiten obtener velocidades muy precisas de forma independiente a la carga comparado con una velocidad convencional fija.

1.1.4 Ventajas del sistema de accionamiento eléctrico

Ventajas de la implementación de un sistema de accionamiento eléctrico

En el sistema eléctrico y motor

- Menor intensidad de arranque
- Ahorro de energía
- Control de factor de potencia
- Menores esfuerzos mecánicos del motor
- Control rápido, continuo y a distancia del sistema

Los ahorros de energía dependen de la aplicación del sistema, las más comunes son: bombas centrifugas, ventiladores, bandas transportadoras, etc.

1.2 Motor de inducción trifásico

El motor de inducción es por excelencia empleado en la industria debido a su simple construcción, alta resistencia y fácil mantenimiento, es instalado en maquinarias que requieren un movimiento mecánico.

Convierte la energía eléctrica en energía mecánica bajo el fenómeno de inducción electromagnética, las partes que lo componen son:

1.2.1 Estator

Está formado por un conjunto de laminaciones delgadas, ranuradas, de acero de alta permeabilidad; como se muestra en la Figura 1-3, está colocado dentro de un bastidor o carcasa de hierro, esta carcasa proporciona apoyo mecánico al motor, y aunque esta está hecha con material magnético, no está diseñado para conducir flujo magnético. En las ranuras del conjunto de laminaciones se colocan bobinas idénticas y luego se conectan para formar un devanado trifásico equilibrado. (Guru, 2003)

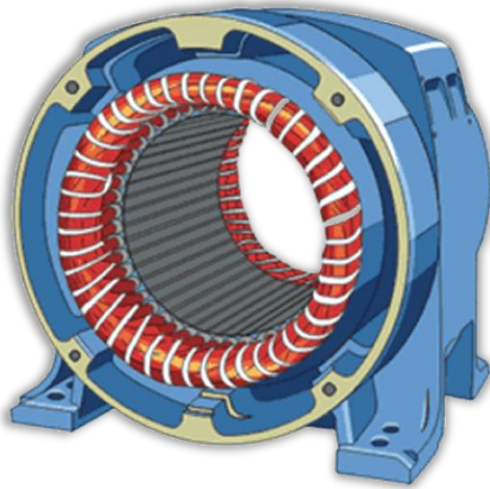


Figura 1-3. Estator montado sobre carcasa de hierro.

1.2.2 Rotor jaula de ardilla

Está situado en el interior del estator, como se muestra en la Figura 1-4, el núcleo del rotor está construido de chapas estampadas de acero al silicio en el interior de las cuales se disponen unas barras, generalmente de aluminio moldeado a presión. Las barras del devanado van conectadas a unos anillos conductores denominados anillos extremos. El bobinado así dispuesto tiene forma de jaula de ardilla.

Un inconveniente de los motores con rotor de jaula de ardilla es que en el arranque absorbe una corriente muy intensa (de 4 a 7 veces la nominal o asignada), y lo hace además con un bajo factor de potencia, y a pesar de ello, el par de arranque suele ser bajo. (De Valdelvira, 2011)

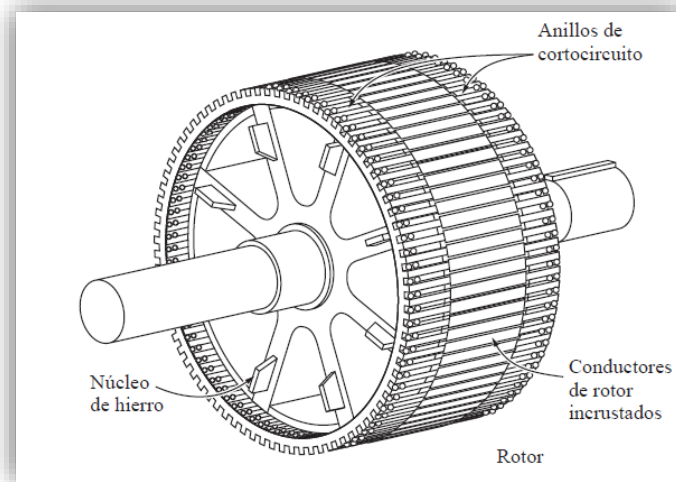


Figura 1-4. Rotor tipo jaula de ardilla.

1.2.3 Principio de operación del motor de inducción trifásico tipo jaula de ardilla

Convierte la energía eléctrica en mecánica por medio del fenómeno de inducción electromagnética, en el estator son instaladas un grupo de bobinas que al hacer pasar una corriente generan un campo magnético, la alimentación es de tipo trifásico y la corriente entre las bobinas está desfasada 120° , este desfase crea el campo magnético giratorio que envuelve al rotor como se muestra en la Figura 1-5.

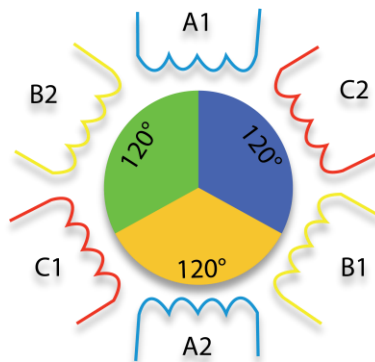


Figura 1-5. Campo magnético que envuelve al rotor.

1.2.4 Velocidad síncrona

La velocidad del flujo rotatorio se puede reducir incrementando el número de polos, se puede incrementar el número de polos siempre y cuando existan suficientes ranuras.

La velocidad de sincronía se define como:

$$N_s = \frac{120f}{p} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

N_s : Velocidad de giro del campo magnético, Revoluciones por minuto (RPM)

f : Frecuencia de alimentación de la máquina (Hz)

p : Número de polos magnéticos del estator

1.2.5 Deslizamiento del rotor

La velocidad de giro del rotor es ligeramente inferior a la velocidad de giro del campo magnético del estator a esta diferencia se conoce como deslizamiento, se define como la diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad del rotor, Ec. 2, si el rotor se encuentra en reposo, $S=1$. Cuando el rotor se encuentra en vacío sin carga el valor de S tiene a cero. (De Valdelvira, 2011)

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

S : Deslizamiento

N_s : Velocidad de sincronía

N_r : Velocidad del rotor

1.3 Drive

En el mundo eléctrico, "Drive" es un término usado para describir un controlador de velocidad variable. Los diferentes tipos de drives pueden controlar motores de CA, CD y servomotores dependiendo al sistema donde es implementado. (PARKER, 2015)

1.3.1 Variador de frecuencia (Drive CA)

Es un dispositivo electrónico que permite el control de la velocidad de rotación de los motores eléctricos de inducción. (Vázquez, 2010)

El dispositivo está diseñado para cambiar la frecuencia y por lo tanto la velocidad de un motor de inducción asíncrono, genera una corriente y tensión necesaria para accionar el motor de corriente alterna. La frecuencia de salida del variador es independiente de la frecuencia de alimentación como muestra el esquema de la Figura 1-6. (Álvarez Pulido, 2000)

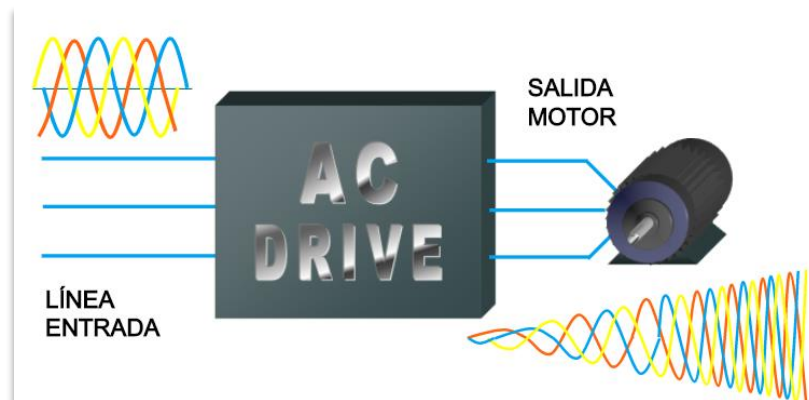


Figura 1-6. Drive AC (Variador de frecuencia) alimentado a sistema trifásico.

La frecuencia de salida se obtiene mediante procedimientos electrónicos mediante el uso de semiconductores a continuación se describen las partes de un drive de CA.

1.3.2 Estructura de un variador de frecuencia

La Figura 1-7 muestra un esquema general de los componentes de un variador de frecuencia.

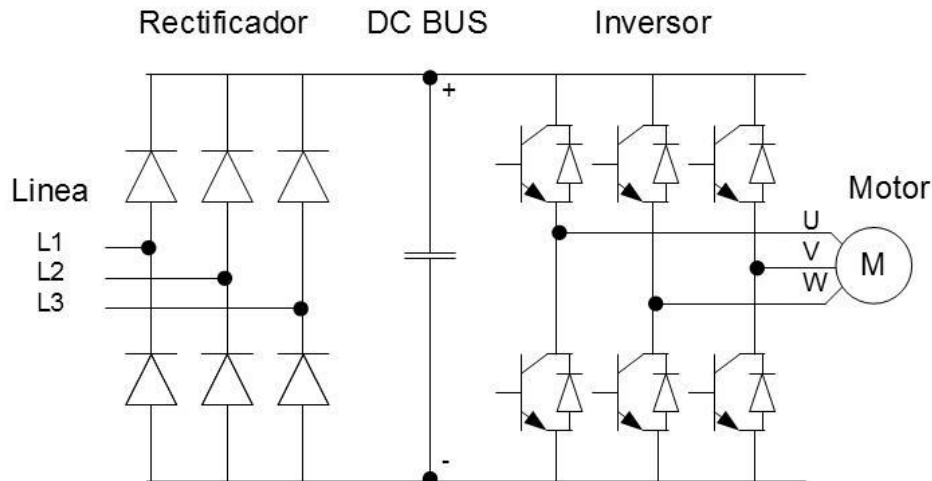


Figura 1-7. Partes de un variador de frecuencia.

Rectificador: Se suministra una corriente de tipo alterna que pasa por un arreglo de diodos rectificadores obteniendo corriente continua.

Bus de corriente continua: En esta parte están instalados condensadores de gran capacidad que almacenan y filtran la corriente rectificada, el objetivo es tener una corriente más estable y una reserva de energía suficiente para suministrar la intensidad requerida por el motor.

Inversor: Toma la corriente del bus de C.C, un circuito de disparo acciona los semiconductores convirtiendo en una salida de tipo trifásica, con valores de tensión, intensidad y frecuencia de salida variables. El elemento de conmutación comúnmente utilizado es el transistor bipolar de puerta aislada, IGBT, (por sus siglas en inglés Insulated Gate Bipolar Transistor). La señal de salida es una aproximación senoidal mediante la modulación por ancho de pulso (PWM).

Control: El circuito de control es uno de los componentes más importantes de un variador de frecuencia y tiene cuatro tareas principales:

Controlar los impulsos o señales que hacen entrar en conducción a los semiconductores del convertidor.

Intercambio de datos entre el convertidor de frecuencia y los periféricos.

Llevar a cabo las funciones de protección para el convertidor de frecuencia y el motor.

La parte de control está gobernada por un microprocesador donde se almacena el programa de funcionamiento del equipo y los valores de los parámetros. (Pérez Donsión , 2004)

1.3.3 Modos de control de velocidad variable

El desarrollo de la electrónica de potencia y del control digital han permitido mejorar los accionamientos para controlar motores de inducción, cumpliendo con los requisitos de los procesos industriales.

Control escalar voltaje/frecuencia

Controla el par electromagnético del motor y la velocidad modificando la relación voltaje y frecuencia de alimentación en las terminales del estator.

En esta estrategia de control se tienen 2 zonas de operación. Si se mantiene constante la relación v/f el flujo del entrehierro se conserva constante por lo que el par electromagnético se conserva constante y se opera en una zona de par constante. Si solo se incrementa la frecuencia y se mantiene constante el voltaje; el flujo disminuye por lo que el par incrementa y se tiene una zona de potencia constante. La Figura 1-8 muestra las regiones de operación de un motor de inducción con control v/f .

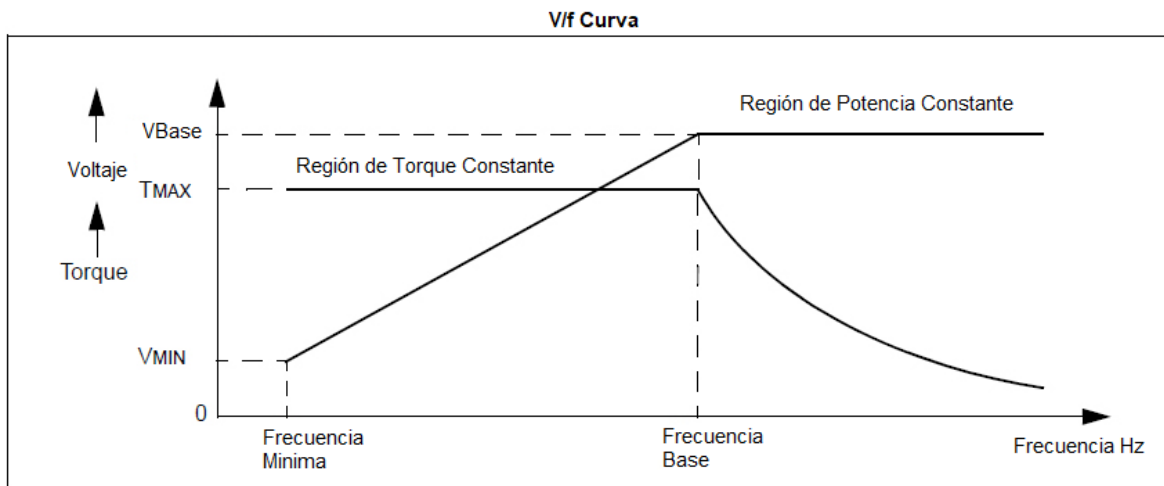


Figura 1-8. Regiones de operación V/F

Este tipo de control es ideal para aplicaciones que tiene un par constante o cargas que tardan mucho tiempo en cambiar la velocidad como bombas y ventiladores.

Este tipo de control opera en lazo abierto sin un sensor de velocidad, a pesar de ser sencillo, presenta desventajas debido a que se desprecia las caídas de tensión en el estator, por lo que a bajas frecuencias de operación el par no es suficiente para vencer la inercia, que depende de la carga, lo cual representa un rango de velocidades limitado. (Ponce Cruz & Sampé López , 2008)

No recomendable para aplicaciones que requieren un buen control de par a bajas velocidades o una regulación de velocidad precisa. No tiene compensación para las dinámicas de la carga ya que está diseñado para usarse en estado permanente y no controla de forma correcta los transitorios.

Control vectorial

Es una técnica de control de motores de inducción, que permite operar a un motor trifásico con el mismo rendimiento dinámico que un motor de CC, es decir, admite un control independiente de flujo y par. (De Almedia, 2015)

La modulación vectorial o control vectorial aplicado al control de la máquina de inducción, constituye un conjunto de estrategias que mejora el rendimiento de la máquina controlando el torque, la velocidad y la posición del eje de la máquina. (Alzate Gómez, 2009)

El control vectorial es utilizado en aplicaciones que requieren altos pares de partida, control total de par a bajas velocidades, como por ejemplo las líneas de fundición de acero y aplicaciones de enrollados. Este tipo de control proporciona un alto factor de potencia, capacidad para velocidades altas, operación suave a baja velocidad, alto torque de arranque.

1.4 Red de comunicación industrial

Una red de comunicación industrial se puede definir como una red de tiempo real utilizada en un sistema de producción para conectar distintos procesos de aplicación con el propósito de asegurar el funcionamiento de la instalación.

En principio una red se puede definir como una serie de estaciones (Nodos) o equipos interconectados entre sí, para tener información más común disponible en uno, varios o cada uno de los dispositivos de red.

Elementos de una red industrial:

- Computadoras industriales
- Controladores
- Sensores y actuadores
- Interfaces de usuario

Ventajas de la implementación de una red de comunicaciones:

- Visualización y supervisión del proceso
- Toma de datos del proceso
- Programación sencilla
- Facilidad de comunicación humano-máquina

1.5 Protocolo de comunicación EtherNet/IP

Es un estándar abierto de comunicaciones que hace uso exclusivo de la tecnología comercial ethernet. Este protocolo permite configurar, concentrar y controlar. Al ser un estándar abierto es compatible con productos de diferentes compañías. Utiliza el modelo productor/consumidor, donde múltiples nodos pueden consumir la misma información al mismo tiempo desde un único productor. (Marrugat, 2005)

1.5.1 Elementos del protocolo EtherNet/IP

Niveles OSI

La interconexión de sistemas abiertos divide en niveles las tareas que se lleven a cabo en una comunicación de red. Los niveles están definidos y no interfieren entre ellos. En total hay siete niveles, los primeros cuatro tienen funciones de comunicación y los tres últimos de procesos. Cada uno de los siete niveles dispone de protocolos específicos para el control de dicho nivel.

Nivel físico

Se definen las características eléctricas y mecánicas de la red necesarias para establecer y mantener la conexión física, incluyendo dimensiones de los conectores, cables y los tipos de señales que van a circular en ellos. En este caso se utiliza ethernet.

Nivel de enlace de datos

Establece y mantiene el flujo de datos que discurre entre los usuarios. Controla si se van a producir errores y los corrige, incluye los códigos de dirección, el orden de los datos transmitidos.

Nivel de red

Decide por dónde se han de transmitir los datos dentro de la red, incluye la administración y gestión de datos, emisión de mensajes y la regulación del tráfico de red.

Nivel de transporte

Asegura la transferencia de la información a pesar de fallos que pueden ocurrir en los niveles anteriores, incluye detección de bloqueos y caídas del sistema. Asegura la igualdad entre la velocidad de transmisión y la velocidad de recepción.

Nivel de sesión

Organiza las funciones que permiten que dos usuarios se comuniquen a través de la red, incluye tareas de seguridad, contraseña de usuarios y la administración del sistema.

Nivel de presentación

Transforma la información del formato de la máquina a un formato comprensible por los usuarios.

Nivel de aplicación

Se encarga del intercambio de comunicación entre los usuarios y el sistema operativo, incluye la transferencia de archivos y programas de aplicación. (Raya, Raya, & Martínez , 2009)

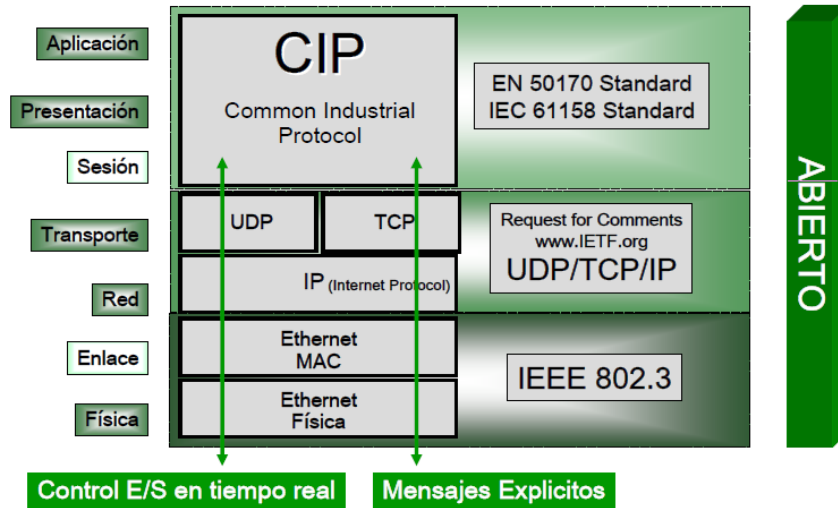


Figura 1-9. Capas del protocolo industrial EtherNet/IP

Como se observa en Figura 1-9 EtherNet/IP utiliza:

IP (protocolo internet) como protocolo de red

TCP para mensajes explícitos: Carga/Descarga de programas, instrucción, mensajes, etc.

UDP para mensajes implícitos: control E/S, el UDP es varias veces más rápido que TCP

CIP (Protocolo industrial común) ofrece a la ethernet genérica la “funcionalidad industrial” permite configurar, concentrar y controlar, ofrece el modelo productor/consumidor sobre la red.

El protocolo industrial común tiene como objetivo proveer una capa de aplicación, de acuerdo al modelo OSI, común para diferentes redes, dando lugar a llamar “familia de redes CIP”. EtherNet/IP dentro de su capa de aplicación contiene el protocolo CIP. La filosofía de desarrollo de este protocolo la de proveer de una capa de aplicación que se abstraiga de la tecnología particular de una red industrial, es decir, de las capas más bajas que definen las características físicas y propias del protocolo de comunicación. De esta forma, se puede aplicar esta capa común a distintas tecnologías de redes, cada una con sus capacidades y aplicaciones particulares.

Como se observa en la Figura 1-10 CIP engloba un conjunto de servicios y mensajes de control, seguridad y configuración. Sigue un modelo de objetos, cada objeto está formado por atributos (datos), servicios (comandos), conexiones y comportamiento. El CIP cuenta con un extenso número de objetos para cubrir comunicaciones y funciones típicas de elementos comunes en procesos de automatización. (Herrero Collantes, 2017)



Figura 1-10. Capas de aplicación del CIP

1.5.2 Características del protocolo EtherNet/IP

Modelo de comunicación productor/consumidor

En este modelo de comunicación existen múltiples nodos que pueden consumir la misma información al mismo tiempo desde un único productor. El uso del ancho de banda es más eficiente, ya que no se desperdicia información cada consumidor toma la información que necesita, la duración de la transmisión es independiente del número de consumidores conectados.

Permite enviar dos tipos de mensaje, explícito: Contiene instrucciones el servicio a realizar. Mensajería, programación.

Implícito: solo contiene datos. Los dispositivos sabes qué hacer con ellos. (Marrugat, 2005)

Arquitectura cliente/servidor

Se establece la relación que existe entre los procesos de dispositivos distintos. El cliente envía una solicitud a un servidor. El cliente espera una respuesta del servidor. Por otra parte, el servidor recibe una solicitud de un cliente.

Jerarquía Maestro/Esclavo

Es una aplicación particular de la arquitectura de comunicación cliente/servidor en el que el maestro, es decir, el cliente, requiere y envía información hacia un esclavo, es decir, un consumidor. Por otra parte, el esclavo, se limita a enviar la información solicitada y efectuar las acciones de control dadas por el maestro.

Estándar basado en IEEE 802.3

La especificación IEEE para Ethernet es la 802.3, que define qué tipo de cableado se permite y cuáles son las características de la señal que transporta. La especificación 802.3 original utilizaba un cable coaxial grueso de 50 ohm, que permite transportar una señal de 10 Mbps a 500 m. Más tarde se añadió la posibilidad de utilizar otros tipos de cables: Coaxial delgado; pares de cables trenzados, y fibra óptica.

1.6 Norma física RS485

Es un estándar de comunicaciones en bus de la capa física de comunicación y método de transmisión de señal, diseñado para la transmisión serial de datos a altas velocidades y distancias grandes. En el sector de la automatización industrial esta interfaz está muy extendida comúnmente utilizado en aplicaciones de adquisición y control de datos. (Weis, 2018)

1.6.1 Funcionamiento

El protocolo trabaja con señales de voltaje balanceado, también llamado voltaje diferencial, evita de esta forma problemas de referencia de niveles respecto a una tierra. Requiere el empleo de dos líneas para cada señal, como se observa en la Figura 1-11, generalmente se utiliza un par trenzado. Si llamamos una línea A y otra B, se toma que se ha recibido un nivel bajo si $A > B$ y un nivel alto si $A < B$, siempre y cuando esta diferencia supere cierto umbral que típicamente es 200 mV CD. De este modo, dado que el ruido se induce por igual en ambas líneas este queda compensado a la hora de realizar diferencia entre ambos y no produce alteraciones. (Valencia, 2010)

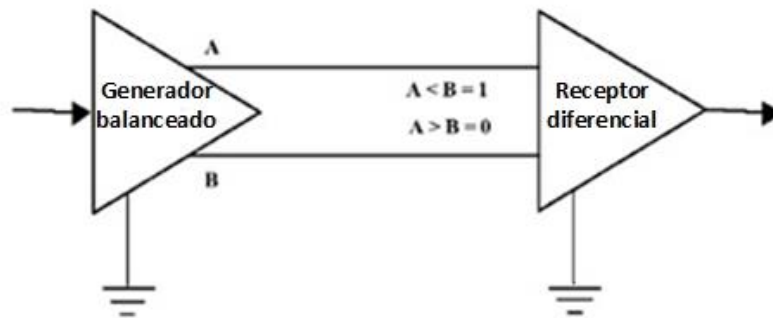


Figura 1-11. Principio de transmisión de niveles lógicos en un sistema balanceado

La diferencia entre los requerimientos del transmisor y el receptor pueden tener un margen de ruido de 1.3 V CD. Muchos enlaces con RS-485 tiene una resistencia de 120 ohms a través de las líneas A y B en cada extremo de la línea. Por lo tanto, cada enlace tiene dos terminales

1.6.2 Características

Es una interface multipunto y permite la comunicación de hasta 32 equipos emisores-receptores en un bus de datos común.

Se basa en un sistema diferencial que permite eliminar los posibles ruidos que puedan incorporarse al canal de comunicación.

Utiliza el tipo de transmisión diferencial Half-Duplex que se caracteriza por:

- Utiliza dos hilos referenciados a masa.
- El dato se obtiene de la diferencia de señal eléctrica entre los hilos que componen el canal de comunicación.
- Cada dispositivo conectado a la red puede enviar y recibir, pero no de forma simultánea.

- Permite velocidades de hasta 10 Mbps y distancias de hasta un máximo de 1200 metros.
- Permite la configuración de red con un máximo de 32 estaciones de trabajo.

La principal característica es, a una longitud máxima (1200 metros) hay una velocidad de 90 kbps.

Para que se alcance el valor de 1 lógico el valor del voltaje diferencial corresponde a +6 V CD, mientras que para un 0 es -6 V CD. En el bus cada dispositivo tiene las terminales TD/RD para controlar el modo de funcionamiento del equipo. Cuando esta entrada tiene un “0” el equipo se encuentra en modo de recepción y puede escuchar el tráfico de la red. Cuando esta entrada de control se pone a “1”, el equipo se pondrá en modo transmisión y está en disposición de poder enviar datos a la red. (Guerrero, Yuste, & Martinez , 2010)

1.7 Topología de redes

La topología de red se refiere a como físicamente están cableados todos los nodos (equipos) de una red. (Hallberg, 2007)

1.7.1 Bus

Es una red donde se utiliza un solo cable que corre de un extremo y tiene diferentes dispositivos (llamados nodos) de red conectados al cable en puntos diferentes (Hallberg, 2007). La Figura 1-12 muestra una topología tipo bus.

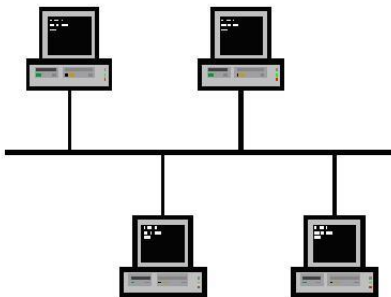


Figura 1-12. Topología tipo bus

Única línea, compartida por todos los modos de red. Al ser un bus compartido antes de enviar un mensaje cada nodo averigua si el bus está libre ya que un solo mensaje puede circular por el canal en cada momento.

Ventajas:

- Costo de instalación bajo.
- El fallo de un nodo no afecta el funcionamiento del resto de la red.
- Control del flujo sencillo.
- Todos los nodos pueden comunicarse entre sí directamente.
- La ampliación de nuevos nodos es sencilla.

Inconvenientes:

- Limitado en distancia, necesidad de repetidores por problemas de comunicación.

- Dependencia total del canal. Si éste falla, la red se paraliza. (Guerrero, Yuste, & Martínez, 2010)

1.7.2 Estrella

El concentrador trabaja como punto de conexión para enlazar cada nodo de red. Todo el tráfico que viaja de cualquier conexión de la red al concentrador se difunde a todos los demás nodos conectados al concentrador.

Como se observa en la Figura 1-13 todos los puertos de trabajo están conectados a un mismo de red, llamado concentrador.

El nodo central controla toda la transferencia de información, con lo que se crea una dependencia total de este elemento. Puesto si falla este elemento, falla toda la red.

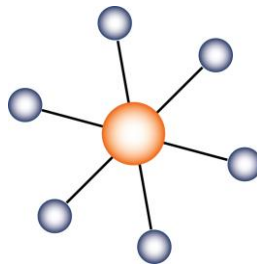


Figura 1-13. Topología tipo estrella

Ventajas:

- Mayor rendimiento, ya que, la información va directamente al emisor al receptor si pasar por otros nodos intermedios.
- Permite añadir y suprimir nodos con facilidad.
- Fácil conexión
- Admite diferentes velocidades.
- Fácil detección de fallas

Inconvenientes:

Dependencia total del switch, si éste falla, la red no funciona.

La ventaja de una topología en estrella radica en la compatibilidad con productos de 10 y 100 Mbps. Puede combinar dispositivos de 10 y 100 Mbps, y el conmutador Ethernet negociará la velocidad.

1.8 Controlador de automatización programable

Un controlador de Automatización Programable (PAC), es un conjunto formado por un dispositivo controlador, una serie de módulos de entrada y salida y redes para comunicar el conjunto. El empleo de un PAC combina las características de Controlador Lógico Programable (PLC) y computadoras industriales, para realizar operaciones de control, medida y cálculo. (Pardo Alonso, 2012)

Los PACs en el ámbito industrial son utilizados para el control de máquinas y procesos, destacando los puntos siguientes:

- Múltiples lazos de control independientes.
- Lazos de control robusto.
- Adquisición de datos de precisión.
- Análisis matemático.
- Control de movimiento.
- Se comunican usando los protocolos de red abiertos

1.9 Interfaz humano-máquina

Es el punto de acción en que un hombre entra en contacto con una máquina. Para que una interfaz hombre-máquina (HMI) sea útil y significativa para las personas, debe estar adaptada a sus requisitos y capacidades.

Permite que el operador, en ciertas circunstancias, vaya más allá del manejo de la máquina y observe el estado del equipo e intervenga en el proceso. La información se proporciona por medio de paneles de control con señales luminosas, campos de visualización o botones, o por medio de software que utiliza un sistema de visualización que se ejecuta en una terminal. (COPADATA, 2018)

En la Figura 1-14 se muestra un panel view, es un dispositivo moderno en el cual se tienen los elementos necesarios para controlar la máquina y monitorear su comportamiento, la finalidad de este dispositivo es realizar el accionamiento de una manera sencilla.



Figura 1-14. Panel View

Las interfaces modernas son capaces de soportar protocolos de comunicación como es el caso del EtherNet/IP para recibir y enviar datos. El esquema de la Figura 1-15 representa la integración de una HMI cuyos elementos están enlazados mediante un protocolo de comunicación, se tienen elementos instalados en campo, un controlador que recibe señales y las procesa, el enlace de la HMI es directo con el controlador ya que tiene la información de las entradas y salidas.

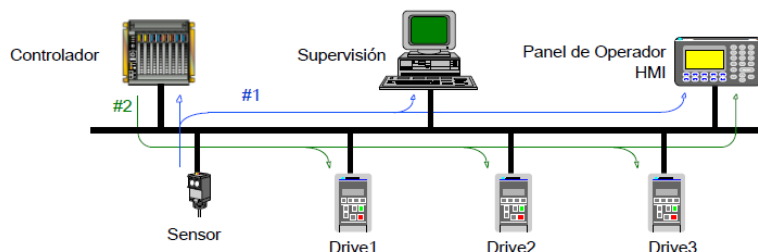


Figura 1-15. Integración de un sistema de automatización

CAPÍTULO 2. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

Este capítulo comienza con la descripción del proceso y las alternativas de solución. Una vez propuesta la solución a la problemática, se seleccionan y describen los dispositivos que conforman el sistema multidrive. El capítulo está dedicado a la parte física del proyecto y como se integran todos los dispositivos en el tablero de control.

2.1 Descripción del proceso

A continuación, se describe el proceso donde fue implementado el sistema multidrive. El sistema está formado por 3 bandas transportadoras, en las cuales se transporta el producto para diferentes etapas del proceso, un motor de inducción genera movimiento mecánico en cada una de las bandas. La velocidad de operación de cada banda debe ser variable, de esta forma, debe haber un control independiente de cada motor, el sistema también debe trabajar en secuencia, es decir, hay una rutina de accionamiento en un orden, velocidad y tiempo de cada una de las bandas con un monitoreo del sistema a través de una interfaz hombre máquina.

Para controlar la velocidad de los motores de inducción se utiliza un variador de frecuencia debido a sus ventajas mostradas en el capítulo 1. Estos dispositivos, son seleccionados y configurados de acuerdo a las características del motor. A continuación, se describen las alternativas de solución para el accionamiento del sistema descrito anteriormente.

2.1.1 Alternativa de entradas y salidas digitales del variador de frecuencia

Los variadores de frecuencia tienen 2 formas para llevar a cabo el accionamiento:

El panel básico de operación es una interfaz que se encuentra instalada en la parte frontal del variador. Permite configurar los datos del motor y llevar a cabo ordenes de arranque, paro, joggeo y un cambio de velocidad mediante un potenciómetro, para llevar a cabo estas órdenes es necesario estar en el sitio donde está instalado el variador, de esta forma, no se pueden mandar órdenes a distancia. La Figura 2-1 muestra el panel básico de operación de un variador PowerFlex 40.



Figura 2-1. Panel básico de operación del PowerFlex 40

El accionamiento mediante señales digitales, cada variador tiene un conjunto de entradas y salidas digitales que dependiendo de la configuración pueden ejecutar diversas órdenes.

En el caso del modelo del variador PowerFlex 40 tiene 8 entradas digitales de 24 V CD, 2 salidas a relevador y 2 salidas a optoacoplador que dependiendo de la configuración envía señales digitales. (Rockwell Automation , PowerFlex 40, Adjustable Frequency AC Drive, 2007)

Las acciones que se requieren configurar en cada variador son:

1. Arranque
2. Paro

3. Sentido de giro horario
4. Sentido de giro antihorario
5. Joggeo
6. Primera frecuencia programada
7. Segunda frecuencia programada

Las salidas digitales no alcanzarían a cubrir todas las ordenes de mando, por lo tanto, el sistema queda limitado.

La Figura 2-2 muestra el esquema del sistema utilizando las salidas y entradas digitales del variador, aunque el sistema no necesita un controlador, es necesario implementar un cableado resultando una desventaja por las distancias.

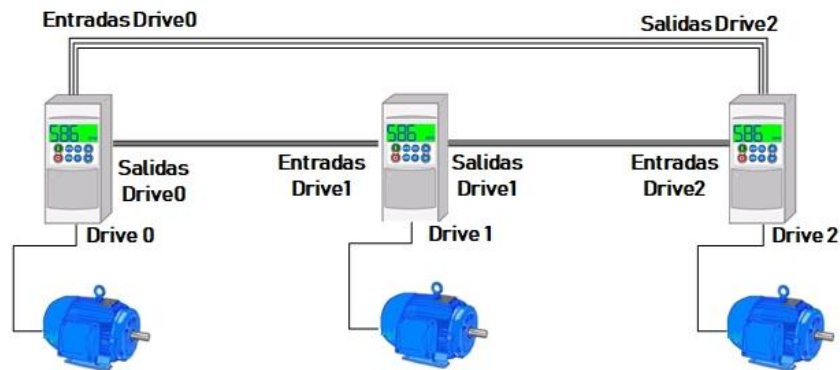


Figura 2-2. Accionamiento mediante entradas y salidas

2.1.2 Envío de señales al drive de CA mediante un módulo salidas digitales del controlador

Un controlador tiene un módulo de salidas digitales las cuales pueden ser implementadas para enviar las señales de accionamiento al variador mediante una programación establecida del módulo. La Figura 2-3 muestra el esquema de cableado de esta propuesta de solución.

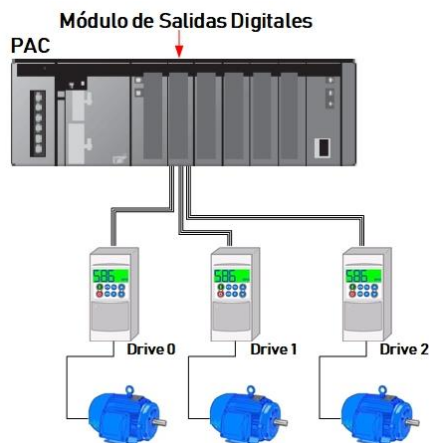


Figura 2-3. Envío de señales al variador mediante un módulo de salidas digitales

Como se explicó anteriormente se necesitan 7 señales por variador, el sistema consta de 3 variadores, lo que lleva a utilizar 21 salidas digitales, esto implica un gran dimensionamiento del módulo de salidas además estas salidas pueden ser utilizadas en otra parte del proceso. La distancia también es un inconveniente, llevar este conjunto de cables hasta el lugar donde está instalado el variador pudiendo haber interferencias y caída de tensión.

La velocidad del motor debe estar monitoreada por una HMI, el variador PowerFlex 40 tiene una salida analógica que puede ser utilizada para monitorear esta variable, es necesario tener un módulo de entradas y salidas analógicas para enviar las señales de frecuencia y monitorearlas, lo que implica un dimensionamiento mayor del controlador.

2.1.3 Sistema con adaptador EtherNet/IP por drive

Debido a que el envío de señales resulta ser complicado y limitado en las alternativas de solución anteriormente descritas, se implementará un sistema con protocolos de comunicación para el envío de información y monitoreo de cada uno de los variadores.

Existen diversas compañías que presentan sus soluciones para sistemas de comunicaciones industriales, en este trabajo se implementó la tarjeta 22-COMM-E, Figura 2-4, perteneciente de la compañía Rockwell Automation. La cual permite conectar un variador de frecuencia a la red EtherNet/IP.



Figura 2-4. Adaptador EtherNet/IP 22-COMM-E

La tarjeta se instala en el variador y permite hacer un enlace con el controlador mediante el protocolo industrial EtherNet/IP. (Rockwell Automation , EtherNet/IP 22-COMM-E, 2003)

La Tabla 2-1 contienen las características de comunicación de esta tarjeta.

Tabla 2-1. Características de la tarjeta 22-COMM-E

Atributo	Especificación
Protocolo de red	EtherNet/IP
Velocidad de datos	10/100 Mbps, Full/Half Duplex
Protocolo de drive	Drive serial interface
Modos de operación	Individual/Multidrive
Nodos de red en cadena	5

La instalación típica de la tarjeta 22-COMM-E se observa la Figura 2-5, donde es una tarjeta por variador.

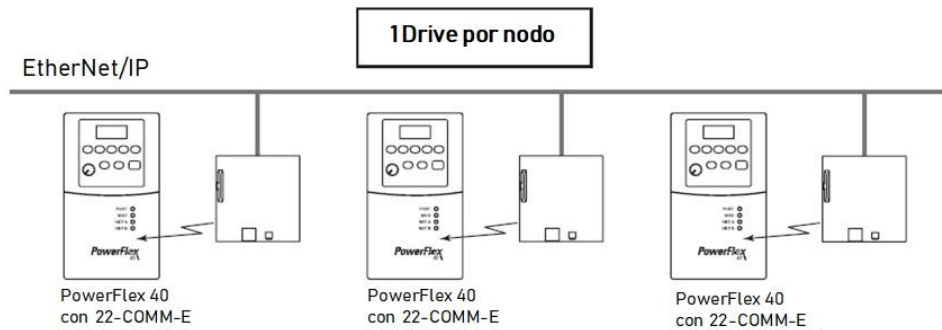


Figura 2-5. 1 Instalación típica del adaptador EtherNet/IP

El sistema a controlar consta de 3 motores, por lo que se deben configurar 3 tarjetas EtherNet/IP. La desventaja de esta implementación consiste en el número de nodos en la red EtherNet/IP y el costo de implementación.

2.1.4 Sistema multidrive con adaptador EtherNet/IP

El modo multidrive es la solución adecuada para la típica red de trabajo anteriormente descrita, en el sistema multidrive una tarjeta EtherNet/IP con un nodo de red, puede soportar hasta 5 drives (Rockwell Automation , EtherNet/IP 22-COMM-E, 2003) . La Figura 2-6 muestra la estructura de este sistema. Se observa que se integran 2 redes de comunicación.

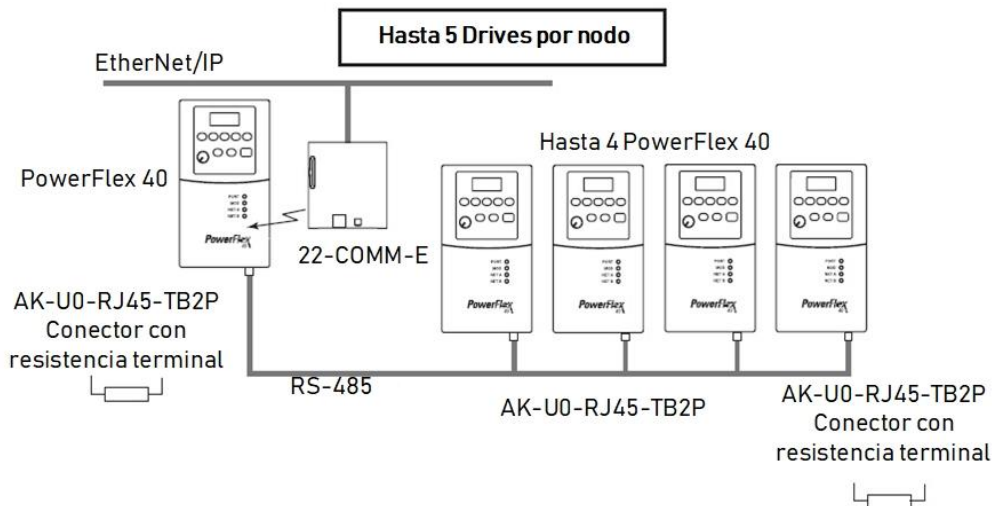


Figura 2-6. Sistema Multidrive hasta 5 variadores por nodo

La red de comunicación Ethernet/IP es enlazado mediante la tarjeta 22-COMM-E, este variador pasa a ser tipo maestro. La comunicación mediante el protocolo RS485 es en los esclavos. En el sistema multidrive se lleva a cabo un control independiente de cada motor, mediante una programación en un controlador. (Rockwell Automation , EtherNet/IP 22-COMM-E, 2003)

Dado que es el sistema a controlar tiene 3 motores, esta solución se ajusta para resolver la problemática con una tarjeta adaptador EtherNet/IP.

2.2 Selección de dispositivos de entrada

El diseño del sistema contempla la elaboración de un tablero de control donde se instala el controlador de automatización programable (PAC) y los elementos auxiliares que conforman el sistema multidrive. Debe contar con dispositivos de entrada de señales que permitan operar los variadores a distancia.

2.2.1 Dimensionamiento del número de entradas

El operador accionará el sistema mediante una botonera. Estas señales son de tipo digital y serán enviadas al controlador de automatización programable.

Las señales por cada variador son:

- Arranque
- Paro
- Sentido de giro en adelante
- Sentido de giro en reversa
- Joggeo

Siendo 5 señales por variador, el sistema consta de 3 variadores, por lo tanto, se ocupan 15 entradas digitales más una entrada para restaurar el sistema en caso de fallas, resulta un total de 16 entradas digitales.

Para enviar dichas señales se emplean pulsadores eléctricos como se observa en la Figura 2-7, estos están instalados en una botonera.



Figura 2-7. Pulsador eléctrico NA

Los botones pulsadores que se emplearon son normalmente abiertos y soportan una corriente máxima de 3 A a 24 V CD.

2.2.2 Módulo de entradas digitales 1756-IB16

La tarjeta 22-COMM-E es compatible con el sistema ControlLogix, este sistema se caracteriza por ser modular. Se implementó el módulo 1756-IB16 para recibir las señales de entrada. Este módulo debe estar en comunicación continuamente con el controlador para saber el estado actual del sistema y en base a la programación tomar decisiones.

Permite la detección de un estado activado o desactivado de un interruptor o selector, este módulo es instalado sobre el chasis y requiere un bloque de terminales extraíble RTB, por sus siglas en inglés (Removable terminal blocks) (Rockwell Automation ,

Módulos de E/S digitales ControlLogix, 2015), para conectar los cables hacia los pulsadores, como se muestra en la Figura 2-8.

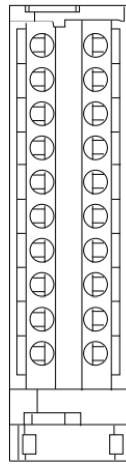


Figura 2-8. Bloque de terminales del módulo 1756-IB16

El RTB permite una interconexión flexible entre los cables provenientes de la planta y los módulos 1756 I/O, en el bloque de terminales se debe ajustar cada uno de los tornillos para que sujete el cable.

La Figura 2-9 muestra el funcionamiento del módulo.

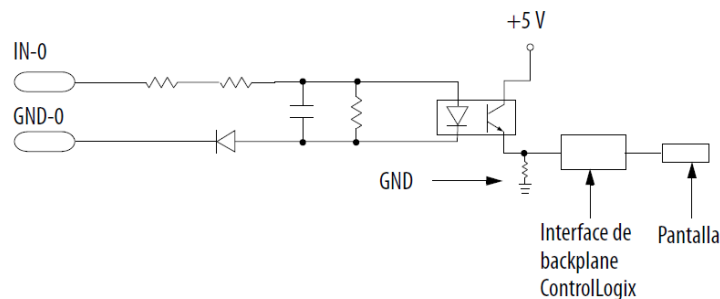


Figura 2-9. Esquema simplificado de alimentación de entradas.

La señal de entrada tiene un punto de tierra en común en este caso corresponde al punto GND-0 y la señal entra por IN-0, esta señal es enviada a un optoacoplador que hace activar un transistor haciendo pasar una señal de 5 V CD a la vez indica en la pantalla del módulo que dicha señal esta activa.

La Tabla 2-2 muestra las características técnicas del módulo.

Tabla 2-2. Especificaciones técnicas del módulo 1756-IB16

Característica	1756-IB16
Entradas	16(8 puntos/grupo)
Voltaje	12/24 CD
Entrada de voltaje nominal	24 V CD
Corriente máxima de entrada	250 mA

En base a la a Tabla 2-2, se eligió una fuente de alimentación de 24 V CD para las entradas, estos datos son importantes para mantener el módulo en un correcto funcionamiento.

2.3 Selección de dispositivos de salida

2.3.1 Dimensionamiento del número de salidas

En el tablero de control se instaló una sección de lámparas piloto que indican el estado de operación del sistema multidrive. En la Tabla 2-3, se muestran las señales que se utilizaron como salida.

Tabla 2-3. Número de salidas digitales

Señal digital de salida	Cantidad
Sistema en falla	1
Variador listo	3
Modo manual	1
Modo automático	1

Se tienen un total de 6 salidas digitales que se instalaron, se decidió elegir un módulo con más entradas como tolerancia en caso de una expansión en el proceso. El tipo de luz indicadora instalada se muestra en la Figura 2-10.



Figura 2-10. Luces piloto para el sistema multidrive

Las características de alimentación de la luz piloto están mostradas en la Tabla 2-4.

Tabla 2-4. Especificaciones técnicas de luz piloto

Especificación	Luz piloto
Diámetro de montaje	16 mm
Alimentación	24 V CD
Consumo de corriente	18 mA
Fuente de luz	LED

En base a la Tabla 2-4, se decidió alimentar cada lámpara a 24 V CD y se tomó en cuenta el consumo de corriente para las protecciones eléctricas que se mostraran más adelante en el diseño de circuitos de alimentación.

2.3.2 Módulo de salidas digitales 1756-OB32

El módulo 1756-OB32 es compatible con el sistema ControlLogix, consta de 32 salidas digitales en las cuales se conectan las luces piloto mediante el bloque de terminales. Este módulo se instala en el chasis del PAC y recibe una señal del controlador que es procesada mediante hardware. (Rockwell Automation , Módulos de E/S digitales ControlLogix, 2015)

La Tabla 2-5 muestra las especificaciones técnicas eléctricas de este módulo.

Tabla 2-5. Especificaciones técnicas del módulo de salidas digitales 1756-OB32

Característica	1756-OB32
Salidas	32 (16 puntos/grupo)
Voltaje	Fuente 12/24 V CD
Rango de voltaje de operación	10...31.2 V CD
Potencia total del modulo	1.58 W
Corriente máxima por salida	0.5 A

Se eligió este módulo ya que la corriente máxima por salida es de 0.5 A ajustándose a alimentar la luz piloto que demanda 18 mA.

2.3.3 Torre de señales

Para este proyecto se instaló una torre de señales, las señales visuales permiten conocer el estado de operación del variador. El modelo de la torre es LCE-302U de la compañía PATLITE, como se observa en la Figura 2-11 la torre se compone de 3 señales de luz led, cuando las salida del variador alcanza el valor de frecuencia enviado por red de comunicación se enciende la luz verde de lo contrario está encendida la luz azul. Esta torre es conectada a las salidas a relevador del variador.



Figura 2-11. Torre de señales de 3 niveles

La Tabla 2-6 contiene las características técnicas de la torre indicadora, estos datos permiten conocer el modo de instalación y alimentación.

Tabla 2-6. Especificaciones técnicas de la torre de señales LCE-302U

Característica	Especificación
Dimensión	40 mm de diámetro
Voltaje nominal de operación	24 V CD/V CA (50/60 Hz)
Rango de voltaje de operación	± 10% Voltaje nominal
Señal de corriente	Rojo: 27.5 mA Ámbar: 27.2 mA Verde: 15.2 mA
Potencia de consumo	3.0 W

Debido a que el variador PowerFlex 40 tiene una salida a relevador y una fuente de alimentación de 24 V CD se puede alimentar e instalar fácilmente la torre de señales sin necesidad de instalar otra fuente de alimentación.

2.3.4 Elementos finales de control

Como se explicó anteriormente el sistema está compuesto por 3 bandas transportadoras, el elemento final que permite mover el mecanismo de la banda es un motor de inducción. Estos motores se encuentran en el laboratorio B11 de manipuladores industriales lo que nos permite hacer una simulación del sistema. Las características de los motores están en la placa de datos del motor la Tabla 2-7, Tabla 2-8 y Tabla 2-9 contienen estos datos.

Tabla 2-7. Datos del motor 0

Fases	3
Potencia	0.5 Hp
Frecuencia de alimentación	60 Hz
RPM	3450
Voltaje	208-230 V CA
Corriente	2.2 A

Tabla 2-8. Datos del motor 1

Fases	3
Potencia	0.18 kw
Frecuencia de alimentación	50 Hz
RPM	1370
Voltaje	220-240 V CA
Corriente	1.3 A

Tabla 2-9. Datos del motor 2

Fases	3
Potencia	0.18 kw
Frecuencia de alimentación	50 Hz
RPM	1370

Voltaje	220-240 V CA
Corriente	1.4 A

Los motores son de alimentación trifásica, estos datos son importantes ya que se configuraron en el drive para poder hacer el control de velocidad.

2.4 Selección de las redes de comunicación

El sistema multidrive trabaja con la red Ethernet/IP por lo tanto es la red de comunicación que se utilizó en este proyecto, anteriormente se seleccionaron los módulos de entradas y salidas del sistema ControlLogix, este sistema usa conexiones para establecer enlaces de comunicación entre dispositivos. Los tipos de conexiones son:

- Control de los módulos locales de entradas y salidas
- Control remoto de entradas y salidas o módulos de comunicación
- Utilización de tags
- Mensajes
- Controlar acceso con RSLogix 5000
- Control de acceso con RSLinx

EtherNet/IP es un protocolo abierto de comunicación estándar que soporta en tiempo real entrada y envío de mensajes. (Rockwell Automation, Studio 5000 Logix Designer, 2018)

Se utiliza un adaptador EtherNet/IP instalado en el variador tipo maestro para hacer una comunicación con el controlador.

Cada variador tiene un puerto de comunicación serial RS485, la comunicación entre los variadores se hace mediante este protocolo de comunicación.

2.4.1 Módulo de EtherNet/IP 1756-EN2T

El módulo 1756-EN2T es el vínculo de conexión que integra cada uno de los módulos instalados en el chasis con el protocolo de comunicación EtherNet/IP, las especificaciones técnicas de este módulo están en la Tabla 2-10.

Tabla 2-10. Especificaciones técnicas del módulo 1756-EN2T

Atributo	1756-EN2T
Velocidad de comunicación EtherNet/IP	10/100 Mbps
Conexiones de comunicación Logix	256
Ancho de ranura	1 slot
Versión de RSLinx	2.51 o superior
Chasis	1756-A7
Fuente de alimentación	24 V CD
Puerto Ethernet	1

2.5 Selección del Controlador

Una vez seleccionados los dispositivos de entrada, salida y el módulo de comunicación se prosigue en la selección del controlador compatible con estos elementos.

2.5.1 ControlLogix 1756-L62

El controlador es una parte fundamental en la implementación del sistema multidrive. El sistema ControlLogix integra los módulos de entradas y salidas mediante la programación, además permite gestionar las comunicaciones mediante el protocolo industrial EtherNet/IP, envía datos del sistema para hacer un monitoreo en línea permitiendo programar un interfaz humano máquina.

El controlador a utilizar es el ControlLogix 1756-L62, la Tabla 2-11 muestra sus características y especificaciones técnicas.

Tabla 2-11. Características y especificaciones técnicas del ControlLogix 1756-L62

Característica	ControlLogix 1756-L62
Control de tareas	32 tareas 100 tareas programadas
Puerto de comunicación incluido	1 puerto RS-232 serial
Opciones de comunicación	EtherNet/IP ControlNet DeviceNet I/O Remotas
Puerto serial de comunicación	ASCII DH-485 Modbus via Logic
Conexiones del controlador máximas soportadas	250
Lenguajes de programación	Escalera Texto estructurado Diagrama de bloques de funciones
Memoria de usuario	4 MB
Potencia disipada	3.5 W
Chasis	1756-A4, 1756-A7, 1756-A10, 1756-A13, 1756-A17
Fuente de alimentación	1756-PA50, 1756-PA72, 1756-PA75, 1756-PB50, 1756-PB72, 1756-PB75

En base a los datos técnicos se eligió el chasis 1756-A7, el lenguaje de programación escalera ya que es el más utilizado industrialmente, el controlador soporta las redes de comunicación utilizadas en el sistema multidrive ajustándose a los requerimientos.

Este controlador se encuentra en el laboratorio de comunicaciones industriales B11 lo que facilita la realización de pruebas, además que es compatible con todos los elementos descritos anteriormente.

2.5.2 Chasis 1756-A7/B

El chasis es la parte en la cual se montan cada uno de los módulos que conforman el PAC, brinda un soporte mecánico y una fácil conexión a cada módulo. Se compone de 7 ranuras como se muestra en la Figura 2-12.

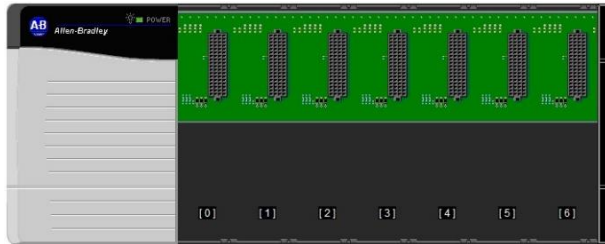


Figura 2-12. Chasis 1756-A7/B

La numeración inicia en 0 y termina en 6, la fuente de alimentación está instalada de lado izquierdo y no se cuenta como un módulo, esta proporciona la alimentación eléctrica a todos los módulos que están instalados.

Las características del chasis 1756-A7/B se muestran en la Tabla 2-12.

Tabla 2-12. Características del chasis 1756-A7/B

Características	1756-A7/B
Voltaje de alimentación	24 V CD
Corriente Máxima en chasis	2.8 A
Potencia	4.5 W
Slots	7
Dimensiones	50.8 x 60.9 x 20.3 cm
Peso	1.10 kg (2.4 lb)

La instalación de los módulos se hace de la siguiente manera, como se indica en Figura 2-13, se coloca el módulo sobre el riel de cada slot y se desliza hacia a dentro, se debe tener cuidado que los bornes de conexión del chasis embonen con las terminales de cada módulo, para asegurar que un módulo se instaló correctamente se debe revisar que las muescas de la parte superior del módulo estén trabadas con el chasis.

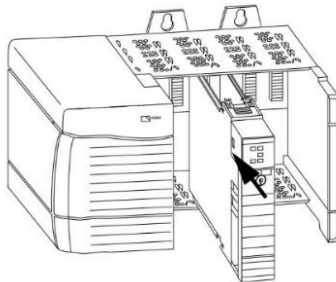


Figura 2-13. Instalación de módulos de la familia 1756 en chasis

Para el sistema de control se instalaron 5 módulos como se observa en la Figura 2-14, el procesador ocupa el primer espacio (slot 0) por recomendación del fabricante, ya que,

es la parte fundamental del sistema de control, por lo tanto, debe estar cerca a la fuente de alimentación. Los módulos de comunicación siguen en jerarquía en el orden de los slots, en el slot 1 está instalado el módulo EtherNet/IP y en el numero 2 el módulo de comunicación DeviceNet. Finalmente se instalaron los módulos de entradas y salidas digitales (slots 3 y 4). En el chasis quedan 2 slots sin utilizar, estos están protegidos con un cubrepolvo quedando como reserva a la demanda del proceso.



Figura 2-14. ControlLogix 1756-L62 instalado en chasis.

2.6 Diseño de los circuitos de alimentación

Una vez seleccionados los dispositivos de entrada, salida y controlador que se componen el sistema multidrive se desarrolló la etapa de alimentación eléctrica contemplando las protecciones correspondientes.

2.6.1 Alimentación del PAC

Para alimentar al PAC se debe energizar su fuente alimentación ya que esta se encarga de energizar a todos los módulos instalados en el chasis. La fuente de alimentación del PAC para este proyecto es el modelo 1756-PA75/B, la Tabla 2-13 muestra las características técnicas.

Tabla 2-13. Especificaciones técnicas de la fuente de alimentación 1756-PA75/B

Atributo	Especificación
Voltaje de entrada nominal	120 / 240 V CA
Rango de frecuencia de alimentación	47---63 Hz
Potencia de entrada máxima	100 VA / 100 W
Potencia de salida máxima	75 W
Tamaño cable	14 AWG

En base a la tabla anterior se decidió alimentar al PAC a 127 V CA, una fase y neutro con la respectiva conexión a tierra, la Figura 2-15 muestra esta conexión en el borne los cables color rojo son fase y neutro el cable verde es la conexión a tierra, en la Figura 2-15 también se observa que hay un interruptor para encender la fuente.



Figura 2-15. Bloque de terminales de alimentación de la fuente 1756-PA75/B

2.6.2 Alimentación del PowerFlex 40

La implementación del sistema incluye 3 variadores de diferente modelo. Los circuitos de alimentación contemplan las protecciones contra sobrecarga, para ello es necesario tener los datos de las características de alimentación de cada variador. En la Tabla 2-14, Tabla 2-15 y Tabla 2-16 se muestran las características de alimentación de cada uno de los drives.

Drive 0: **22B-B5P0N104**

Tabla 2-14. Características de alimentación y salida del Drive 0: 22B-B5P0N104

Característica	Drive 0: 22B-B5P0N104
Alimentación	3 fases ,200-240 V, 48-63 Hz
Rango de Voltaje de alimentación CA	180-264 V CA
Corriente de alimentación	5.7 A
Salida	3 fases, 0-400 Hz
Potencia de salida	0.75 KW/ 1.0 HP
Rango de voltaje de salida	0-230 V CA
Corriente de salida	5 A
Corriente de sobrecarga (60 s)	7.5 A

Drive 1: **22B-A5P0N114**

Tabla 2-15. Características de alimentación y salida del Drive 1: 22B-A5P0N114

Característica	Drive 1: 22B-A5P0N114
Alimentación	2 fases ,200-240 V, 48-63 Hz
Rango de Voltaje de alimentación CA	180-264 V CA
Corriente de alimentación	12 A
Salida	3 fases, 0-400 Hz
Potencia de salida	0.75 KW/ 1.0 HP
Rango de voltaje de salida	0-230 V CA
Corriente de salida	5 A
Corriente de sobrecarga (60 s)	7.5 A

Drive 2: **22B-A2P3N104**

Tabla 2-16. Características de alimentación y salida del Drive 1: 22B-A2P3N104

Característica	Drive 1: 22B-A5P0N114
Alimentación	2 fases ,200-240 V, 48-63 Hz
Rango de Voltaje de alimentación CA	180-264 V CA
Corriente de alimentación	6 A
Salida	3 fases, 0-400 Hz
Potencia de salida	0.4 KW/ 0.5 HP
Rango de voltaje de salida	0-230 V CA
Corriente de salida	2.3 A
Corriente de sobrecarga (60 s)	3.45 A

Selección de protección de alimentación para los variadores

Una vez conocidas las características de alimentación de cada drive se seleccionó la protección de alimentación contra cortocircuito, la Tabla 2-17 proporcionada por el fabricante muestra el valor de cada protección de acuerdo al modelo del drive y fuente de alimentación. La alimentación para este proyecto es un sistema trifásico de 220 V CA entre fase y fase.

Tabla 2-17. Características nominales del variador

Número de catálogo ⁽¹⁾	Clasificaciones de salida		Clasificaciones de entrada			Protección de circuitos de bifurcación			Disipación de potencia IP20 abierto Watts
	kW (HP)	Amps	Rango de voltajes	kVA	Amps	Fusibles	Protectores de Motor 140M	Contactores	
Entrada monofásica 100–120 VCA (±10 %) – Salida trifásica 0–230 V									
22B-V2P3x104	0.4 (0.5)	2.3	90–132	1.15	9.0	15	140M-C2E-C16	100-C12	40
22B-V5P0x104	0.75 (1.0)	5.0	90–132	2.45	20.3	35	140M-D8E-C20	100-C23	60
22B-V6P0x104	1.1 (1.5)	6.0	90–132	3.0	24.0	40	140M-F8E-C32	100-C37	80
Entrada monofásica 200–240 VCA (±10 %)⁽²⁾ – Salida trifásica 0–230 V									
22B-A2P3x104	0.4 (0.5)	2.3	180–264	1.15	6.0	10	140M-C2E-B63	100-C09	40
22B-A5P0x104	0.75 (1.0)	5.0	180–264	2.45	12.0	20	140M-C2E-C16	100-C12	60
22B-A8P0x104	1.5 (2.0)	8.0	180–264	4.0	18.0	30	140M-D8E-C20	100-C23	85
22B-A012x104	2.2 (3.0)	12.0	180–264	5.5	25.0	40	140M-F8E-C32	100-C37	125
Entrada trifásica 200–240 VCA (±10 %) – Salida trifásica 0–230 V									
22B-B2P3x104	0.4 (0.5)	2.3	180–264	1.15	2.5	6	140M-C2E-B40	100-C07	40
22B-B5P0x104	0.75 (1.0)	5.0	180–264	2.45	5.7	10	140M-C2E-C10	100-C09	60
22B-B8P0x104	1.5 (2.0)	8.0	180–264	4.0	9.5	15	140M-C2E-C16	100-C12	85
22B-B012x104	2.2 (3.0)	12.0	180–264	5.5	15.5	25	140M-C2E-C16	100-C23	125

Revisando la tabla anterior se tiene.

Drive 0: **22B-B5P0N104**

El drive 0 es alimentado a 3 fases con 220 V CA, por lo cual se instaló un fusible de 10 A.

Drive 1: 22B-A5P0N114

El fusible de protección es de 20 A.

Drive 2: 22B-A2P3N104

El fusible de protección del drive 2 es de 10 A.

Para el proyecto solo se contempla la protección contra sobrecarga, no se instaló un contactor ya que la activación se realizó de manera manual en el tablero.

Bloque de terminales de alimentación eléctrica PowerFlex 40

Es el lugar donde se lleva a cabo la conexión de la alimentación eléctrica del variador de frecuencia, este bloque de terminales es localizado en la parte inferior del variador y está protegido con una carcasa de plástico para evitar una descarga eléctrica en el usuario. La Figura 2-16 muestra el total de terminales de alimentación

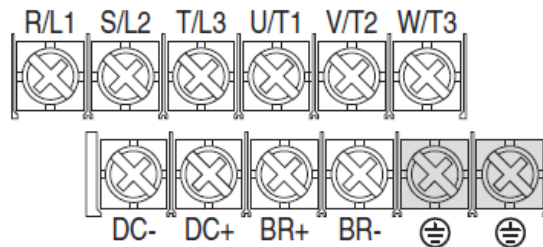
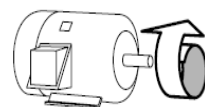


Figura 2-16. Bloque de terminales de alimentación eléctrica PowerFlex 40

La descripción de cada terminal del bloque se muestra en la Tabla 2-18.

Tabla 2-18. Descripción de bloque de terminales de alimentación PowerFlex 40

Terminal	Descripción
R/L1, S/L2	Entrada monofásica
R/L1, S/L2, T/L3	Entrada trifásica
U/T1	Al Motor U/T1
V/T2	Al Motor V/T2
W/T3	Al Motor W/T3
DC+, DC-	Conexión de bus de CC
BR+, BR-	Conexión de resistencia de freno dinámico
⊕	Conexión a tierra de seguridad -PE



Conmutar cualquier par de conductores del motor para cambiar la dirección del avance.

Se utilizó calibre 14 AWG para la conexión en el bloque de terminales del variador por recomendación del fabricante indicadas en el manual de instalación.

Puesta a tierra del variador

La puesta a tierra es una conexión conductora de electricidad ya sea de forma intencionada o accidental, entre un circuito o equipo eléctrico y la tierra o cualquier otro cuerpo conductor de electricidad que pueda sustituir a la tierra. La puesta a tierra se debe instalar para evitar riesgos de descarga eléctrica. (FLUKE, 2010)

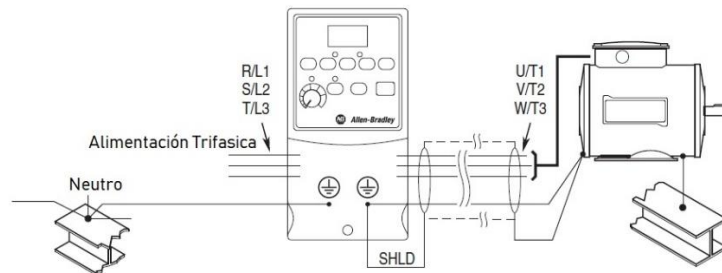


Figura 2-17. Conexión típica a tierra del PowerFlex 40

Para la puesta a tierra de cada uno de los variadores, como se indica en la Figura 2-17, la tierra debe estar en conexión con el neutro y aterrizados a una superficie metálica, en este caso fue la estructura del tablero.

2.6.3 Diagrama general de alimentación del tablero

La Figura 2-18 muestra el diagrama general de alimentación. En el tablero de control se tiene un servodrive modelo Kinetix 350 con una protección a 5 A. La protección indicada como CB5 permite energizar la fuente de alimentación del PAC, la fuente de 24 V CD para las entradas y salidas del sistema y el switch.

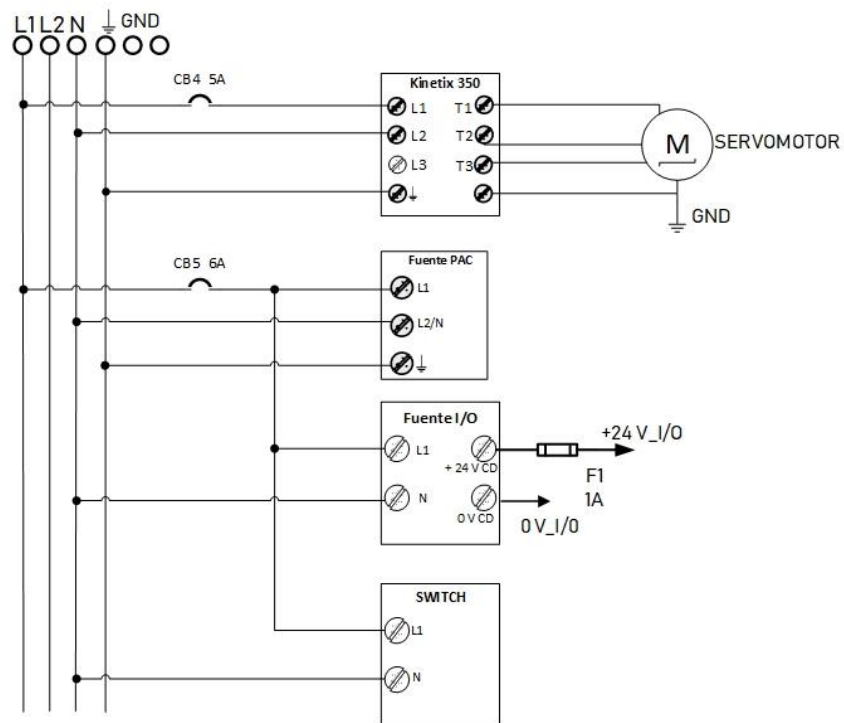


Figura 2-18. Diagrama general de alimentación.

2.6.4 Diagrama de alimentación de los variadores

La Figura 2-19 muestra los circuitos de alimentación de los variadores a un sistema de alimentación trifásico, se indica el modelo de cada drive seleccionado anteriormente.

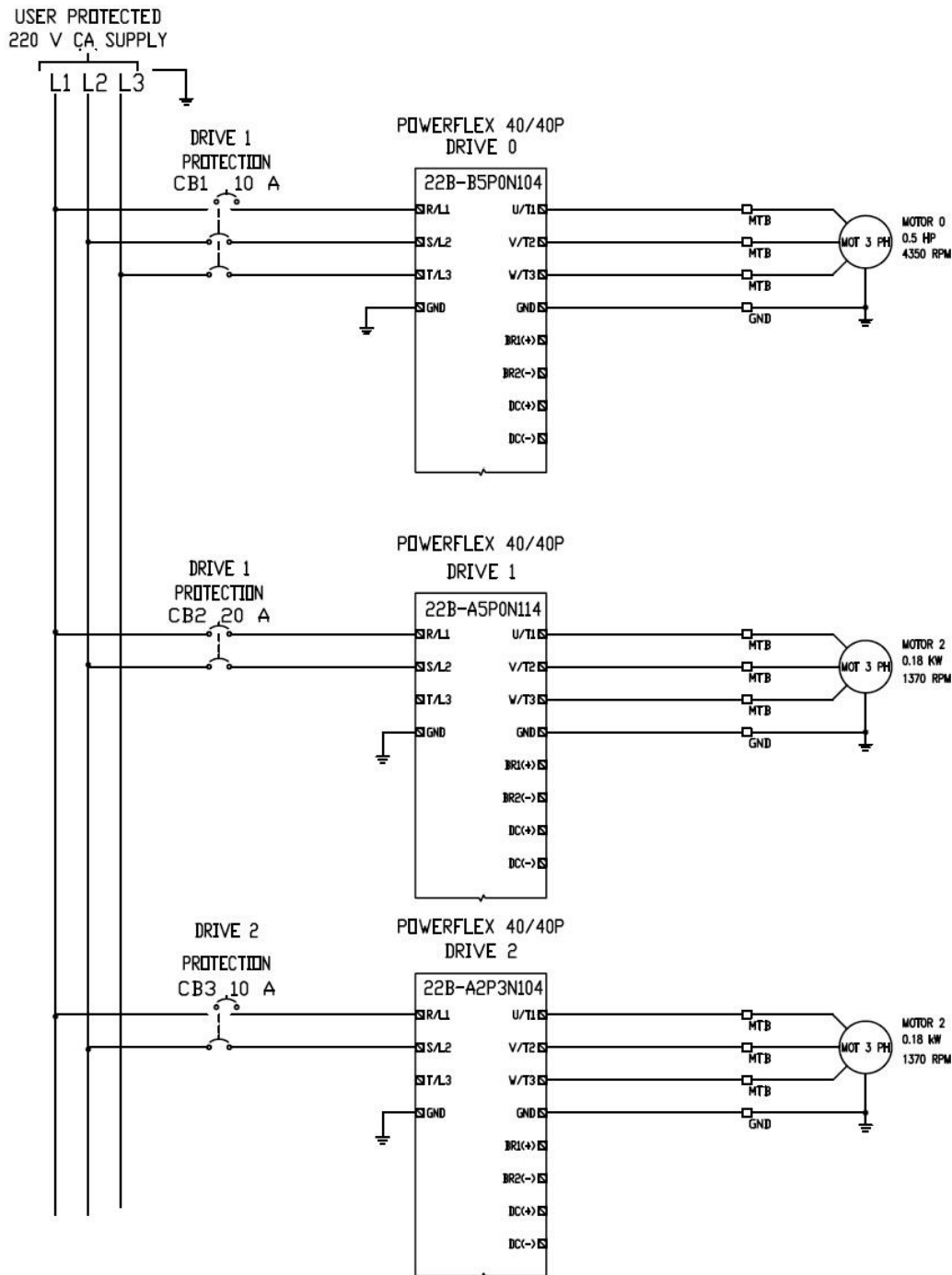


Figura 2-19. Diagrama de alimentación de los drives PowerFlex 40

Los 3 variadores están instalados en tableros diferentes. El elemento marcado como "MTB" corresponde a una clema, esta funciona como un medio flexible para conectar y detección de fallas, también se indica la conexión al motor.

2.7 Diseño de los circuitos de alimentación de entradas y salidas

Como se explicó anteriormente se tiene un módulo de entradas y salidas instalados en el chasis, en este apartado se explican los circuitos que alimentan dichas entradas y salidas, también se explica el circuito de entradas digitales en el variador de frecuencia.

2.7.1 Circuito de activación de entradas y salidas

El tablero de control tiene una estación de botones, Figura 2-20, que permite activar y desactivar la alimentación a los módulos de entradas y salidas.



Figura 2-20. Estación de botones de activación

La Figura 2-21 muestra el circuito de activación de las entradas y salidas digitales, el circuito funciona a 24 V CD. Al presionar BA se cierra el circuito permitiendo energizar las terminales del relevador de control maestro (MCR), una vez energizado el relevador conmutan sus contactos quedando enclavado el accionamiento. Al presionar BP se abre el circuito de alimentación a las terminales del relevador por lo tanto sus contactos regresan a la normalidad.

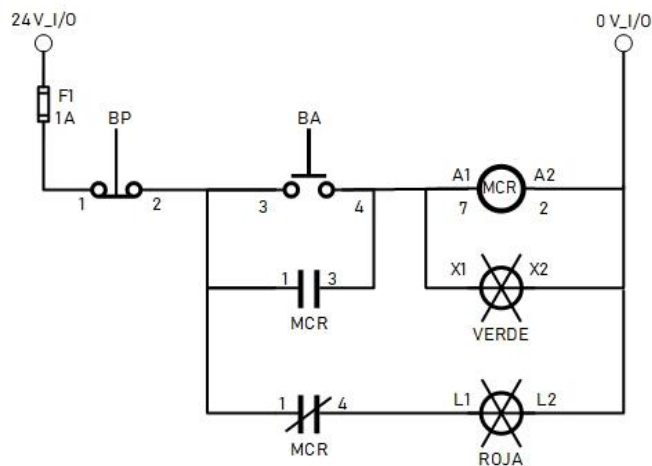


Figura 2-21. Circuito de alimentación de entradas y salidas digitales

Se instalaron las luces indicadoras para el estado de las entradas digitales, verde cuando están activadas y roja cuando están desactivadas.

El relevador de control maestro utilizado es el modelo MK2P-S de la compañía OMRON, Figura 2-22.



Figura 2-22. Relevador de control maestro modelo MK2P-S

El relevador es de 2 polos 2 tiros en la Figura 2-23 se muestra el diagrama de terminales del relevador. Como se indica en el diagrama de activación de entradas digitales la bobina se activa con las terminales 2 y 7 del relevador.

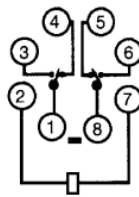


Figura 2-23. Arreglo de terminales del relevador

Como se muestra en la Figura 2-24, se utiliza el otro polo para energizar las entradas digitales, la terminal 8 se energiza a 24 V CD y la salida 6 se pone en común con todas las entradas. Se asigna a cada borne del módulo la señal correspondiente.

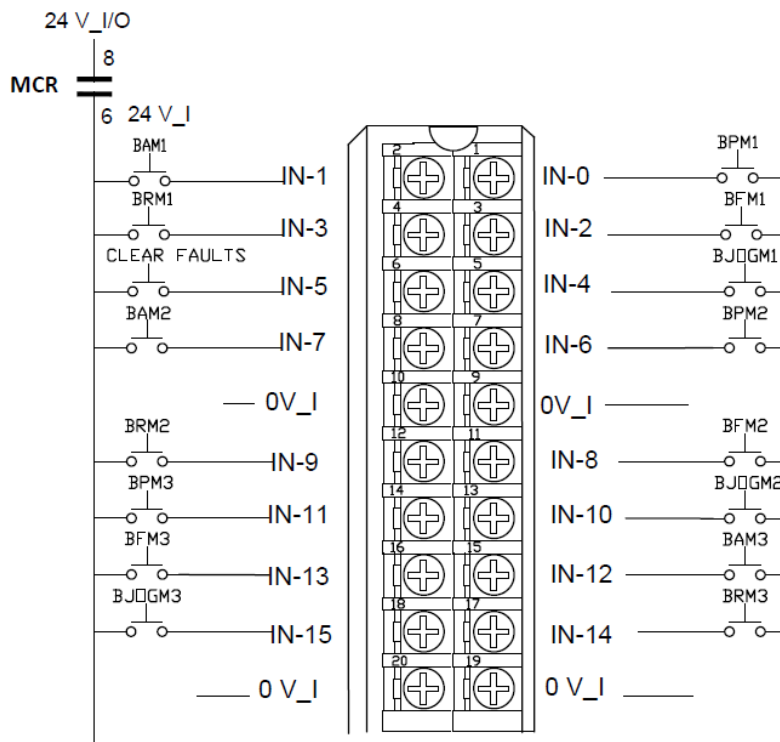


Figura 2-24. Diagrama de conexión de las entradas digitales

En la Figura 2-24 se muestra la distribución de los pulsadores eléctricos que envían una señal de entrada al controlador, en la Tabla 2-19 se describe la nomenclatura utilizada para este proyecto.

Tabla 2-19. Simbología de señales de entrada

Entrada	Función
BPM	Botón de paro del motor
BAM	Botón de arranque del motor
BFM	Botón de dirección adelante motor
BRM	Botón de dirección reversa motor
BJM	Botón de joggeo motor
BCLEAR_FAULTS	Limpiar fallas

Para energizar el módulo de salidas digitales se utilizó el mismo contacto que el de las entradas, de esta manera se activan simultáneamente las entradas y salidas. La Figura 2-25 muestra cómo se conectó la alimentación al módulo y la distribución de las luces indicadoras.

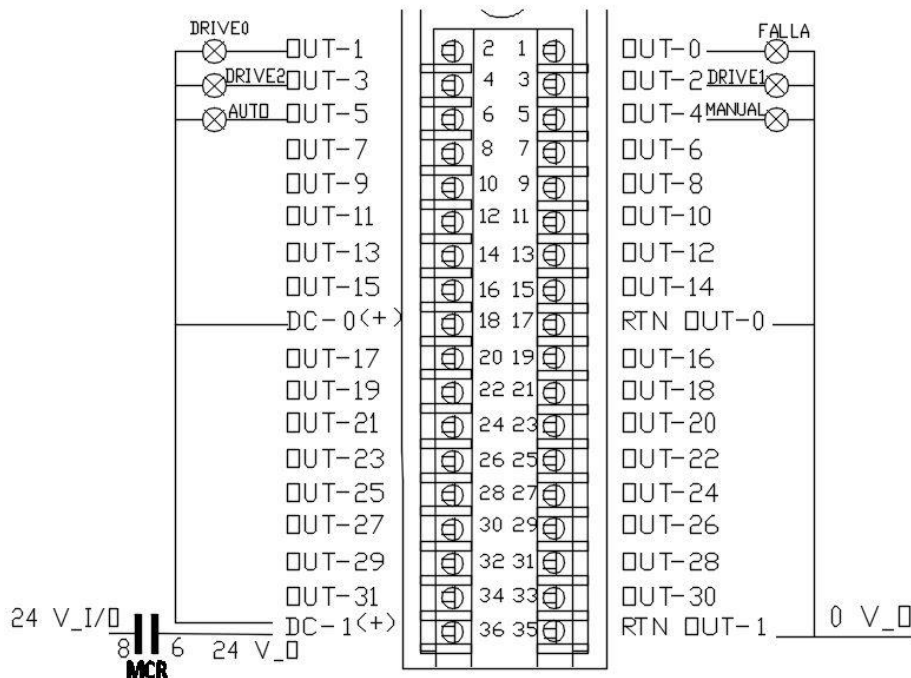


Figura 2-25. Diagrama de conexión de salidas digitales

2.7.2 Conexión de las entradas y salidas digitales al variador

Los drives instalados para este proyecto tienen un bloque de terminales de control, Figura 2-26, que mediante ciertos parámetros de configuración pueden ejecutar diversas órdenes.

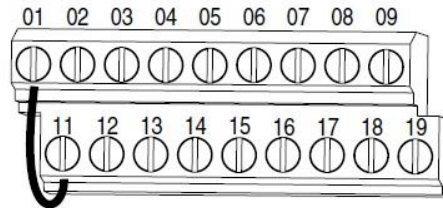


Figura 2-26. Bloque de terminales de control del PowerFlex 40

Este bloque recibe señales digitales a 24 V CD y se encuentra instalado en la parte frontal del variador, en la Figura 2-27 se muestra la función de cada terminal del bloque de control y el diagrama de conexión para las entradas que se utilizó.

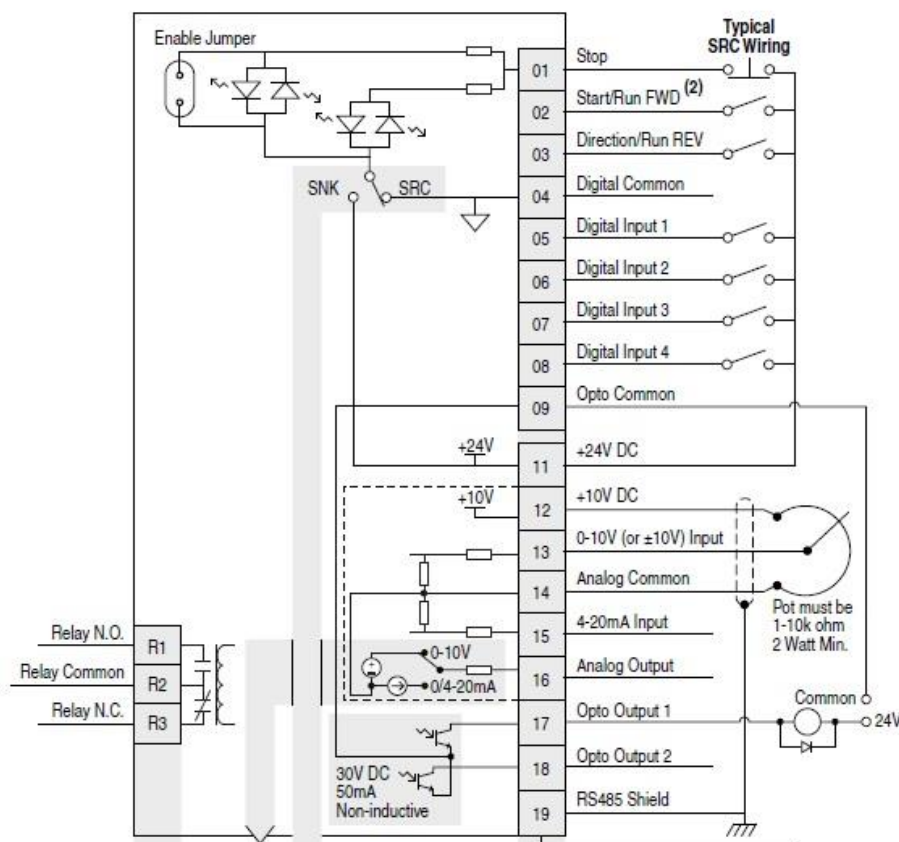


Figura 2-27. Diagrama del bloque de terminales de control del PowerFlex 40

En el desarrollo de este proyecto se eligió la configuración “Typical SRC Wiring” (Cableado típico con fuente), para ello se movió el interruptor instalado a un costado de los bornes de conexión del variador a “SRC”. Esta configuración de cableado ofrece una salida de un común a 24 V CD para todas las entradas al variador, esta salida es la número 11 como se observa en la Figura 2-27. Este común es puenteado a cada uno de los interruptores que se instalaron.

Como se observa en el diagrama de la Figura 2-27, las terminales para paro, arranque y la dirección de sentido de giro ya están predeterminadas, se instalaron 3 entradas

digitales adicionales que son configurables. La variación de velocidad se realizó mediante el protocolo de comunicación, por lo tanto, no se instaló un potenciómetro.

Se eligió una entrada de paro por inercia, en esta configuración la entrada 1 del variador debe estar energizada con 24 V CD, para que el variador pueda controlar a el motor, de lo contrario no permite arrancar el motor.

2.7.3 Conexión de torre de señales con la salida de relevador del drive

La Figura 2-28 muestra la forma en la que se alimentó a la torre de señales, revisando las especificaciones técnicas indican que se tiene que se debe a alimentar a 24 V CD y se instaló un fusible de 1 A. El diagrama de instalación indica que se necesitan contactos externos para accionar cada luz de la torre.

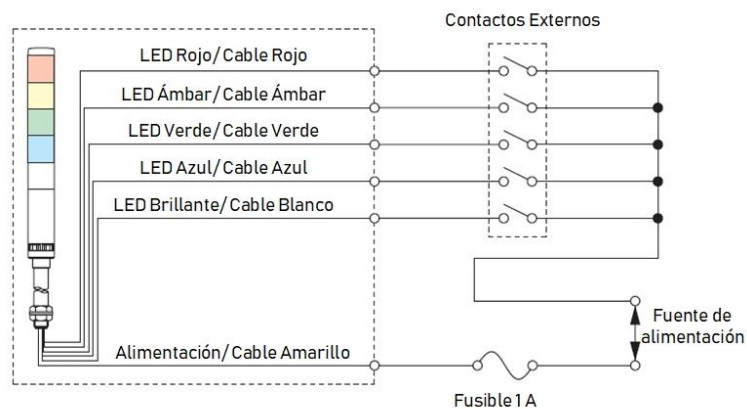


Figura 2-28. Cables de alimentación de la torre de señales

La salida a relevador del PowerFlex 40 tiene dos contactos auxiliares, Figura 2-29, estos se ocuparon para energizar la torre de señales. El contacto normalmente cerrado (N.C) se conecta a la luz azul y el contacto normalmente abierto (N.A) se conecta con la luz verde. El relevador necesita una alimentación que es el punto común, como se observó en la Figura 2-27 el PowerFlex 40 tiene una salida a 24 V CD, por lo tanto, se energiza este punto común con el borne 11.

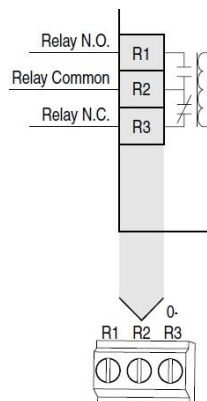


Figura 2-29. Contactos de relevador del PowerFlex 40

Finalmente, el diagrama de salidas y entradas del variador queda como se muestra en la Figura 2-30, se instalaron 6 selectores en la botonera, se instaló un paro de emergencia conectado a la entrada 1, es decir, esta entrada siempre debe estar energizada a 24 V CD.

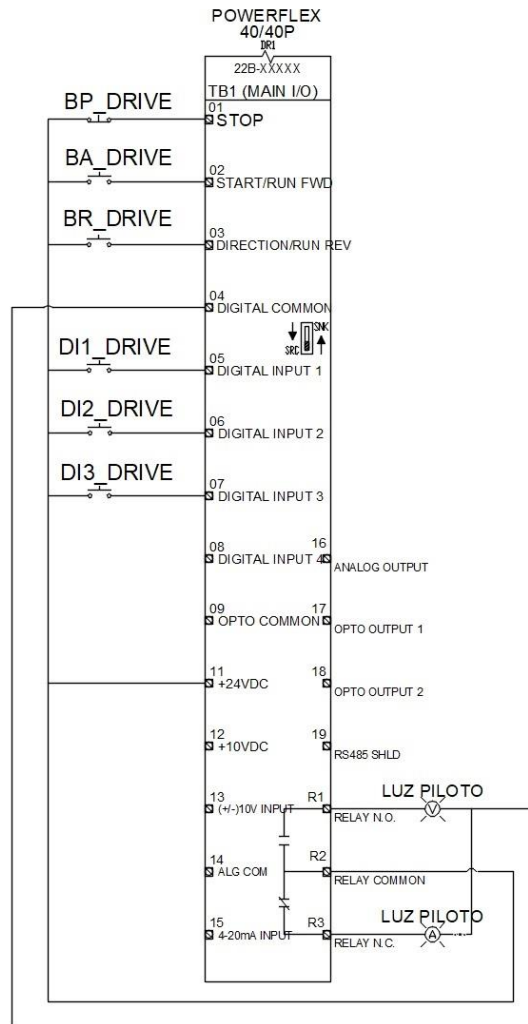


Figura 2-30. Diagrama de cableado de entradas y salidas digitales del PowerFlex 40

2.8 Diseño de la topología de red

2.8.1 Topología estrella Ethernet/IP

La topología implementada para el protocolo de comunicación EtherNet/IP es una estrella, dado que en el tablero hay diferentes dispositivos que se necesitan conectar a la red de trabajo, en la Figura 2-31 se observa la distribución de los dispositivos conectados en la red.

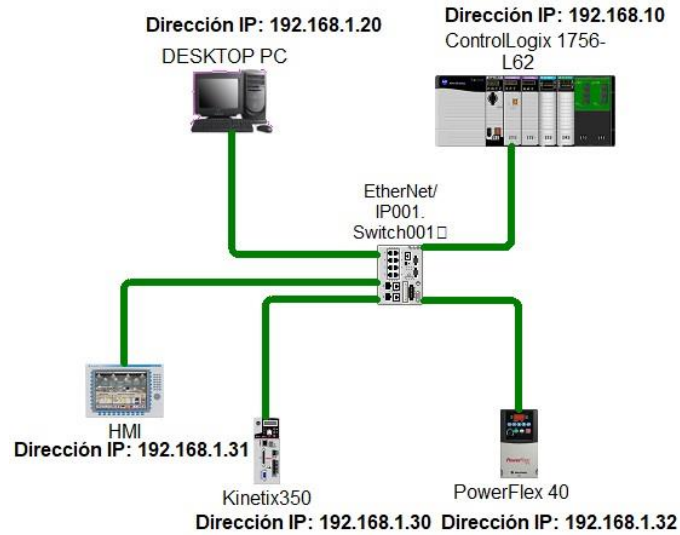


Figura 2-31. Topología estrella protocolo EtherNet/IP

Para el empleo de esta topología se instaló un switch que es el centro de concentración donde viaja la información. Como se observa en la topología se tiene el PAC, el PowerFlex 40, un kinetix 350 y una HMI. Se asignaron las direcciones IP que serán después para configurar la red de trabajo.

2.8.2 Bus RS485

La comunicación entre los variadores es mediante el protocolo de comunicación RS485, la topología es un bus como se observa en la Figura 2-32.

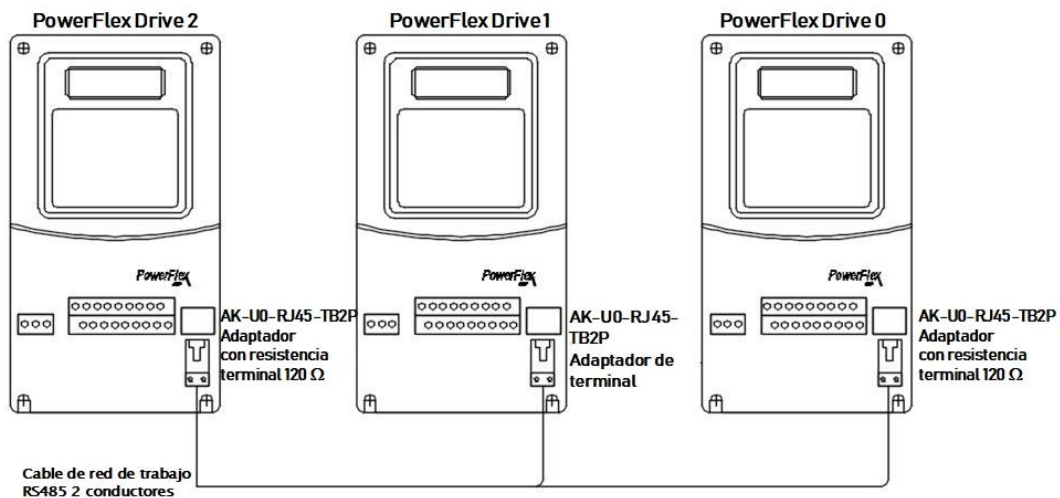


Figura 2-32. Bus de comunicación RS485 con 3 variadores

Dado que el protocolo de comunicación RS485 utiliza un voltaje diferencial se instalaron 2 resistencias en el inicio y fin del bus. Estas resistencias son de 120Ω a $\frac{1}{4}$ de Watt y está colocadas en paralelo.

El Drive 0 es donde inicia el bus, este variador tiene instalado el adaptador EtherNet/IP, siendo de tipo maestro este variador.

Las conexiones entre variadores se hicieron con el conector modelo AK-U0-RJ45-TB2P, mostrado en la Figura 2-33. Este conector tiene 2 terminales en las cuales van las señales Tx y Rx respectivamente.



Figura 2-33. Conector AK-U0-RJ45-TB2P

Se utilizó un cable utp haciendo 2 pares de 4 hilos trenzados para enviar estas 2 señales. La Figura 2-34 muestra el grupo de hilos del cable utp, se tiene 8 hilos el primer grupo está formado por los colores: verde, blanco con verde, azul, blanco con azul. El segundo grupo está formado por los colores: naranja, blanco con naranja, café, blanco con café.

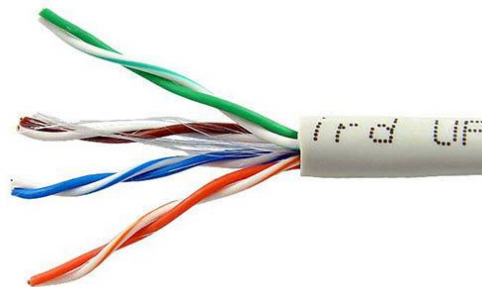


Figura 2-34. Grupo de cables UTP

2.9 Implementación

2.9.1 Instalación de la tarjeta 22-COMM-E en del drive tipo maestro

Como se indica en la Figura 2-35 para instalar el adaptador EtherNet/IP al drive tipo maestro, se quitó la tapa frontal del variador, se colocó la tarjeta atornillándola a la carcasa removida de esta manera se aterriza a tierra ya que esta tiene una placa de metal instalada. Se conectó el puerto DSI (pantalla de interfaz serial) (1), con el drive por medio del cable de interfaz (2) de la tarjeta sale el cable que se conectó al switch (3) que pertenece a la red EtherNet/IP.

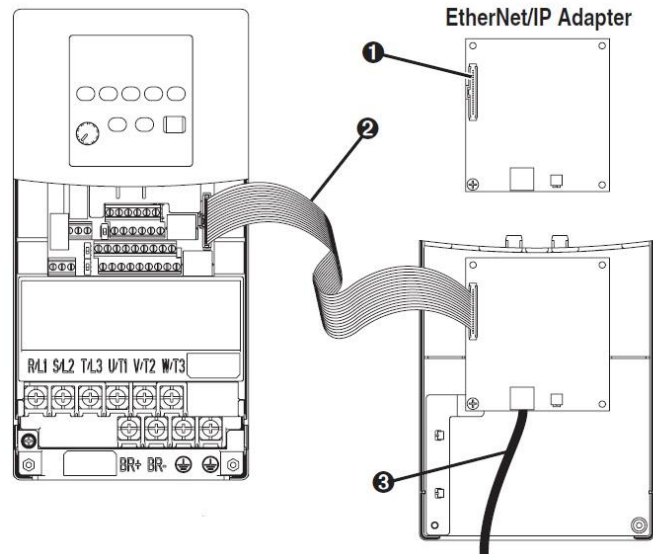


Figura 2-35. Puerto DSI y cables de interfaz internos

2.9.2 Activación de modo multidrive en la tarjeta 22-COMM-E

La tarjeta 22-COMM-E tiene un interruptor instalado, Figura 2-36, que permite ajustar entre el modo individual y multidrive de operación. El interruptor 1 debe estar hacia arriba para entrar en modo de operación multidrive. El interruptor 2 es para habilitar las páginas web en las cuales se puede monitorear datos del variador.

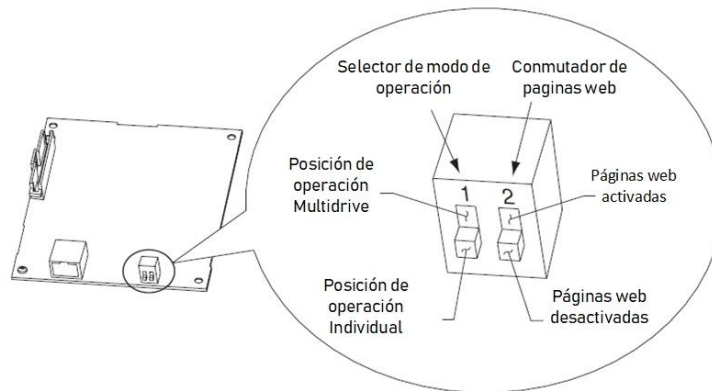


Figura 2-36. Ajuste de modo multidrive de operación.

En este proyecto se activaron tanto el modo multidrive y las páginas web, esto se lleva a cabo antes de realizar las configuraciones de software.

2.9.3 Distribución de los dispositivos en el tablero de control

Una vez que se desarrollaron los circuitos de alimentación, entradas y salidas. Se prosiguió a instalar todos los dispositivos en el tablero de control. En la Figura 2-37, se muestra la distribución de los dispositivos en el tablero.

La primera parte fue la instalación de los circuitos de alimentación en base al diagrama de la Figura 2-18, posteriormente se conectaron las entradas y salidas del controlador y por último el borne de entras y salidas del drive.

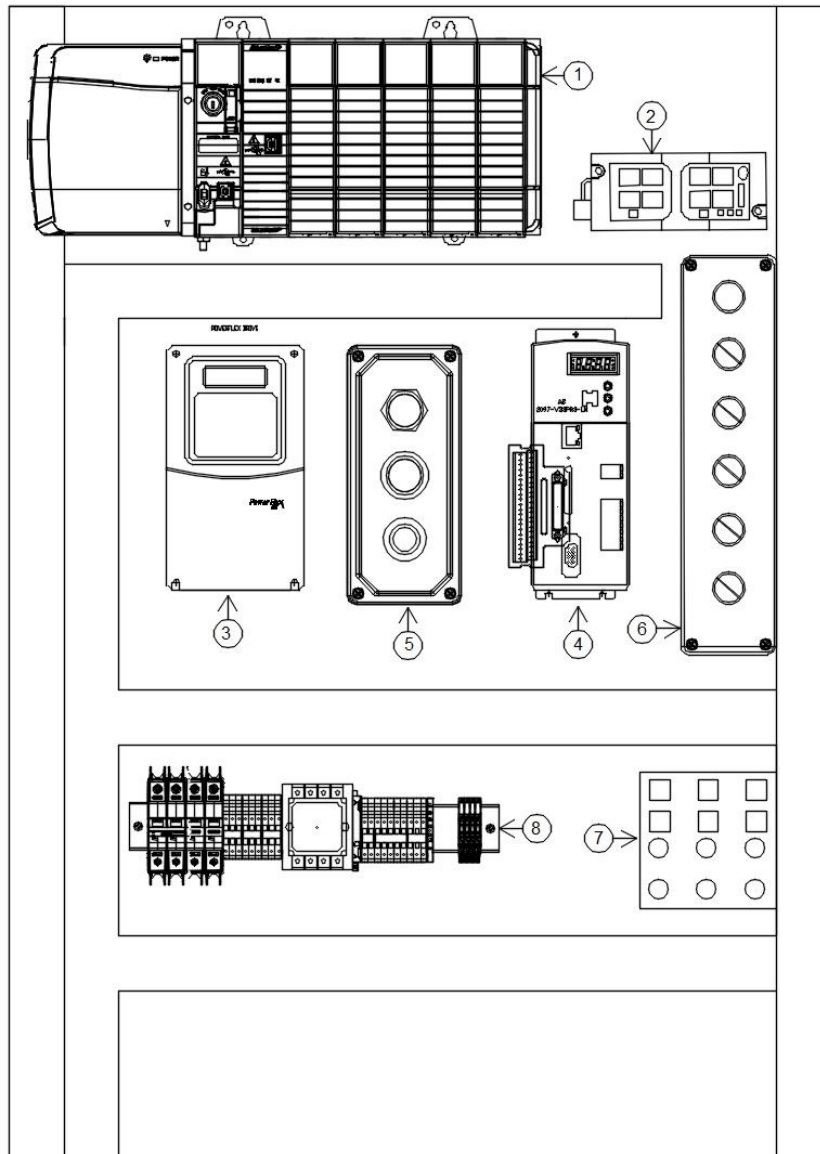


Figura 2-37. Distribución de elementos en el tablero

La Tabla 2-20 describe los elementos en base a la numeración mostrada en el tablero.

Tabla 2-20. Descripción de elementos del tablero

Ítem	Descripción
1	Controlador de automatización programable L61
2	Switch
3	PowerFlex 40
4	Kinetix 350
5	Botonera de activación de entradas digitales
6	Botonera de entradas digitales PowerFlex 40
7	Botonera de entradas al controlador y luces piloto
8	Riel de Clemas de conexión

2.9.4 Descripción del riel de clemas de conexión

Una clema es un elemento que permite hacer la conexión eléctrica de los dispositivos de una manera flexible, permitiendo tener identificada la sección de conexiones en el tablero de control. La Figura 2-38 muestra la distribución de las conexiones, las etiquetas utilizadas en cada borne corresponden a las asignadas en los diagramas de alimentación de dispositivos y de la activación de las entradas y salidas.

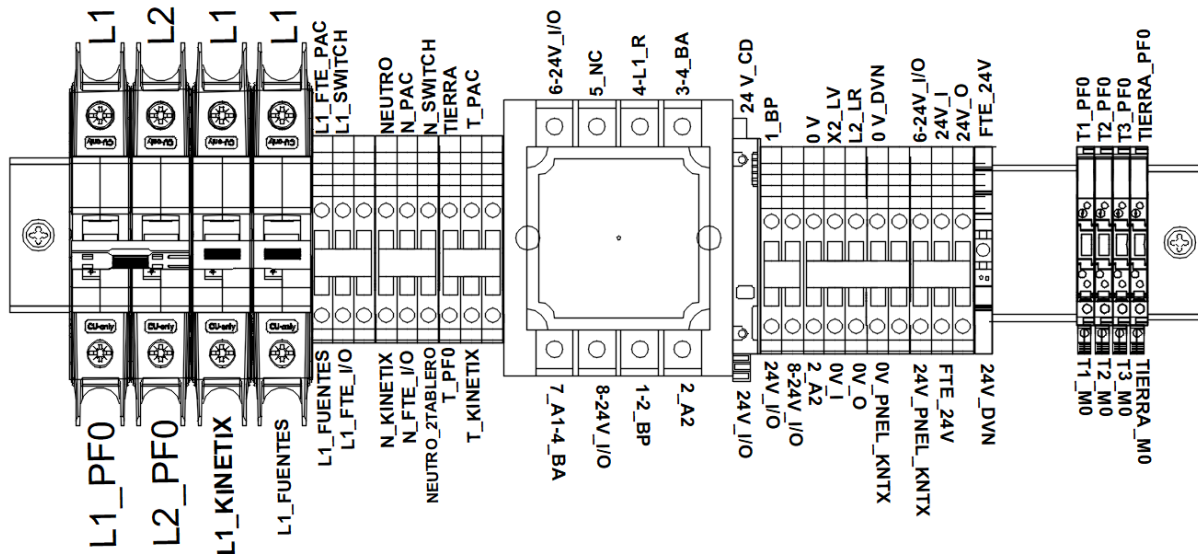


Figura 2-38. Riel de clemas de conexión

En primer lugar, se encuentran los interruptores termo-magnéticos de alimentación del variador, servodrive y fuentes de alimentación. De lado izquierdo se instaló la parte de alimentación corriente alterna. En elemento central está el relevador de control maestro, y de la parte derecha se instalaron las conexiones de corriente directa. Al final del riel se tienen las clemas de conexión de la salida del variador a las terminales de alimentación del motor.

2.9.5 Accionamiento del tablero de control

La Figura 2-39 muestra la instalación del tablero terminada, posteriormente se realizaron las siguientes pruebas para verificar la correcta conexión de los equipos.



Figura 2-39. Tablero de control instalado

Antes de energizar el tablero se comprobó la continuidad de las conexiones, esto con la finalidad de detectar un falso contacto en los cables, o el contacto de las líneas de alimentación causando un cortocircuito. Esto se llevó a cabo en las clemas de conexión con el multímetro, se colocó una punta del multímetro en la clema que tiene la alimentación y la otra punta en los bornes de alimentación de los dispositivos.

Una vez verificada la continuidad se energizó el tablero para hacer la prueba de medida de tensión, se midió el voltaje de alimentación antes de los interruptores de accionamiento. Verificando que hay 2 líneas de alimentación. Posteriormente se accionaron los interruptores de alimentación, de esta manera se energizaron las clemas de conexión. En la Figura 2-40 se muestran los resultados obtenidos con el multímetro. Los resultados fueron 229.4 V CA entre línea y línea, 132 V CA entre línea y neutro, 24.2 V CD de la fuente de alimentación de las entradas y salidas.



Figura 2-40. Mediciones de voltaje en tablero

Una vez medido el voltaje de alimentación en cada uno de los interruptores correspondiente a los dispositivos, se energizó el tablero, se observó que encendió el controlador y los componentes del tablero. Por lo tanto, el tablero está listo para las configuraciones mediante software.

2.9.6 Instalación de las redes

Una vez accionado el tablero de control se armó la topología tipo estrella en el switch, un cable utp se conectó de la tarjeta de red a una entrada del switch, posteriormente se conectó el modulo EtherNet/IP al switch junto con los servodrive.

Para el bus RS485 una vez armado el cable trenzado se conectaron los RJ45 en cada drive, para verificar que el incluye a los 3 drives se midió la resistencia, dado que se instalaron dos resistencias de 120 Ω en paralelo, Figura 2-41, la lectura del multímetro fue 60 Ω con lo cual garantiza que el bus no tiene algún falso contacto.



Figura 2-41. Terminales del bus RS485

En la Figura 2-42 se observa la distribución de la red en los tableros de control, el tablero que se armó es el tablero que contiene el switch junto con el drive 1, hay 2 tableros auxiliares, el tablero que contiene al drive 0 el cual tiene la tarjeta 22-COMM-E, y el tablero con el drive 2 donde termina el bus de RS485. La línea roja representa la red EtherNet/IP y la línea amarilla representa el bus RS485, los tableros se accionaron para llevar a cabo la configuración y programación.

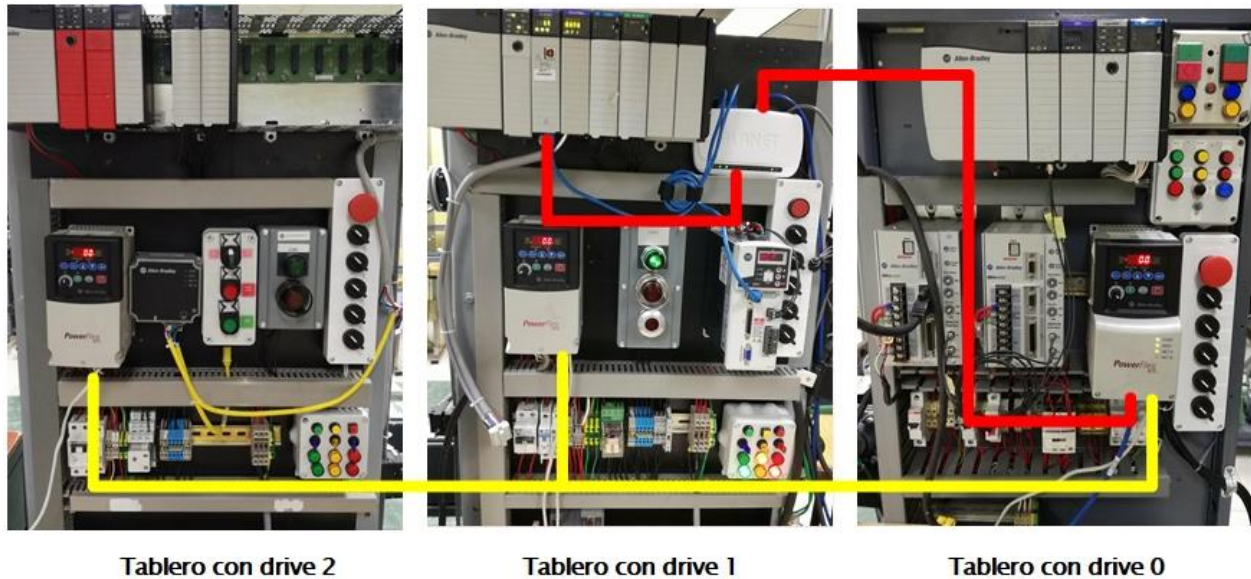


Figura 2-42. Distribución de la red en los tableros de control

CAPÍTULO 3. CONFIGURACIÓN Y PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

En este capítulo se llevan a cabo las respectivas configuraciones de comunicación para el sistema multidrive y la programación de las secuencias en el software RSLogix 5000 junto con la elaboración de la HMI.

3.1 Configuraciones de la red EtherNet/IP

Una vez descrita la topología a utilizar se configuraron todos los dispositivos conectados a la red EtherNet/IP, en este apartado se describen los procedimientos y configuraciones efectuadas para este protocolo.

3.1.1 Asignación de dirección IP de la computadora

Para asignar la dirección IP se ingresó al panel de control de Windows, redes e internet y conexiones de red, en conexiones de red se muestran las tarjetas de red disponibles, como se observa en la Figura 3-1. Se seleccionó conexión de área local, dentro de sus propiedades, se eligió el protocolo de Internet versión 4 (TCP/IPv4). La dirección IP asignada es: 192.168.1.20 y por defecto la máscara de subred es: 255.255.255.0

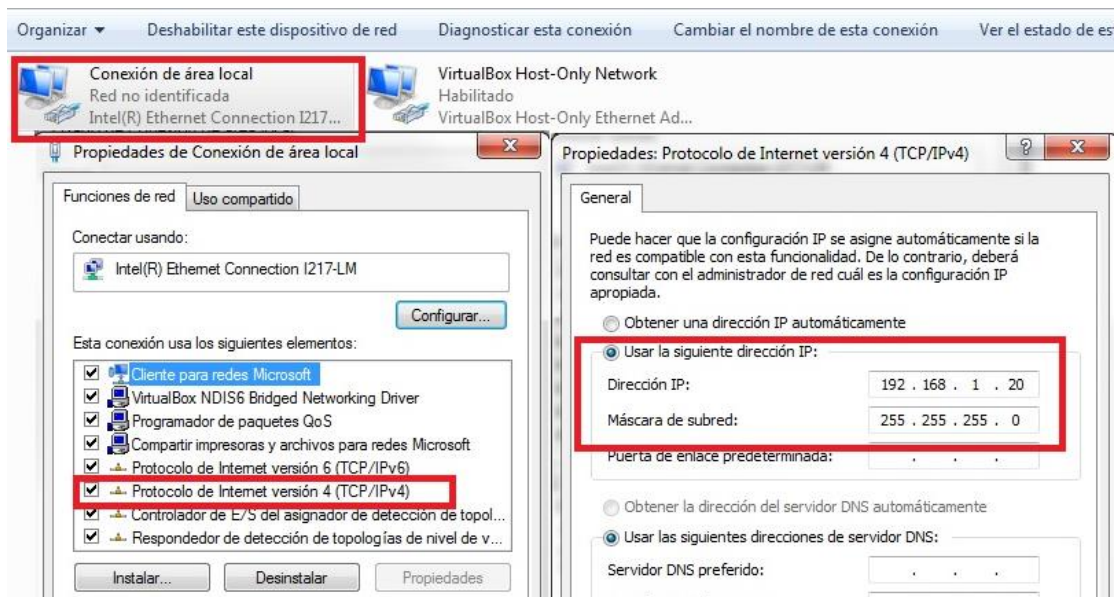


Figura 3-1. Conexión de área local

3.1.2 Asignación IP al módulo 1756-EN2T y a la tarjeta 22-COMM-E

La asignación de la dirección IP a estos dispositivos se realizó con el software BOOTP-DHCP server, este software muestra las direcciones MAC (control de acceso al medio) de cada dispositivo.

La asignación de IP fue de tipo estática, es decir, la dirección permanece de manera permanente aun si los dispositivos se apagan, es de tipo privada.

La dirección asignada para el módulo 1756-EN2T es: 192.168.1.10

La dirección asignada para la tarjeta 22-COMM-E es: 192.168.1.32

3.1.3 Configuración del driver de comunicación RSLinx Classic

RSLinx Classic para redes y dispositivos de Rockwell Automation es una solución completa para comunicaciones industriales que puede ser utilizada en el sistema operativo Windows. Permite que el controlador programable Allen-Bradley acceda a una amplia variedad de aplicaciones de Rockwell Software y Allen-Bradley estas aplicaciones

son de configuración, diagnóstico, programación y diseño de HMI. (Rockwell Automation, 2008)

Para iniciar una nueva configuración una vez abierta la aplicación en la barra de menús, se seleccionó la pestaña Communications y configure drivers como se ilustra en la Figura 3-2.

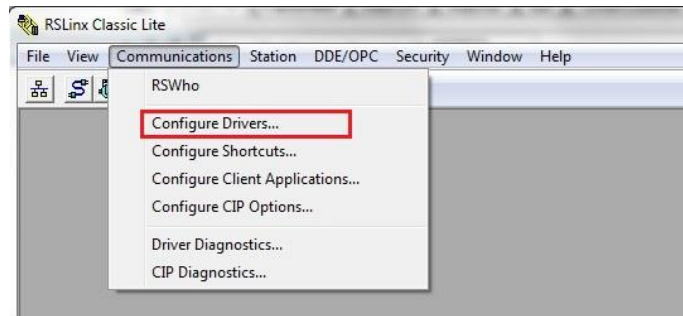


Figura 3-2. Menú Communications

Aparece la ventana de la Figura 3-3, en el menú desplegable de la sección “Available Driver Types” se seleccionó la opción EtherNet/IP Driver y posteriormente Add New.

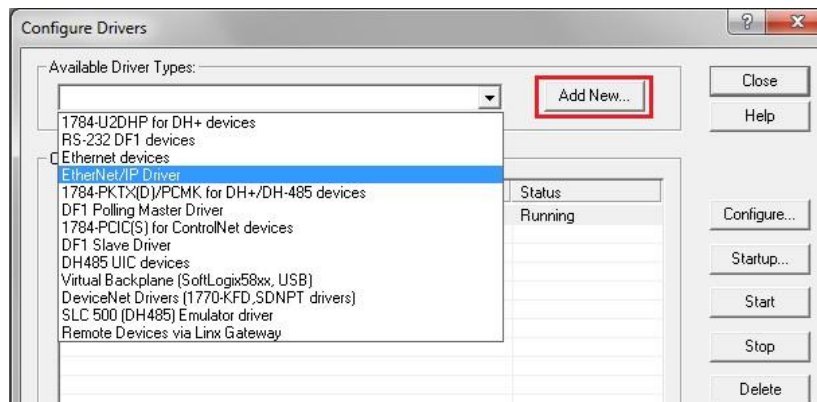


Figura 3-3. Nueva configuración de driver

La Figura 3-3 muestra la ventana para asignar el nombre para el nuevo driver, el nombre asignado es: AB_ETHIP-1.

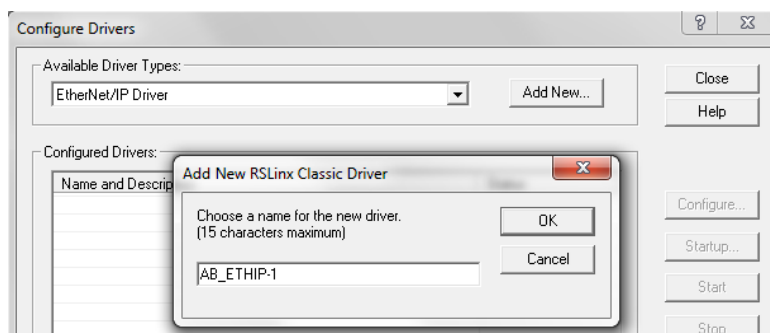


Figura 3-4. Nombre para nuevo driver

En el diálogo de configuración del driver, Figura 3-5, se seleccionó la opción Browse Local Subnet, en este apartado se seleccionó la tarjeta de red con la dirección IP anteriormente asignada (192.168.1.20) .

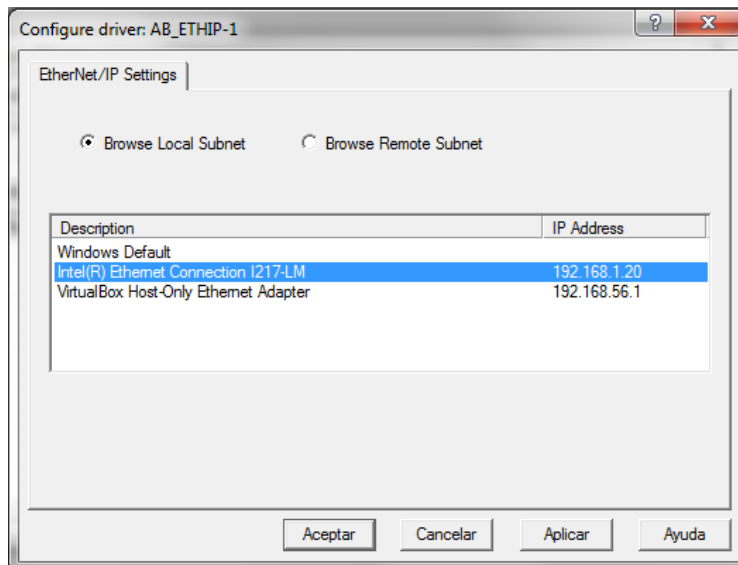


Figura 3-5. Asignación de configuración a tarjeta de red

La nueva configuración empezó a correr, para verificar que se aplicó correctamente, en la opción RSWho se puede ver la red anteriormente configurada. Como se ve en la Figura 3-6, la red comienza con el módulo 1756-EN2T que hace el enlace con el PAC, se observa el chasis 1756-A7 donde está montado el CPU 1756-L62, consecutivamente los módulos de Ethernet, entradas y salidas digitales. La tarjeta 22-COMM E aparece como dispositivo externo.

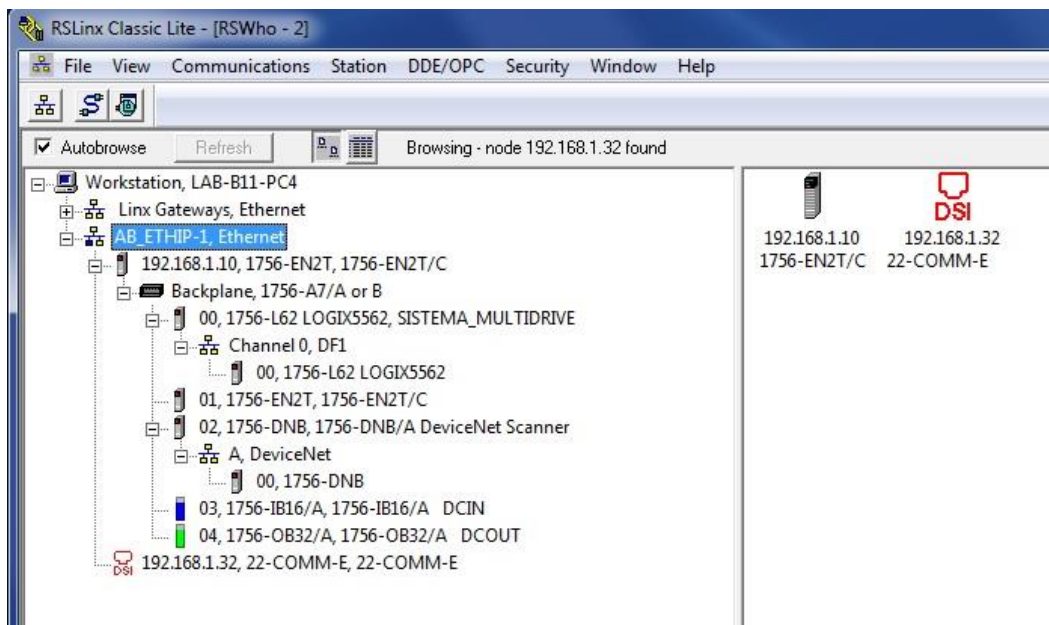


Figura 3-6. Red AB_ETHIP-1 EtherNet/IP

Ahora los dispositivos están listos para utilizarse en otras aplicaciones de configuración y programación, si llegará a fallar la comunicación entre dispositivos, RSLinx ofrece la facilidad de conocer el estado de la red. Esta configuración del proyecto está cargada al controlador y ya no es necesario volverse a realizar a menos que se cambien las direcciones IP.

3.2 Configuración del estándar RS485

3.2.1 Parámetros de comunicación de los variadores conectados en cadena

Para que el sistema trabaje en modo multidrive se configuraron ciertos parámetros en los variadores que se conectaron en red mediante RS485, la lista de parámetros están en la Tabla 3-1, estos parámetros se ingresaron mediante el panel de operación básico instalado en la parte frontal del variador.

Tabla 3-1. Lista de parámetros para variadores conectados en cadena

Parámetro	Valor
P36 (Fuente de inicio)	5 (Puerto de comunicación)
P38 (Referencia de velocidad)	5 (Puerto de comunicación)
A103 (Velocidad de datos de comunicación)	4 ("19.2 K")
A104 (Dirección de nodo de comunicación)	1-247 (Debe ser único)
A107 (Formato de comunicación)	0 ("RTU 8-N-1")

El funcionamiento del panel básico de operación se muestra en la Figura 3-7.

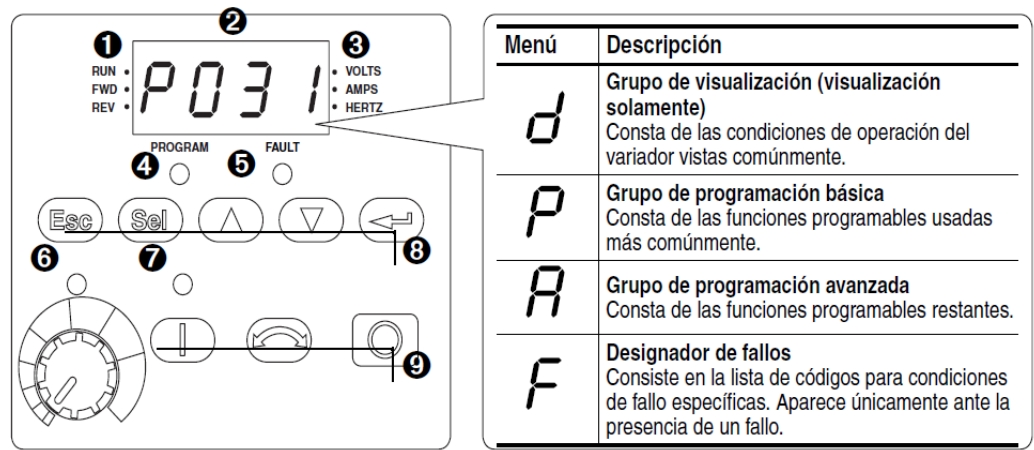






Figura 3-7. Panel básico de operación del PowerFlex 40

La descripción de los elementos del panel de operación se muestra en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2. Descripción de los elementos del panel básico de operación

No.	Indicador LED	Est. indic. LED	Descripción
❶	Estado de marcha/dirección	Rojo fijo	Indica que el variador está funcionando y ha emitido la orden de dirección del motor.
		Rojo parpadeante	El variador ha recibido la orden de cambiar de dirección. Indica la dirección actual del motor mientras desacelera hasta cero.
❷	Pantalla alfanumérica	Rojo fijo	Indica el número de parám., el valor del parám. o el código de fallo.
		Rojo parpadeante	El dígito único parpadeante indica que dicho dígito puede editarse. Todos los dígitos parpadeantes indican una condición de fallo.
❸	Unid. mostradas	Rojo fijo	Indica las unidades del valor del parámetros mostrado.
❹	Estado de programación	Rojo fijo	Indica que el valor del parámetro puede cambiarse.
❺	Estado de fallo	Rojo parpad.	Indica que el variador tiene un fallo.
❻	Estado potencióm.	Verde fijo	Indica que el potenciómetro en el teclado integral está activo. ⁽¹⁾
❼	Estado de la tecla de inicio	Verde fijo	Indica que la tecla de Arranque en el teclado integral está activa. La tecla de Retroceso también está activa, a menos que haya sido inhabilitada por A095 [Reverse Disable].
No.	Tecla	Nombre	Descripción
❸		Escape	Retroceder un paso en el menú de programación. Cancelar un cambio de un valor de parámetro y salir del modo de programación.
		Select	Avanzar un paso en el menú de programación. Seleccionar un dígito cuando se ve un valor de parámetro.
		Up Arrow Down Arrow	Desplazarse por los grupos y parámetros. Aumentar/disminuir el valor de un dígito parpadeante. Se usa para ajustar la frecuencia de los variadores con clasificación IP66, NEMA/UL Tipo 4X <i>solamente</i> cuando se muestra un parámetro del grupo de visualización y P038 [Speed Reference] se establece en la frecuencia interna, A069 [Internal Freq].
		Enter	Avanzar un paso en el menú de programación. Guardar un cambio a un valor de parámetro.

La señal de inicio y velocidad son enviados mediante una señal del protocolo RS485, esta red trabaja a 19.2 K baudios, 8 bits de datos no paridad y 1 bit de parada.

Un parámetro importante es el A104, indica el número de nodo de conexión estos números no deben repetirse para evitar conflictos en la red. Para este proyecto se asignaron los siguientes números:

Drive 0: 100

Drive 1: 101

Drive 2: 102

3.2.2 Configuración de la tarjeta 22-COMM-E en modo multidrive en el software Connected Components Workbench

El software Connected Components Workbench (CCW) está dedicado a la configuración de dispositivos como controladores, es compatible con variadores PowerFlex, Servovariadores Kinetix, etc. Permite integrar las tecnologías de Rockwell Automation con el sistema operativo Windows. (Rockwell Automation, Connected Components Workbench Design & Configuration Software, 2018)

Se utilizó este software para realizar la integración de los variadores previamente configurados con los parámetros de la Tabla 3-1, con la tarjeta 22-COMM-E en un sistema multidrive para después ser utilizado en aplicaciones de programación.

Para ello se creó un proyecto nuevo en el software Connected Components Workbench, en la Figura 3-8 se observa el cuadro de diálogo donde se indica el nombre del proyecto que es “Sistema_Multidrive” y la dirección donde se guardó el proyecto.

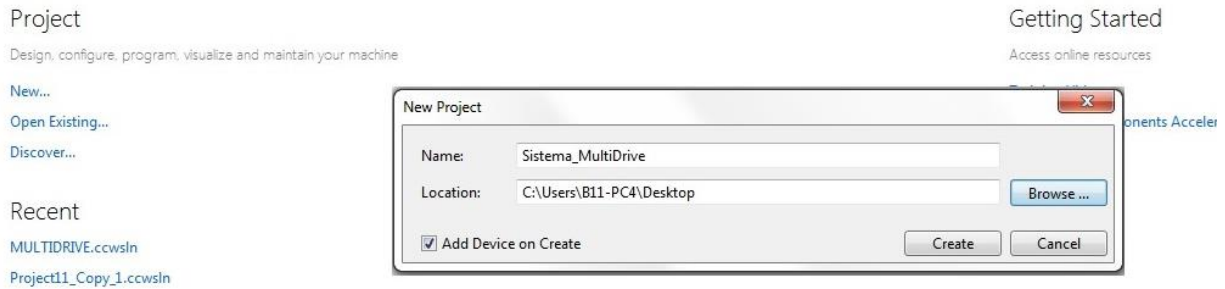


Figura 3-8. Proyecto Multidrive en CCW

Una vez creado el proyecto se añadieron los dispositivos con los cuales se trabajó. El software tiene una caja con la lista de dispositivos soportados, para acceder a ella en la barra de menús se eligió la opción view cuando se despliegan las opciones se seleccionó “Device Toolbox” como se indica en la Figura 3-9.

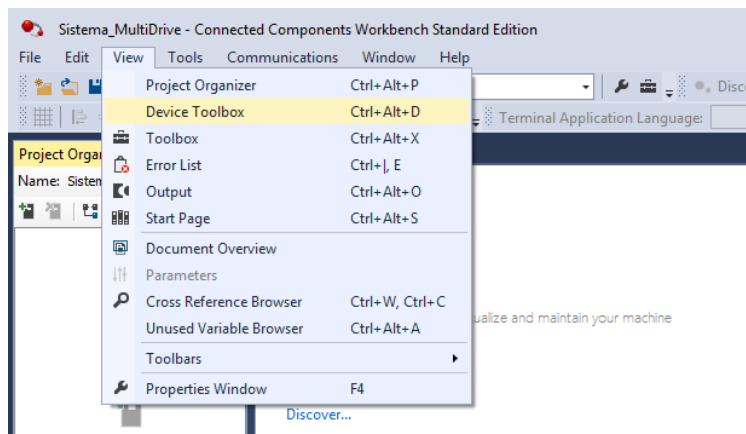


Figura 3-9. Acceso a Device Toolbox

En la ventana Device Toolbox aparecen todos los dispositivos soportados para configurar, dentro de esta pestaña se eligió el grupo catálogo apareciendo por carpetas los dispositivos. En la carpeta de drives se eligió la tarjeta multidrive 22-COMM-E, ya que esta tarjeta es la que se instaló en el drive tipo maestro. La Figura 3-10 muestra cómo una vez seleccionada la tarjeta se debe arrastrar dicha tarjeta a la ventana de organizador de proyecto.

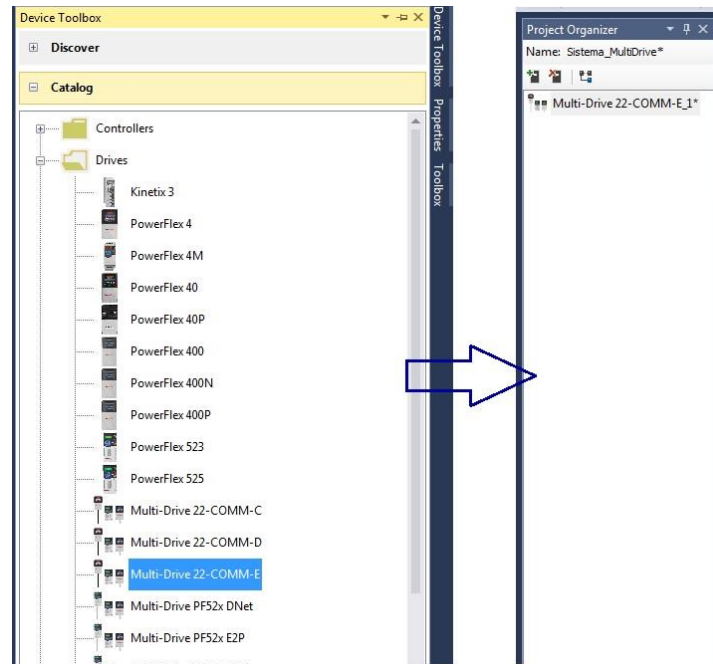


Figura 3-10. Asignación de la tarjeta Multidrive 22-COMM-E al proyecto en CCW

Una vez añadida la tarjeta en el proyecto, como se observa en la Figura 3-7, aparece el tipo de serie en este caso es serie A, no tiene algún status ya que la tarjeta en si está en blanco no tiene alguna configuración. Para vincular la tarje da clic en parámetros.

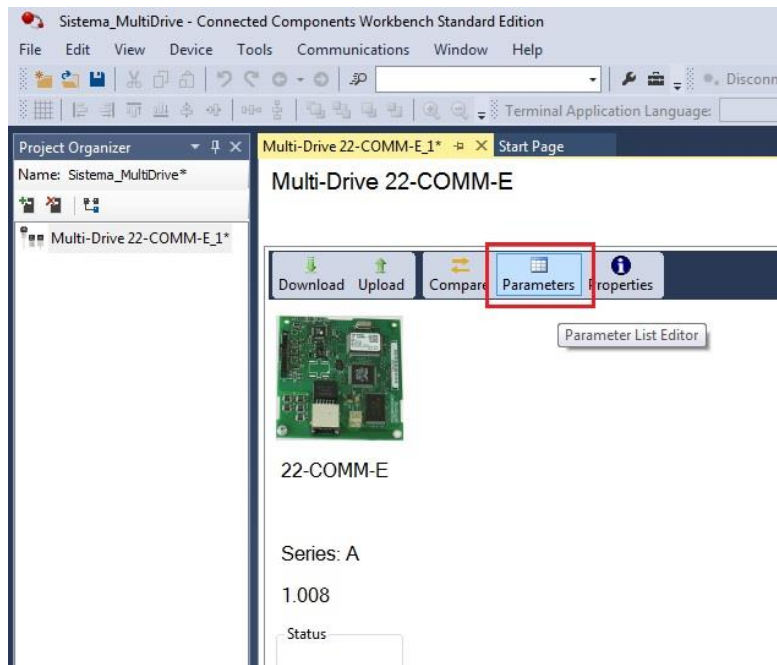


Figura 3-11. Tarjeta 22-COMM-E en la ventana de trabajo del CCW

La lista de parámetros de la tarjeta multidrive 22-COMM-E se muestra en la Figura 3-12, por defecto la tarjeta está en modo “Single Drv” la cual es una tarjeta por variador, este

parámetro se cambió a modo “Multiple Drv” para que funcione en modo multidrive. Con esta configuración la tarjeta soporta hasta 5 drives.

El parámetro número 22 “DSI I/O Cfg” permite indicar cuantos variadores están dependientes de la tarjeta, el valor Drv 0-2 indica 2 variadores tipo esclavo, la localidad 0 automáticamente le pertenece al variador que tiene instalada la tarjeta, por lo tanto, este valor se asignó.

Los parámetros 24,25,25 corresponden a la dirección del nodo de comunicación en el protocolo RS485 estos parámetros fueron ingresados a través del panel de cada variador correspondiendo al parámetro A104.

#	Name	Value	Units	Internal Value	Default	Min	Max
1	Mode	Multiple Drv		0	Single Drv	0	1
2	BOOTP	Enabled		1	Enabled	0	1
3	IP Addr Cfg 1	0		0	0	0	255
4	IP Addr Cfg 2	0		0	0	0	255
5	IP Addr Cfg 3	0		0	0	0	255
6	IP Addr Cfg 4	0		0	0	0	255
7	Subnet Cfg 1	0		0	0	0	255
8	Subnet Cfg 2	0		0	0	0	255
9	Subnet Cfg 3	0		0	0	0	255
10	Subnet Cfg 4	0		0	0	0	255
11	Gateway Cfg 1	0		0	0	0	255
12	Gateway Cfg 2	0		0	0	0	255
13	Gateway Cfg 3	0		0	0	0	255
14	Gateway Cfg 4	0		0	0	0	255
15	EN Rate Cfg	Autodetect		0	Autodetect	0	4
16	EN Rate Act	No Link		0	No Link	0	5
17	Reset Module	Ready		0	Ready	0	2
18	Comm Flt Action	Fault		0	Fault	0	4
19	Idle Flt Action	Fault		0	Fault	0	4
20	Flt Cfg Logic	00000000 00000000		0	00000000 00000...	0	65535
21	Flt Cfg Ref	0		0	0	0	65535
22	DSI I/O Cfg	Drv 0-2		2	Drv 0	0	4
23	DSI I/O Act	00000000 00000000		0	00000000 00000...	0	31
24	Drv 0 Addr	100		100	100	1	247
25	Drv 1 Addr	101		101	101	1	247
26	Drv 2 Addr	102		102	102	1	247
27	Drv 3 Addr	103		103	103	1	247
28	Drv 4 Addr	104		104	104	1	247
29	Web Enable	Disabled		0	Disabled	0	1

Figura 3-12. Parámetros de la tarjeta 22-COMM-E para 3 variadores

Una vez modificada la configuración de fábrica se descargó esta nueva configuración en la tarjeta, para ello se da clic en “Connect” y automáticamente se abre la ventana de buscador de conexión como se ve en la Figura 3-13, se seleccionó la tarjeta 22-COMM-E.

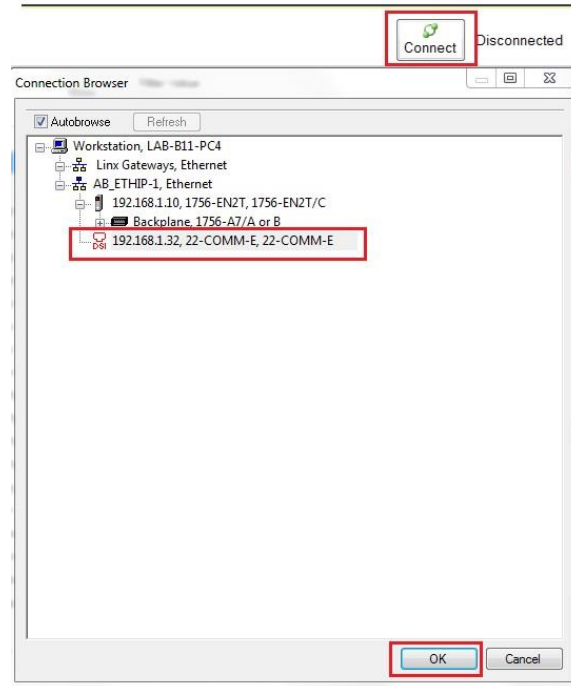


Figura 3-13. Descarga de la nueva configuración a la tarjeta 22-COMM-E

Como se muestra en la Figura 3-14 después de cargar la configuración en la tarjeta 22-COMM-E en la barra de estado localizada en la parte inferior del CCW aparecen los 3 variadores.

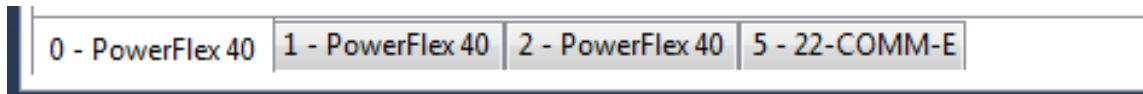


Figura 3-14. Barra de estado en CCW con 3 variadores.

3.3 Configuración de los variadores conectados en red para puesta en marcha

Los variadores ya se encuentran conectados en red, el proyecto generado en el CCW permite hacer la integración de los 3 dispositivos en conjunto. Ahora prosigue configurar cada uno de los drives en función a las características de cada uno de los motores a controlar.

3.3.1 Parametrización con datos de motor

El proyecto generado en el CCW debe estar en línea mediante la computadora y la tarjeta 22-COMM-E, la Figura 3-15 muestra que el sistema está en línea, se muestran las características del PowerFlex 40, como es la alimentación, potencia y número de serie. En la parte inferior izquierda están las pestañas para acceder a cada variador añadido al proyecto.

Para acceder a la configuración del drive se da clic en el icono de “wizards”.

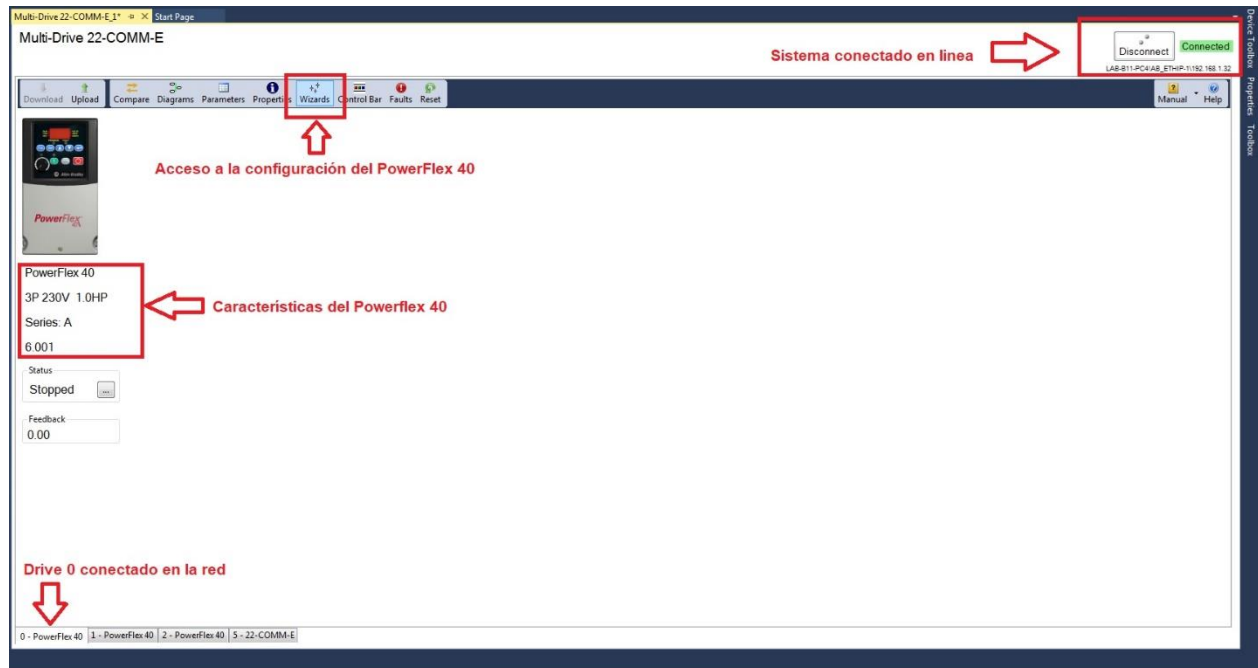


Figura 3-15. Ventana de trabajo del PowerFlex 40 en CCW

En la ventana de “Available Wizards” se eligió la opción “PowerFlex 40 Startup Wizard” y automáticamente son cargados los parámetros del variador como se ve en la Figura 3-16.

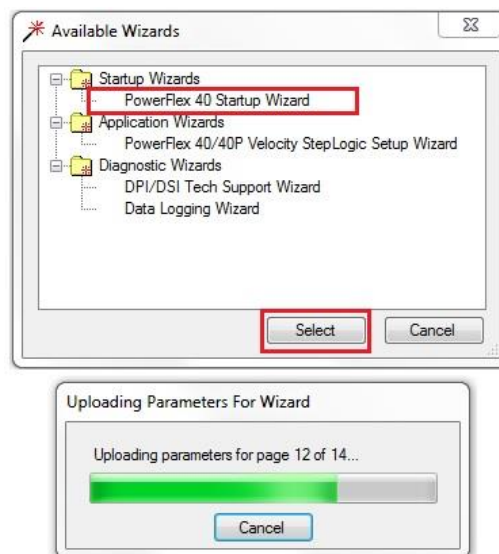


Figura 3-16. Acceso de configuración de inicio PowerFlex 40

En seguida aparece el asistente de configuración de puesta en marcha del variador, Figura 3-17, el cual permite restaurar parámetros en caso que se tengan datos de un motor alojados en la memoria del variador, permite elegir los modos de control para el motor, datos del motor, etc.



Figura 3-17. Asistente de puesta en marcha para PowerFlex 40.

A continuación, se mencionan las configuraciones que se realizaron para puesta en marcha que se realizaron para cada uno de los variadores. Dado que las configuraciones de comunicación y control son las mismas para los 3 drives, solo se presentan los pasos de manera general, cuando los datos de los drives cambien se especifica.

Modo de control

Dado que el sistema de bandas transportadoras se debe controlar a frecuencias menores a 20 Hz, se eligió el control vectorial sin sensor el cuál por sus características vistas en el capítulo I se ajusta a nuestra necesidad. En la Figura 3-18 se aprecia la frecuencia de deslizamiento en el motor la cuál es 2 Hz.

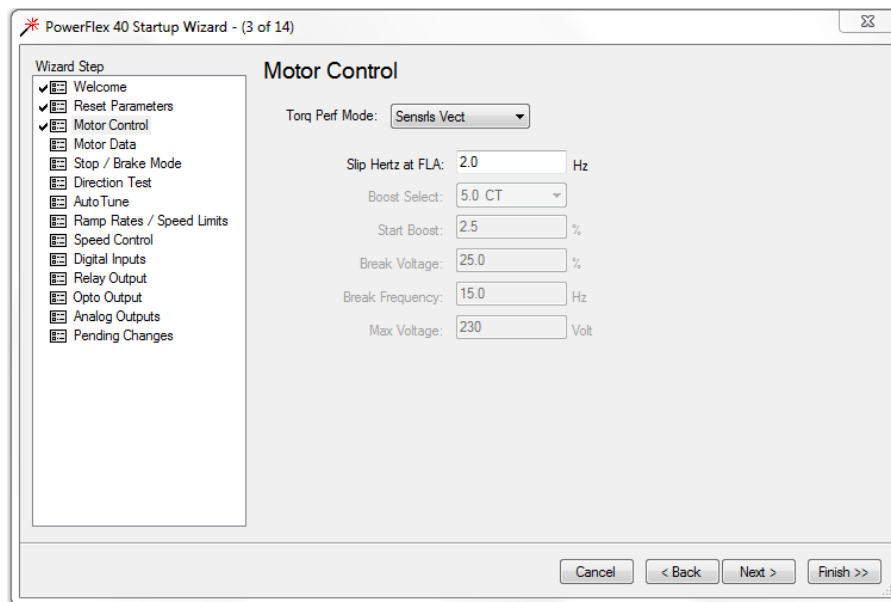


Figura 3-18. Elección de control vectorial sin sensor en PowerFlex 40

Datos del motor

Se ingresaron los datos de cada uno de los motores a su respectivo drive, estos datos son voltaje de alimentación y frecuencia de operación, para la corriente de sobrecarga se utilizó la siguiente ecuación:

$$I_{Sobrecarga} = I_{Nom} \times 1.25 \quad (\text{Ec.3})$$

Dato que son 3 motores diferentes se tiene:

$$I_{Sobrecarga\ M0} = 2.2 \times 1.25 = 2.75\ A$$

$$I_{Sobrecarga\ M1} = 1.3 \times 1.25 = 1.6\ A$$

$$I_{Sobrecarga\ M2} = 1.4 \times 1.25 = 1.75\ A$$

Los datos del motor se ingresan en el asistente como se ve en la Figura 3-19.

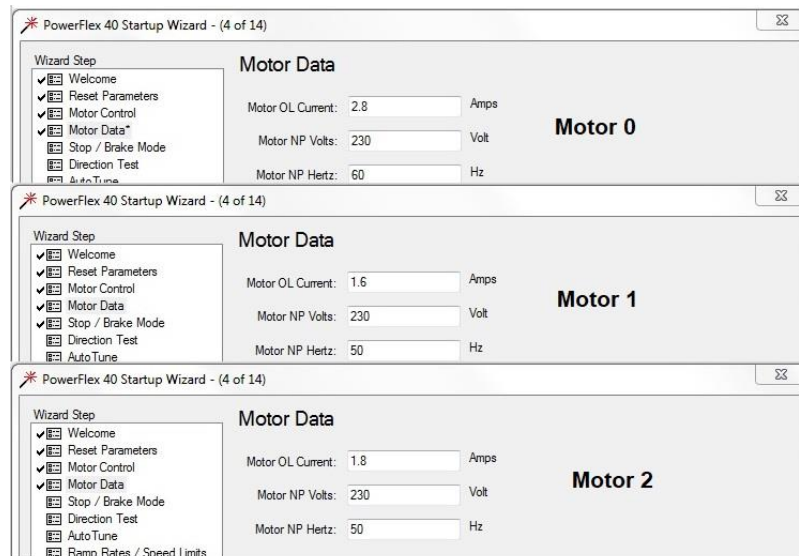


Figura 3-19. Datos de los motores en la configuración de puesta en marcha

Tipo de frenado

El tipo de frenado que se eligió para el motor es una rampa, ya que se trata de un sistema de bandas transportadoras, un frenado por corriente requiere una instalación de un banco de resistencias para disipar la energía, y un frenado repentino puede causar daños mecánicos en el acoplamiento de la flecha del motor si se acciona consecutivamente. En la Figura 3-21 se observa cómo se configuro este frenado.

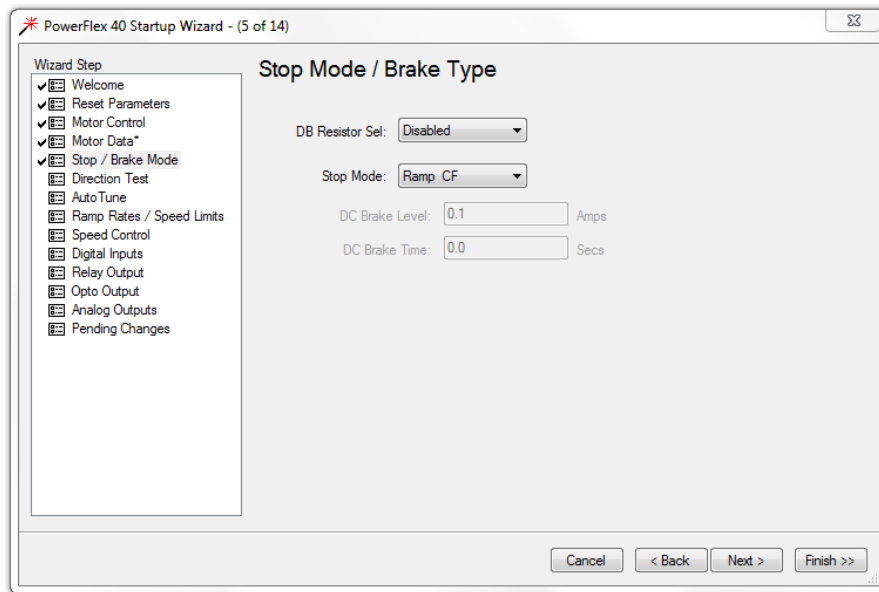


Figura 3-20. Configuración de frenado por rampa

Rampa de aceleración y desaceleración

La rampa de aceleración es el tiempo que se tarda en alcanzar la referencia de frecuencia máxima, mientras que de rampa de desaceleración es el tiempo que se requiere para pasar de la frecuencia máxima a frecuencia 0. Ambas rampas se les asignó el tiempo de 5 segundos, Figura 3-21, y la frecuencia máxima a la cual trabaja el variador se asignó 60 Hz.

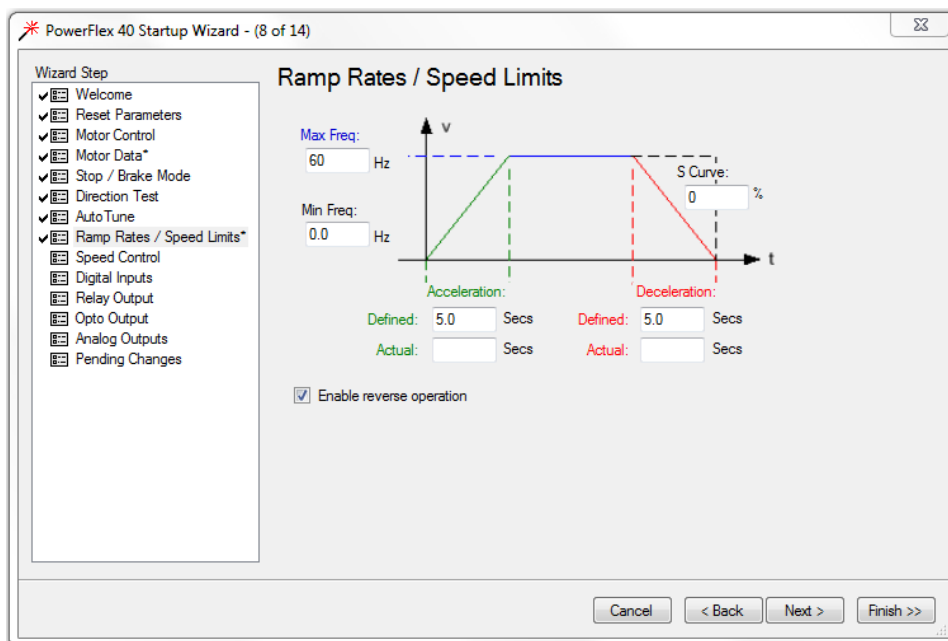


Figura 3-21. Configuración de rampas de aceleración y desaceleración

Entradas digitales

Como se explicó en el capítulo II el variador PowerFlex 40 tiene un bloque de terminales de entradas digitales, la primera entrada corresponde al método de paro en este caso es por rampa, la entrada 2 es el medio de inicio en este caso es por puerto de comunicación, la entrada 3 corresponde a la dirección. Para esta configuración no se usan las entradas digitales 6 a 9. Como se observa en la Figura 3-22 el variador es capaz de tener 8 frecuencias predeterminadas que pueden ser utilizadas en la programación los valores asignados para cada una de las frecuencias se aprecian en dicha imagen.

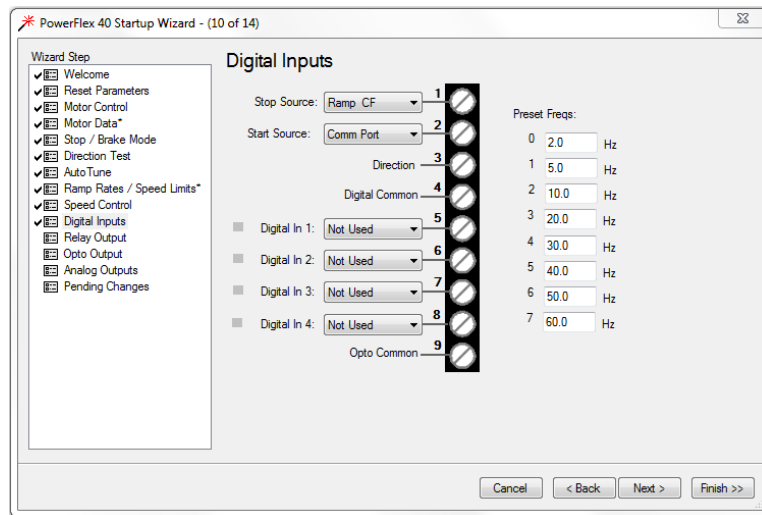


Figura 3-22. Configuración de entradas digitales y frecuencias predeterminadas

Salida a relevador

La salida a relevador es utilizada para conectar la torre de señales instalada en el tablero, la configuración que se eligió es a "a frecuencia", Figura 3-23, es decir la conmutación de los contactos se lleva a cabo cuando la frecuencia de salida del variador alcanza el valor de la frecuencia enviada en el puerto de comunicación.

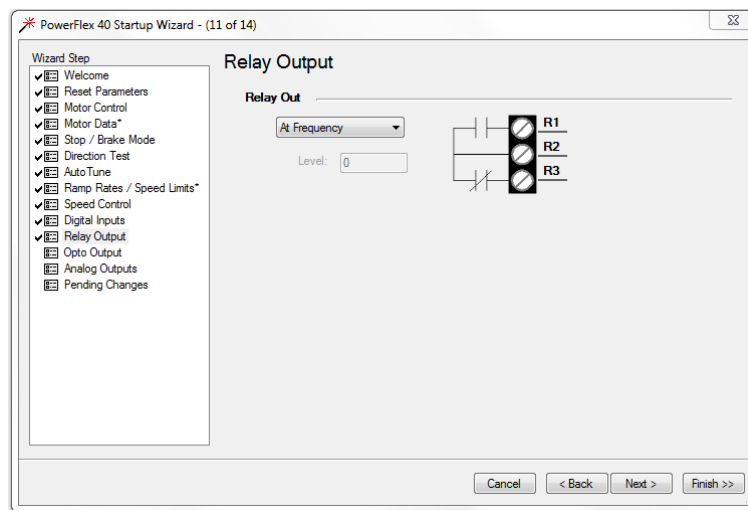


Figura 3-23. Configuración de salida a relevador el PowerFlex 40

Salida a optoacoplador

El PowerFlex 40 tiene 2 salidas a optoacoplador como se observa en la Figura 3-24, la primera es configurada para que se active cuando el motor está funcionando, la segunda a frecuencia siendo el mismo funcionamiento de la configuración del relevador

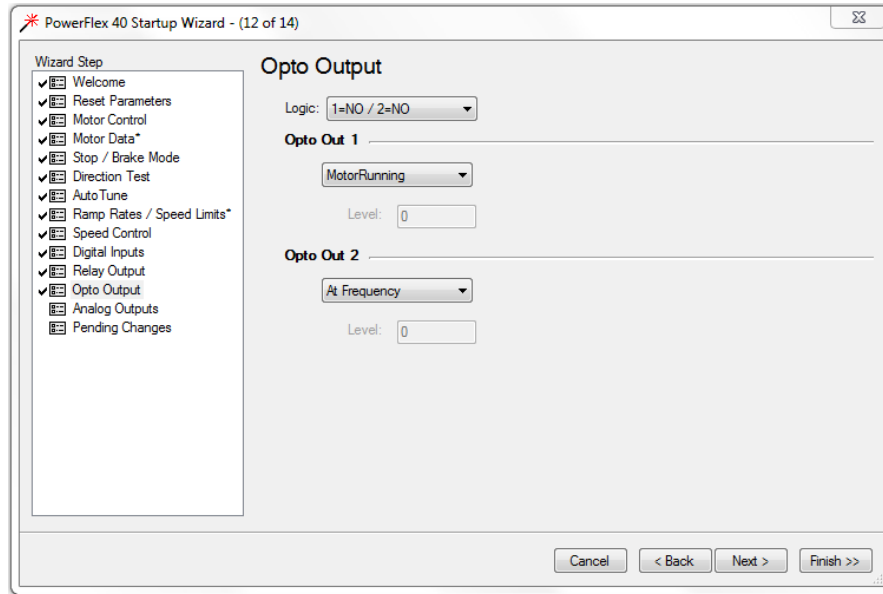


Figura 3-24. Configuración de salidas a optoacoplador

Salida analógica

En este proyecto no se utilizó la señal de salida analógica por lo cual se dejó en el valor de defecto de 0 a 10 V como se observa en la Figura 3-25.

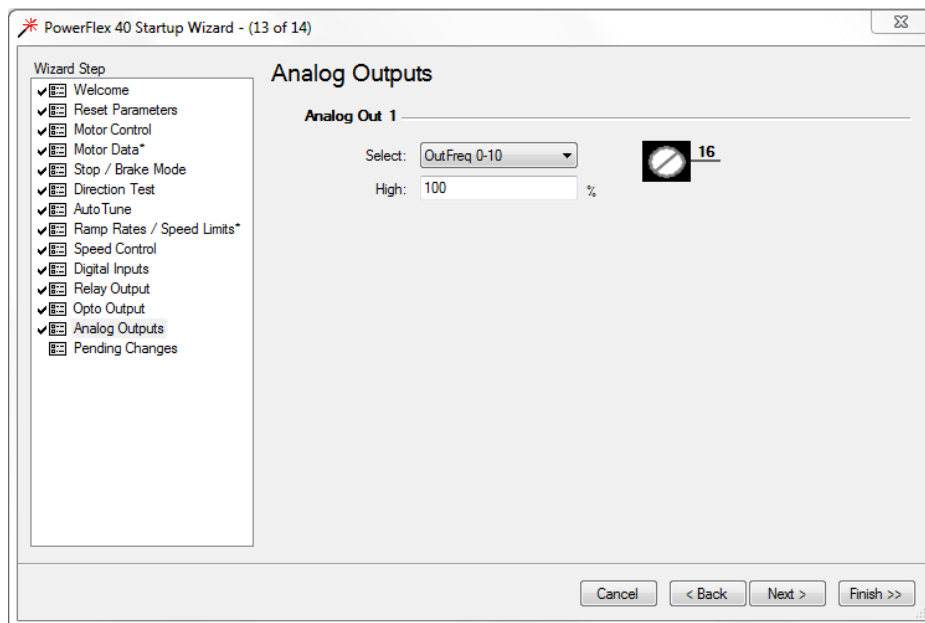


Figura 3-25. Configuración de salida analógica del PowerFlex 40

Como se observa en la Figura 3-26 una vez configurados los parámetros en el asistente se deben aplicar todos los cambios y se finalizó. Es importante que la comunicación mediante el protocolo EtherNet/IP este activa, ya que de lo contrario no es posible la descarga de la configuración.

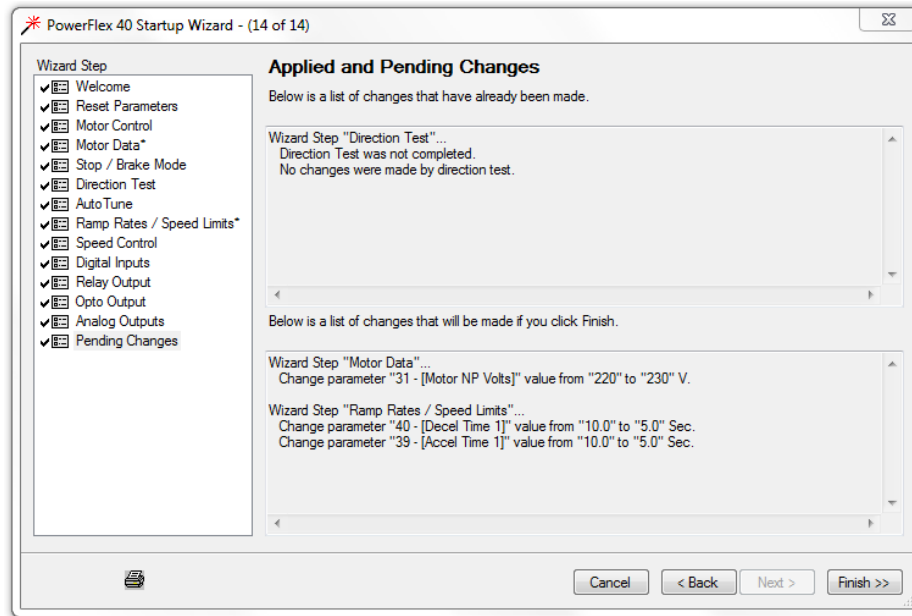


Figura 3-26. Finalización de la configuración de puesta en marcha

Ahora cada uno de los variadores tiene los parámetros adecuados para trabajar con los motores de las bandas transportadoras, la configuración de estradas y salidas esta lista. Este sistema multidrive está preparado para llevarse a la programación.

3.4 Proyecto en RSLogix 5000

RSLogix 5000 es una plataforma dedicada a la configuración y programación de controladores Allen Bradley y dispositivos relacionados permite desarrollar aplicaciones de ingeniería. (Rockwell Automation, Studio 5000 Logix Designer, 2018)

Se utilizó este software para crear la secuencia de programación en los variadores permitiendo posteriormente hacer el enlace con la HMI.

3.4.1 Creación de proyecto y configuración de módulos

Se abrió el software RSLogix 5000 para crear el proyecto. Para ello en la barra de menús se seleccionó "new file" apareciendo la ventana de la Figura 3-27.

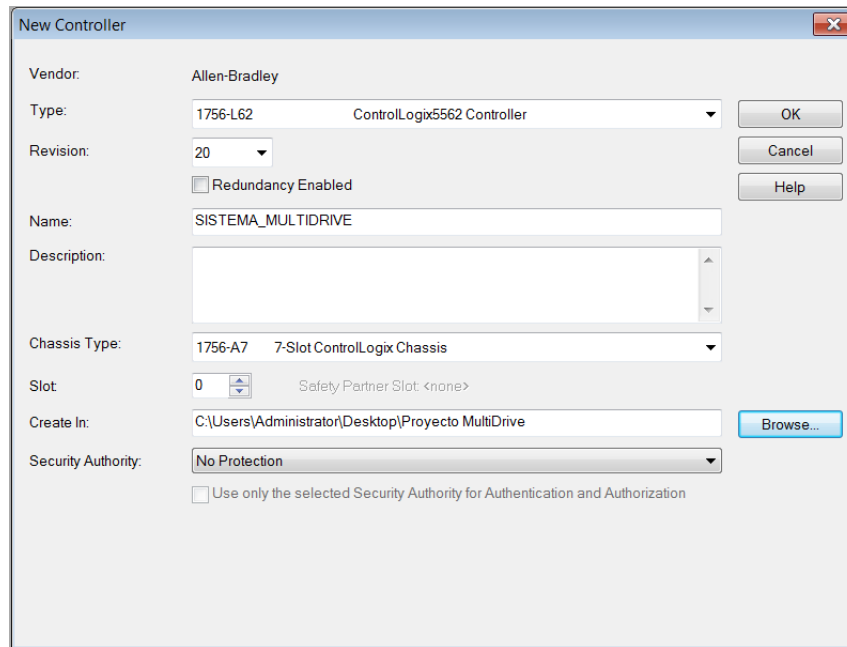


Figura 3-27. Creación de proyecto en RSLogix 5000

Se seleccionó el controlador 1756-L62 ControlLogix 5562 con la última revisión disponible la cuál es la 20, el proyecto se nombró “SISTEMA_MULTIDRIVE”. Es importante seleccionar adecuadamente el chasis en el cual está instalado el controlador con los módulos. Este chasis es el modelo 1756-A7 y el CPU está instalado en el slot 0. Finalmente se indica la dirección donde es guardado el proyecto.

Una vez creado el proyecto, de lado izquierdo de la pantalla se localiza la ventana de organizador de controlador, en ella aparece la carpeta “I/O Configuration” en esta carpeta se añadieron los módulos que componen el PAC. Al abrir esta carpeta aparece automáticamente el modelo del chasis y el CPU. Para añadir un módulo se dio clic derecho sobre el chasis y se seleccionó “New Module” como se muestra en la Figura 3-28.

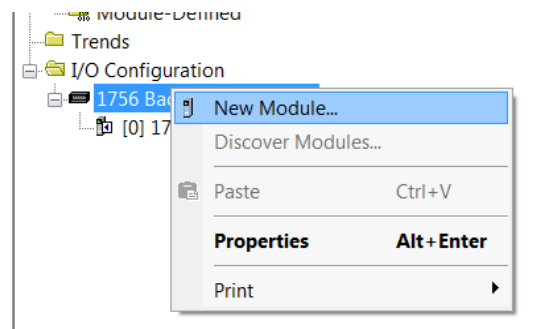


Figura 3-28. Nuevo módulo en el RSLogix 5000.

Posteriormente apareció la ventana de la Figura 3-29 se seleccionó el tipo de módulo, dado que se clasifican por familias de módulos, primero se filtra la categoría del módulo, en este caso es de comunicación, apareciendo en la parte del centro de la ventana los módulos que conforman esta categoría, se seleccionó el módulo que se tiene instalado

en el chasis y se da clic en crear. Este proceso es igual para añadir todos los módulos dependiendo de su función.

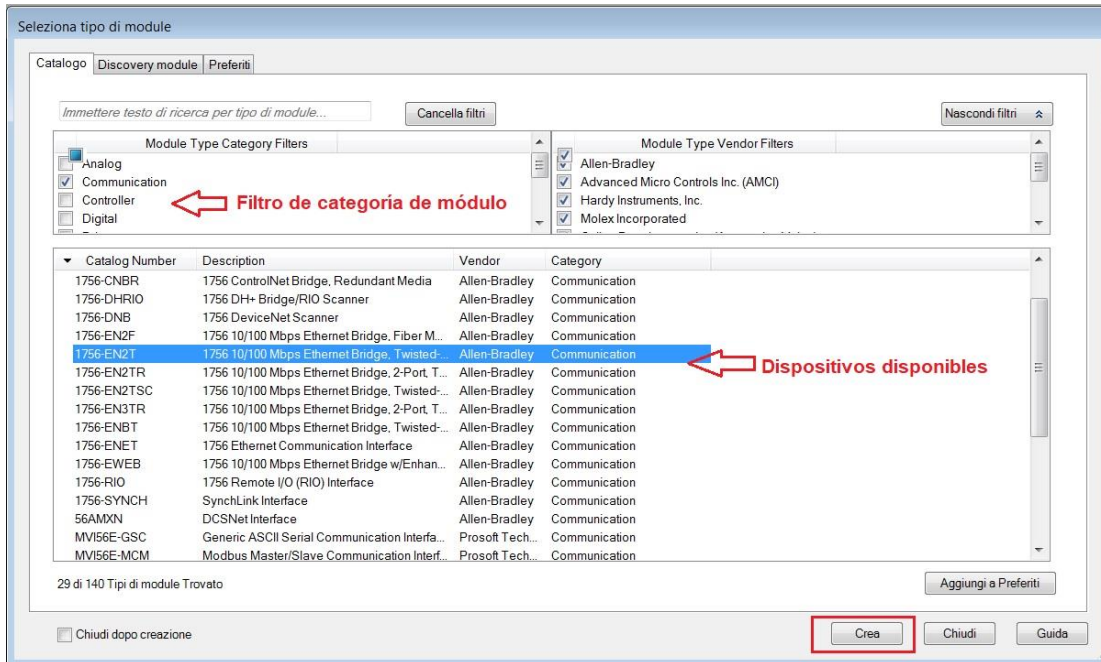


Figura 3-29. Selección de tipo de módulo

En primer lugar, se añadió el módulo de comunicación EtherNet/IP, Figura 3-30, para todos los módulos añadidos se debe asignar un nombre, en este caso es "ETHERNET" para este módulo en particular se asignó la dirección IP definida en el programa de BOOT DHCP server.

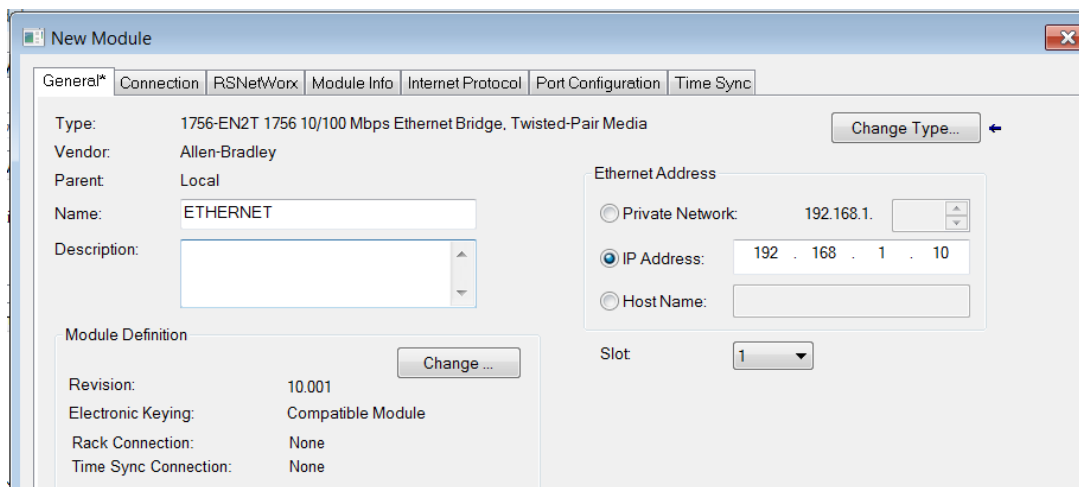


Figura 3-30. Adición del módulo EtherNet/IP al proyecto RSLogix 5000

El otro módulo de comunicación añadido es de la red DeviceNet, está instalado en el slot 2, Figura 3-31, al añadir un módulo es necesario poner el número de revisión, este número se consultó en el software RSLinx dando clic derecho sobre el modulo y seleccionando "propiedades del dispositivo".

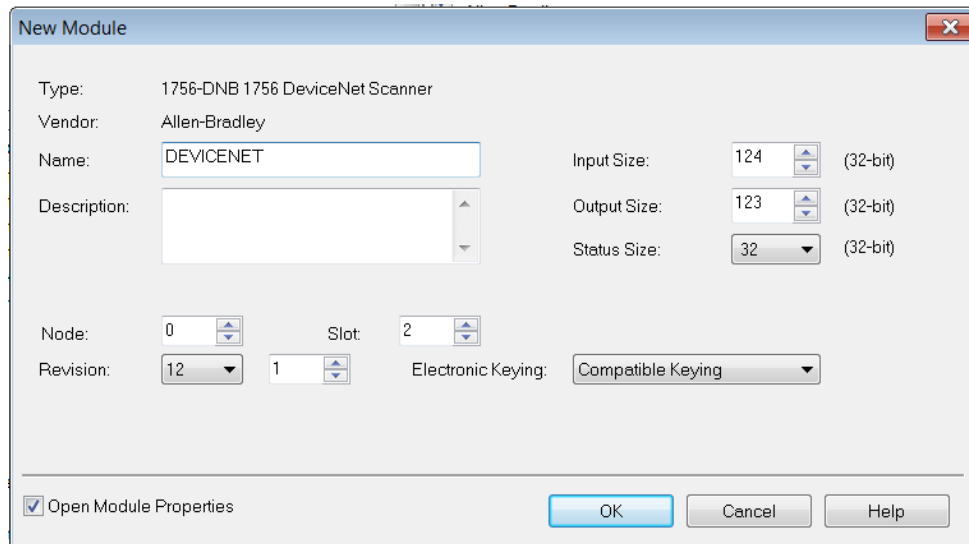


Figura 3-31. Módulo de comunicaciones DeviceNet

Finalmente todos los módulos añadidos se muestran en la Figura 3-32, se instalaron 4 módulos adicionales seleccionados en el capítulo II.

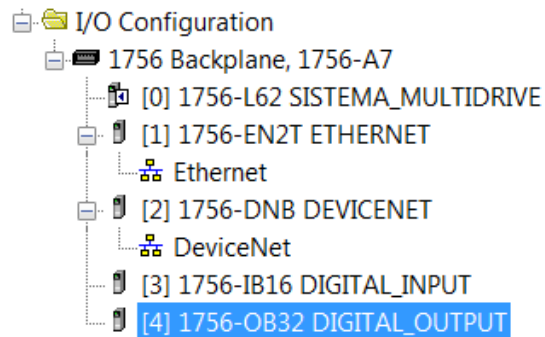


Figura 3-32. Lista de módulos añadidos en RSLogix 5000

Posteriormente se descargó esta configuración al CPU para que reconozca los elementos conectados en el chasis y poder utilizar estos elementos en la programación, es importante que la conexión vía Ethernet entre la computadora y el módulo 1756-EN2T este activa. Para llevar a cabo la descarga. La Figura 3-33, muestra el proceso de descarga, primero en la barra de menús se seleccionó la pestaña “Communications” seguido de la opción “Who Active”. En la ventana “Who Active” aparecen los dispositivos enlazados mediante el módulo de comunicación 1756-EN2T, están acomodados en el orden en el que están instalados en los slots del chasis. Se selecciona el CPU 1756-L62 y se descarga. El sistema pide la autorización para realizar la descarga, ya que, la configuración y datos alojados en la memoria del PAC se perderán. Una vez hecha la descarga, entramos en modo “Run”. Este modo permite estar en línea entre el RSLogix 5000 y el PAC para monitorear lo que está sucediendo entre los módulos.

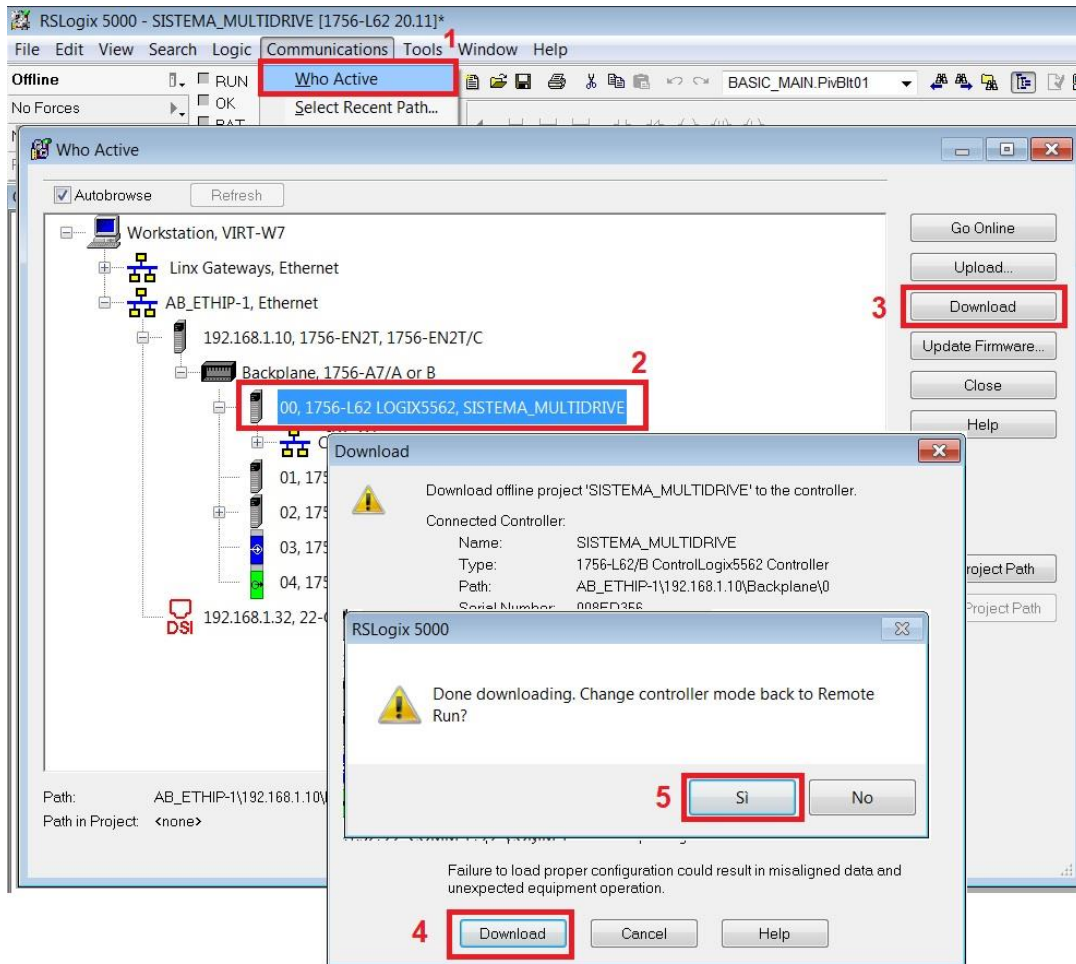


Figura 3-33. Descarga de configuración de módulos al CPU Logix 5562

Una vez descargada la nueva configuración del CPU, el sistema está listo para añadir una nueva aplicación EtherNet/IP.

3.4.2 Adición del sistema multidrive al módulo de comunicación

Hasta ahora el PAC solo tiene la configuración de las entradas y salidas del sistema. Para poder programar los variadores que previamente se integraron en red mediante el software CCW, se adicióno el módulo multidrive al proyecto de RSLogix 5000.

Para adicionar el sistema multidrive el sistema debe estar en línea, en la ventana de organizador de controlador, Figura 3-34, se da clic derecho sobre el módulo 1756-EN2T y se seleccionó nuevo módulo. En la ventana de selección se filtra por tipo "Drive" y en la lista de catálogo se eligió "PowerFlex clase 4 Multi-E" este es un sistema multidrive compatible con la tarjeta 22-COMM-E.

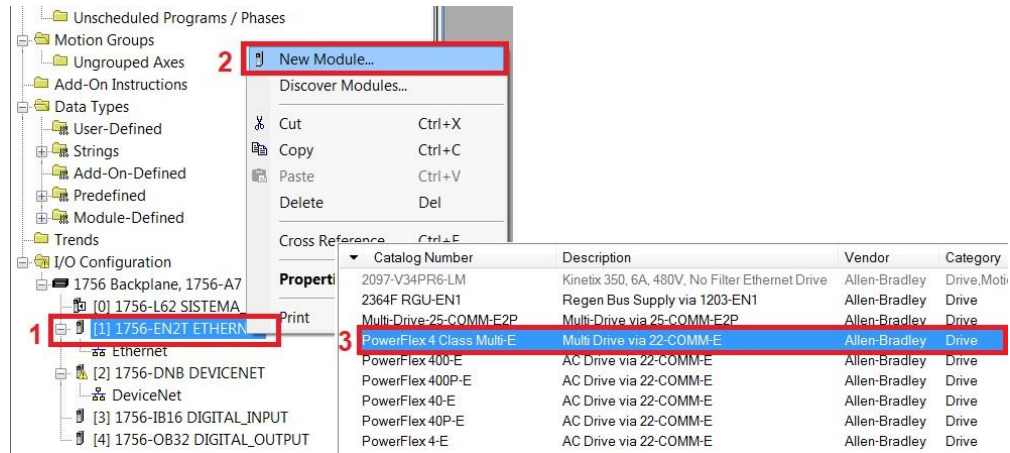


Figura 3-34. Adición del sistema Multidrive al módulo EtherNet/IP 1756-EN2T

En la ventana de configuración del módulo se asignó la dirección IP, Figura 3-35, esta dirección IP debe ser la misma que se asignó en el BOOT DHCP server para evitar conflictos de enlace. También se asignó el nombre de "SISTEMA_MULTIDRIVE". Ahora corresponde asignar las propiedades del sistema multidrive para ello damos clic en "Change".

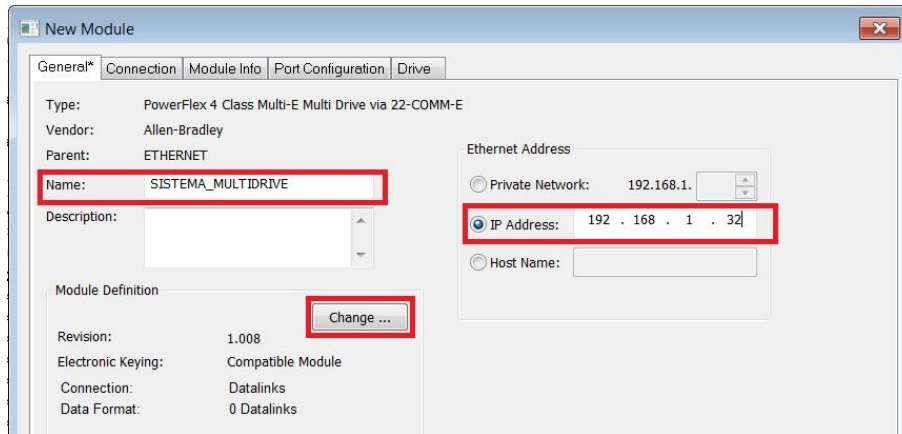


Figura 3-35. Asignación IP al módulo Multidrive en RSLogix 5000

Inmediatamente se despliega otra ventana, Figura 3-36, donde se verifico el número de revisión de la tarjeta en este caso es la 1.8, también se observa que aún no hay drives cargados, las casillas de los variadores están vacías. Para añadirlos se debe dar clic en "Match Drive".

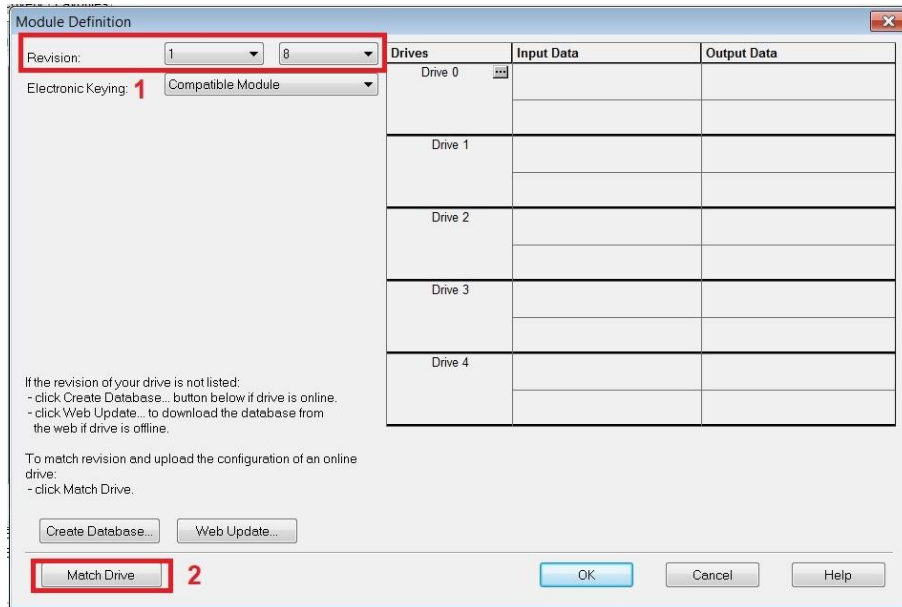


Figura 3-36. Número de revisión del sistema Multidrive

Se abre una nueva ventana, Figura 3-37, aquí se seleccionó la tarjeta 22-COMM-E que tiene el enlace ya configurado con cada uno de los variadores. Después de haber seleccionado la tarjeta se cargan los parámetros de cada uno de los variadores.

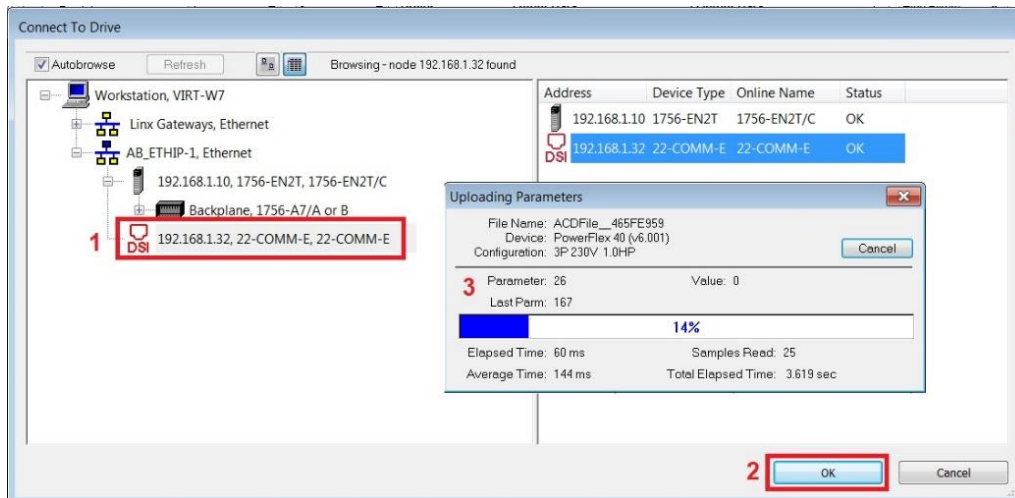


Figura 3-37. Conexión con el variador

Después de finalizar la carga de datos de cada uno de los variadores, aparecen los 3 variadores, Figura 3-38, se puede observar que se autorizó la activación los comandos de operación y la fuente de arranque por red.

Drives	Input Data	Output Data
PowerFlex 40 PF40_A	PF40_A_DriveStatus	PF40_A_LogicCommand <input checked="" type="checkbox"/> Use Network Start
	PF40_A_OutputFreq	PF40_A_FreqCommand <input checked="" type="checkbox"/> Use Network Reference
PowerFlex 40 PF40_B	PF40_B_DriveStatus	PF40_B_LogicCommand <input checked="" type="checkbox"/> Use Network Start
	PF40_B_OutputFreq	PF40_B_FreqCommand <input checked="" type="checkbox"/> Use Network Reference
PowerFlex 40 PF40_C	PF40_C_DriveStatus	PF40_C_LogicCommand <input checked="" type="checkbox"/> Use Network Start
	PF40_C_OutputFreq	PF40_C_FreqCommand <input checked="" type="checkbox"/> Use Network Reference
Drive 3		
Drive 4		

Figura 3-38. Variadores añadidos al proyecto de RSLogix 5000

Una vez cargado y el módulo multidrive, la Figura 3-39 muestra todos los módulos cargados en el proyecto de RSLogix 5000. Lo que prosigue con la programación del sistema.

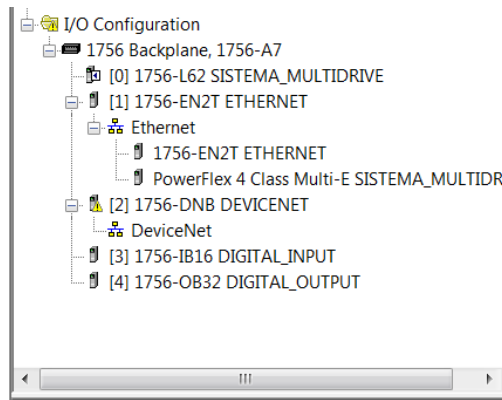


Figura 3-39. Módulos completos en el RSLogix 5000

3.5 Secuencias de operación de las bandas transportadoras

La implementación del sistema multidrive en las bandas transportadoras tiene varias secuencias de operación, a continuación, se describen cada una de ellas.

3.5.1 Control individual de cada motor

En esta secuencia de operación el motor de cada banda transportadora es controlado individualmente, el operador ingresa en la pantalla de la HMI las RPM a las cuales gira el motor. Esta velocidad es limitada a la velocidad máxima de los datos de placa del motor. Se controla el paro, arranque y sentido de giro mediante la botonera y HMI, se tiene la opción de joggeo en cada motor.

En esta secuencia de operación los 3 motores pueden ser controlados simultáneamente, no hay dependencia uno del otro. El diagrama de flujo de la Figura 3-40 presenta la secuencia de operación para el control del motor.

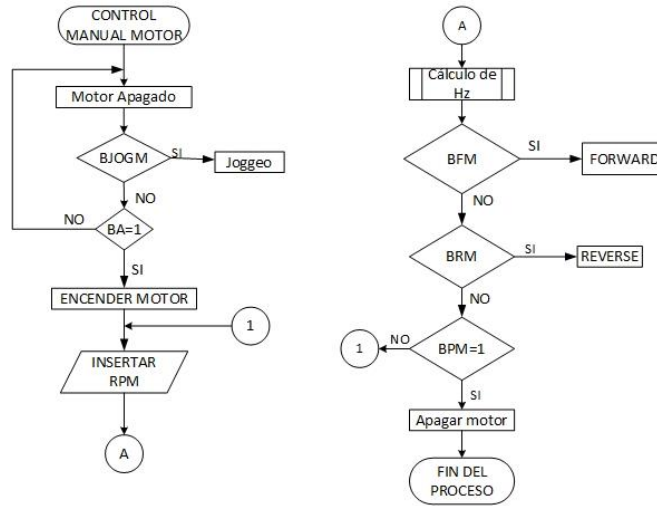


Figura 3-40. Diagrama de flujo de operación manual de motor

Como se observa en el diagrama anterior, es un control sencillo de arranque, paro y velocidad que depende de los valores que ingresa el operador.

3.5.2 Secuencia temporizada del motor-0

En esta secuencia de operación, el motor 0 incrementa su velocidad en base a periodos de tiempo establecidos, la frecuencia es una señal de referencia enviada por protocolo de comunicación, el diagrama de flujo de la Figura 3-41 muestra el funcionamiento de esta secuencia. En esta secuencia de operación no se pueden controlar los motores 1 y 2.

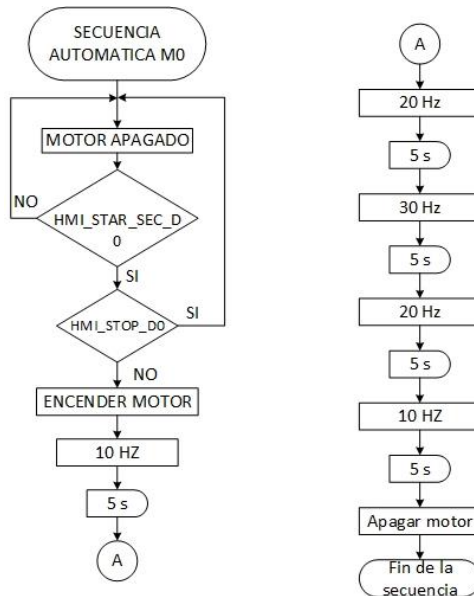


Figura 3-41. Diagrama de flujo de la secuencia automática 1

3.5.3 Secuencia temporizada 2 motores

Los motores 0 y 1 trabajan en una secuencia programada a base de frecuencias consecutivas y periodos de tiempo establecidos. Como se observa en el diagrama de flujo de la Figura 3-42, los motores alternan los valores de velocidad.

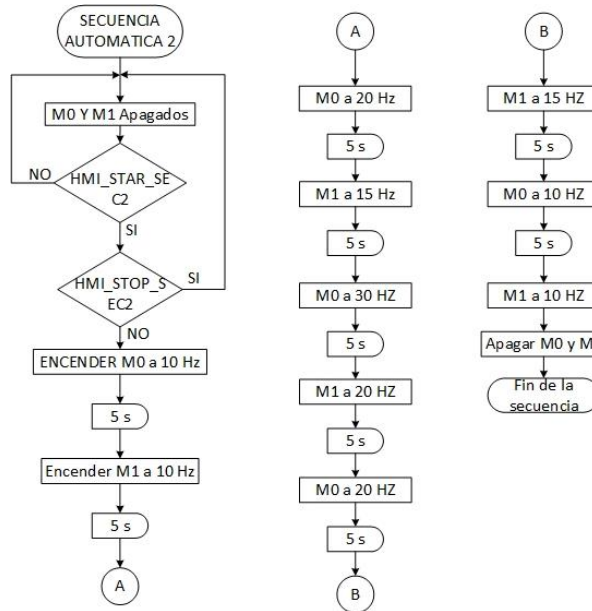


Figura 3-42. Diagrama de flujo de la secuencia automática 2

3.5.4 Secuencia Temporizada 3 Motores

La última secuencia de operación implica el trabajo de los 3 variadores en secuencia temporizada. La Figura 3-43 muestra la secuencia de operación de los motores. El objetivo de las secuencias temporizadas es demostrar el control de motores simultáneamente con una sola tarjeta de EtherNet/IP.

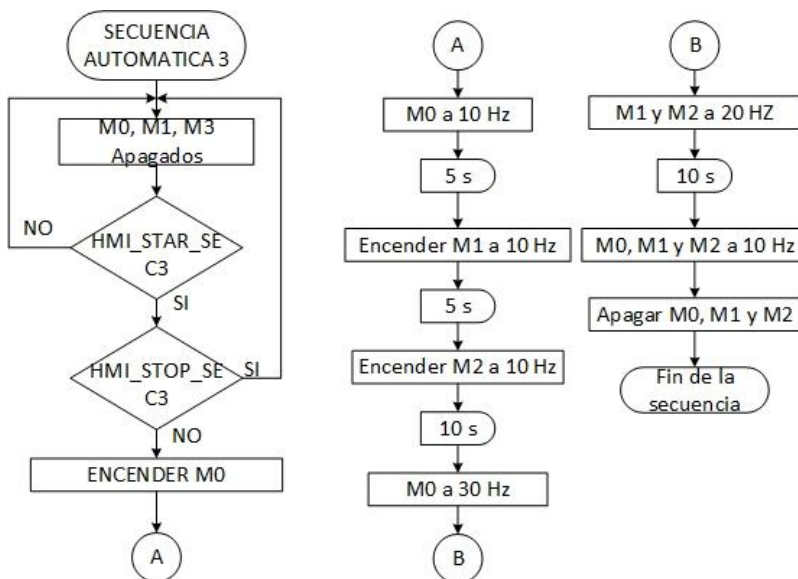


Figura 3-43. Diagrama de flujo de la secuencia automática 3

3.6 Programación en el RSLogix 5000

3.6.1 Programación en lenguaje escalera

El lenguaje de programación elegido para este proyecto fue escalera, debido a que el ControlLogix L61 es compatible con este tipo de programación además de que es sencillo de utilizar. En el anexo 1 se muestra el programa elaborado para el proyecto. A continuación, se describen los elementos e instrucciones que se utilizaron en el programa.

3.6.2 Tags del sistema multidrive

Un tag es el nombre asignado a una localidad de memoria del controlador, esto con la finalidad de llamar estos datos en la programación de una manera sencilla. Existen 2 tipos de tags, los tipo alias que se asignan a las entradas y salidas del controlador, y los tipo base para los datos de memoria del controlador. Para acceder a la lista de tags generados se entra a control de tags dentro del árbol del proyecto en el RSLogix 5000 como se muestra en la Figura 3-44.

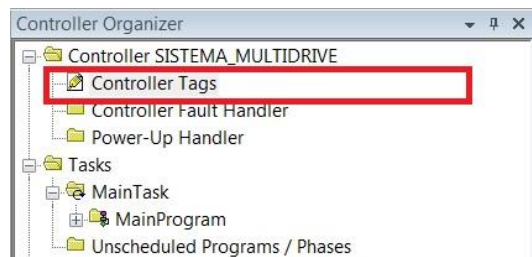


Figura 3-44. Acceso a control de tags

Una vez que se ingresó el sistema multidrive al RSLogix 5000, se generó una lista de tags para cada drive conectado en la red. Estos son de tipo global, por lo cuál, pueden ser utilizados en cualquier parte del programa. El sistema multidrive divide esta lista de tags en dos categorías, en la Figura 3-45 se muestra la lista de tags de entrada del drive 0, estos datos son de lectura, cambian de estado de acuerdo a la operación del drive.

SISTEMA_MULTIDRIVE:I	{...}	{...}		AB:Pow
+ SISTEMA_MULTIDRIVE:I.PF40_A_DriveStatus	2#0000_0110_...		Binary	INT
- SISTEMA_MULTIDRIVE:I.PF40_A_Ready	1		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:I.PF40_A_Active	0		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:I.PF40_A_CommandDir	0		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:I.PF40_A_ActualDir	0		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:I.PF40_A_Accelerating	0		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:I.PF40_A_Decelerating	0		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:I.PF40_A_Alarm	0		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:I.PF40_A_Faulted	0		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:I.PF40_A_AtReference	0		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:I.PF40_A_CommFreqCnt	1		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:I.PF40_A_CommLogicCnt	1		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:I.PF40_A_ParmsLocked	0		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:I.PF40_A_DigIn1Active	0		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:I.PF40_A_DigIn2Active	0		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:I.PF40_A_DigIn3Active	0		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:I.PF40_A_DigIn4Active	0		Decimal	BOOL
+ SISTEMA_MULTIDRIVE:I.PF40_A_OutputFreq	0		Decimal	INT

Figura 3-45. Tags de entrada del drive A

Para la programación se utilizó el tag “OutputFreq”, el cual nos da la frecuencia de salida del variador, este dato es de tipo entero y es para monitoreo de salida del drive.

La Figura 3-46 muestra la lista de tags de salida del drive 0, estos son de tipo escritura, es decir, permiten enviar ordenes al drive.

- SISTEMA_MULTIDRIVE:0	{...}	{...}		AB:Power
+ SISTEMA_MULTIDRIVE:0.PF40_A_LogicCommand	2#0000_0000_...		Binary	INT
- SISTEMA_MULTIDRIVE:0.PF40_A_Stop	0		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:0.PF40_A_Start	0		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:0.PF40_A_Jog	0		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:0.PF40_A_ClearFaults	0		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:0.PF40_A_Forward	0		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:0.PF40_A_Reverse	0		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:0.PF40_A_LocalControl	0		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:0.PF40_A_MOPIncrement	0		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:0.PF40_A_AccelRate1	0		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:0.PF40_A_AccelRate2	0		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:0.PF40_A_DecelRate1	0		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:0.PF40_A_DecelRate2	0		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:0.PF40_A_FreqSel01	0		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:0.PF40_A_FreqSel02	0		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:0.PF40_A_FreqSel03	0		Decimal	BOOL
- SISTEMA_MULTIDRIVE:0.PF40_A_MOPDecrement	0		Decimal	BOOL
+ SISTEMA_MULTIDRIVE:0.PF40_A_FreqCommand	87		Decimal	INT

Figura 3-46. Tags de salida del drive A

La Tabla 3-3 muestra los tags utilizados en la programación de secuencias, estos tags fueron asociados a una bobina de salida en el programa.

Tabla 3-3. Tags utilizados en la programación

Tag	Función
PF40_A_Stop	Parar motor
PF40_A_Start	Iniciar operación
PF40_A_Jog	Jogeo
PF40_A_ClearFaults	Limpiar fallas de operación
PF40_A_Forward	Dirección en adelante
PF40_A_Reverse	Dirección en atraso
PF40_A_FreqCommand	Valor de referencia de frecuencia

Para cambiar la velocidad del drive mediante comunicación EtherNet/IP se implemento el tag “FreqCommand”, este tag esta en función de multiples de 10, es decir, si se quiere una frecuencia de 30 Hz se envió el valor de 300.

3.6.3 Cálculo de frecuencia a partir de RPM

Dado que el usuario ingresa el valor de RPM a las cuales gira el motor, se calculó la frecuencia de operación a partir de las RPM. Para ello se realizaron los siguientes pasos. La Figura 3-47 muestra la gráfica de reacción del motor 0, esta gráfica es obtenida a base de la placa de datos del motor, a una frecuencia 0 no hay movimiento del rotor, mientras que a 60 Hz se tiene la velocidad máxima en este caso es de 3450 RPM.

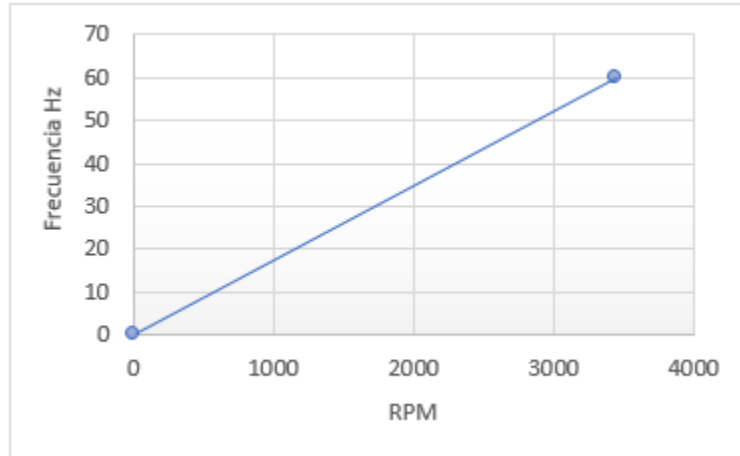


Figura 3-47. Gráfica RPM vs frecuencia del motor 0

Es decir, la variable independiente son las RPM, mediante la ecuación de la recta se tiene la siguiente expresión que permite encontrar el valor de frecuencia:

$$Freq = \frac{F_{m\acute{a}x} - F_{m\acute{i}n}}{RPM_{m\acute{a}x} - RPM_{m\acute{i}n}} * HMI_RPM \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

$F_{m\acute{a}x}$: Frecuencia máxima de operación del motor

$F_{m\acute{i}n}$: Frecuencia mínima de operación del motor

$RPM_{m\acute{a}x}$: Máximo de revoluciones por minuto del motor

$RPM_{m\acute{i}n}$: Mínimo de revoluciones por minuto del motor

HMI_RPM : Valor de las revoluciones por minuto ingresado por el operador.

El valor de frecuencia calculado mediante la ecuación 4, es el valor de referencia que se envió a través de la comunicación EtherNet/IP.

3.6.4 Cálculo de RPM de salida del drive

Dado que el PowerFlex 40, no ofrece un tag que indique las RPM de salida, pero si la frecuencia de salida, que es el tag "OutputFreq", mediante la siguiente ecuación se encontró el valor de las RPM de salida:

$$RPM_{salida} = \frac{RPM_{m\acute{a}x} - RPM_{m\acute{i}n}}{F_{m\acute{a}x} - F_{m\acute{i}n}} * OutputFreq \quad (\text{Ec. 5})$$

El valor de la velocidad obtenido mediante la ecuación 5, corresponde a la variable de proceso, este valor fue comparado con el valor de RPM ingresado en la HMI.

3.6.5 Instrucción Add-on para cálculo de frecuencia y RPM

Para programar las ecuaciones anteriores se utilizó una instrucción add-on, una instrucción add-on es un bloque con líneas de programación que puede ser llamado dentro del programa principal o subrutinas. Esto con la finalidad de optimizar el número de líneas del programa. Para crear esta instrucción dentro del árbol de organización del

proyecto del RSLogix 5000, en la carpeta “Add-On Instructions”, Figura 3-48, se eligió nueva instrucción, los datos ingresados fueron el nombre en este caso fue “FRECUENCIA_HMI” y el tipo de lenguaje de programación.

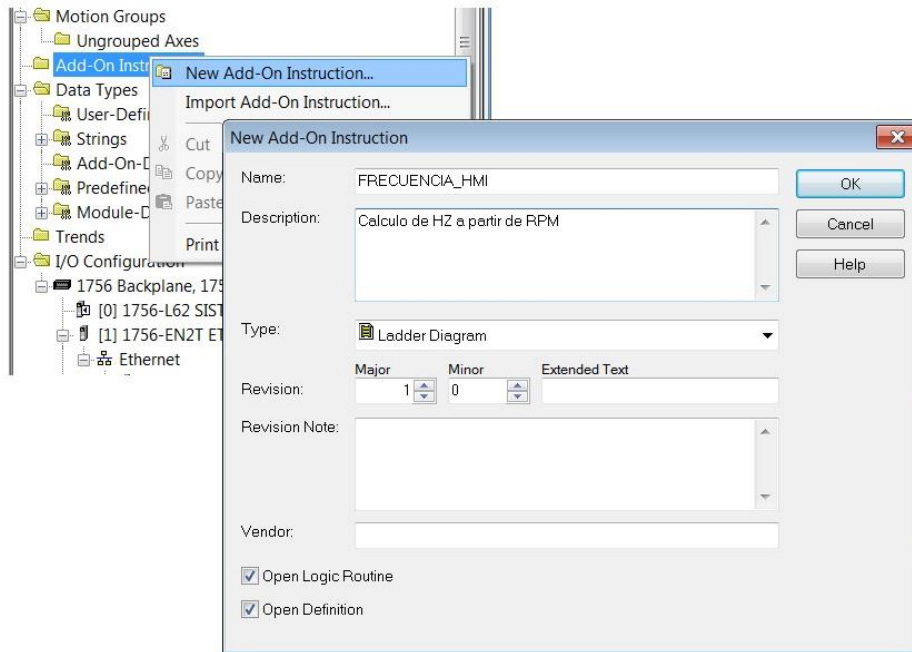


Figura 3-48. Creación de instrucción Add-on

Para el diseño de esta instrucción se contempló como parámetros de entrada las frecuencias y velocidades máximas dado que son motores diferentes. Como parámetro de salida corresponde a la frecuencia, la Figura 3-49 muestra la lista de estos parámetros configurados.

Name	Usage	Alias For	Data Type
EnableIn	Input		BOOL
EnableOut	Output		BOOL
FF	Input		REAL
FI	Input		REAL
RPMF	Input		REAL
RPMI	Input		REAL
HZ	Output		REAL
RPM	Input		REAL

Figura 3-49. Parámetros de entrada y salida de la instrucción Add-on

Una vez que los parámetros le llegan a la instrucción add-on, la operación se realizó con la instrucción “Compute”, la cual lleva a cabo operaciones matemáticas de los parámetros de entrada y deposita el nuevo valor en una variable. La Figura 3-50 muestra la operación realizada por esta instrucción, se observa que el valor de la frecuencia se deposita en el parámetro creado HZ. La ventaja que ofrece esta instrucción es la capacidad de hacer múltiples cálculos aritméticos en una sola expresión reduciendo el número de líneas de programación.

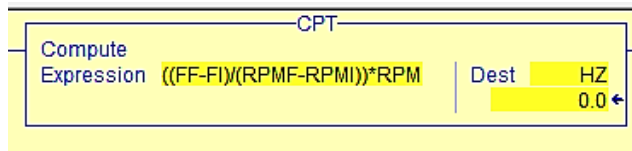


Figura 3-50. Cálculo de frecuencia en instrucción CPT

3.6.6 Rutina de control manual para los motores

Se creó una subrutina para el control de cada motor, estas son llamadas mediante la instrucción “Jump To Subroutine” dentro del programa principal como se observa en la Figura 3-51, cuando los contactos se cierran se energizan las líneas de instrucción y se llaman la subrutina. Los contactos que se observan en la imagen tienen asociados tags de tipo local y se vincularán con la HMI.

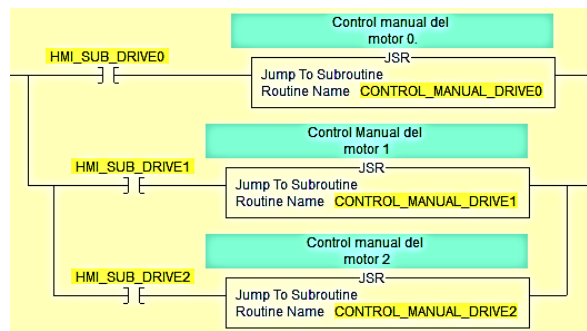


Figura 3-51. Subrutinas de control manual de los motores.

Dentro de la rutina de control manual del motor se ingresó la instrucción add-on para el cálculo de frecuencia que se envía como valor de referencia al PowerFlex 40, como se observa en la Figura 3-52, se creó un tag llamado “HMI_RPM_DRIVE0” en el cuál se ingresan las RPM, la salida de la instrucción se envía al tag “PF40_A_FreqCommand”. Los parámetros que cambian respecto a las características del motor son las frecuencias y RPM máximas y mínimas de operación.

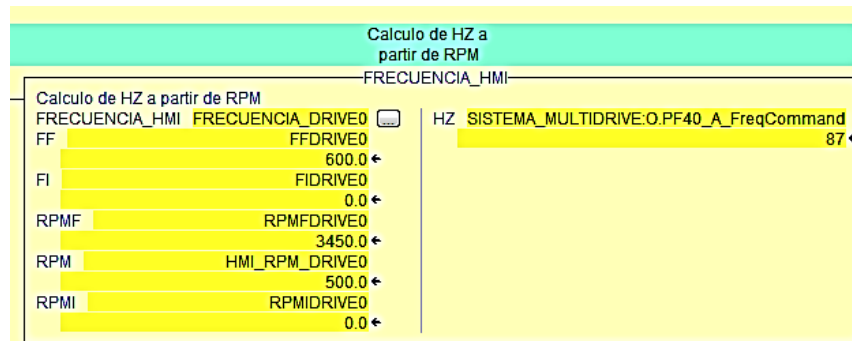


Figura 3-52. Envío de frecuencia calculada al drive PowerFlex 40

Para el cambio de sentido de giro se implementaron los tags forward (adelanto) y reverse (atraso), estos tags se asocian a una bobina para enviar un pulso, en la Figura 3-53 se observa que se utilizó un tag tipo alias para las entradas digitales del sistema y otro tipo base para ser activado mediante HMI.

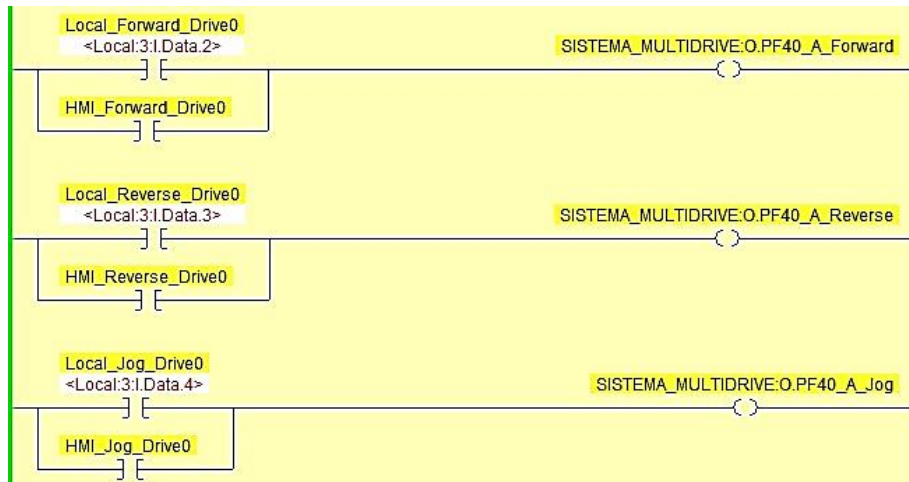


Figura 3-53. Programación de sentido de giro del motor

3.6.7 Control de velocidad del motor en secuencia automática

Para las secuencias automáticas el cambio de velocidad se llevó a cabo mediante el uso de temporizadores y la instrucción “move”. Esta instrucción mueve el valor almacenado en una casilla de memoria a otra. Para ello se registraron los valores de frecuencia en tags de tipo entero. Como se observa en la Figura 3-54, la secuencia automática comienza con un contacto de arranque, el valor de frecuencia almacenado en el tag “Frecuencia1_Secuencia_Drive0” se asigna al tag “MULTIDRIVE.O:PF40_A_FreqCommand” y se activa el inicio del variador mediante la bobina tipo “latch” con el tag “MULTIDRIVE.O:PF40_A_Start”, esta bobina es auxiliar ya que activa un temporizador tipo TON, cuando el tiempo transcurrido alcanza el valor del tiempo predeterminado del temporizador se utiliza el bit done para mandar una nueva frecuencia mediante la instrucción move.

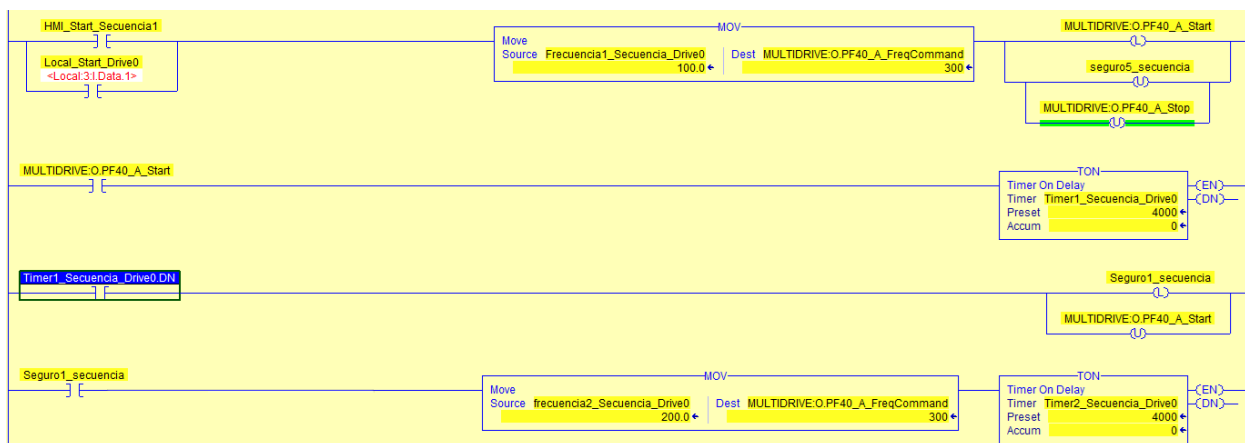


Figura 3-54. Cambio de frecuencia con instrucción move

3.7 Integración del sistema multidrive con la HMI

El diseño de la HMI tiene como objetivo permitir al usuario enviar instrucciones de operación a los drives, además monitorear y comparar la velocidad y frecuencia de salida del drive con los valores de referencia enviados a través del puerto de comunicación.

3.7.1 Enlace de la HMI con el controlador

Una vez que se programaron las secuencias de operación y se descargó el programa en el controlador, lo que prosiguió es enlazar la información de este programa con la HMI para poder enviar las instrucciones de operación. En la Figura 3-55 se muestra que la información viaja a través del protocolo EtherNet/IP del controlador hacia la HMI pasando por el switch, mediante software se llevó a cabo esta vinculación.

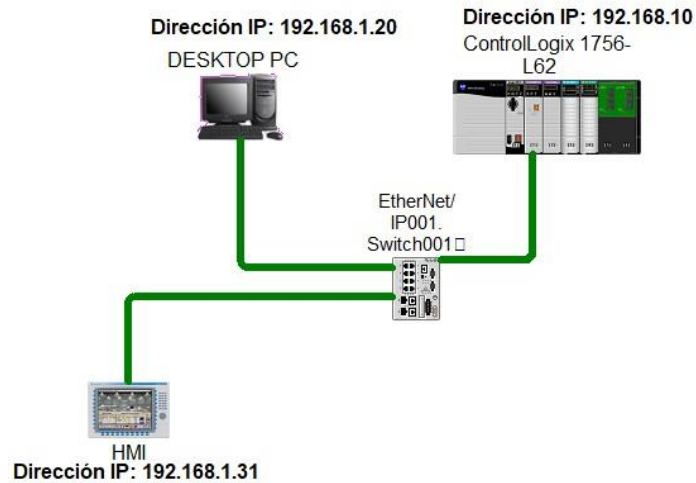


Figura 3-55. Enlace de la HMI con el controlador

En este trabajo la HMI se diseñó en el software FactoryTalk View Studio, dado que es compatible con el sistema ControlLogix. Se abrió un proyecto nuevo como se indica en la Figura 3-56, la opción “View Machine Edition” permite visualizar en la computadora las pantallas como si fueran cargadas en un panelview. El nombre asignado al proyecto fue “SISTEMA_MULTIDRIVE”. Posteriormente se desplego el árbol de trabajo, para hacer el enlace con la información del controlador, dentro de la sección “RSLinx Enterprise” se inició una nueva configuración.

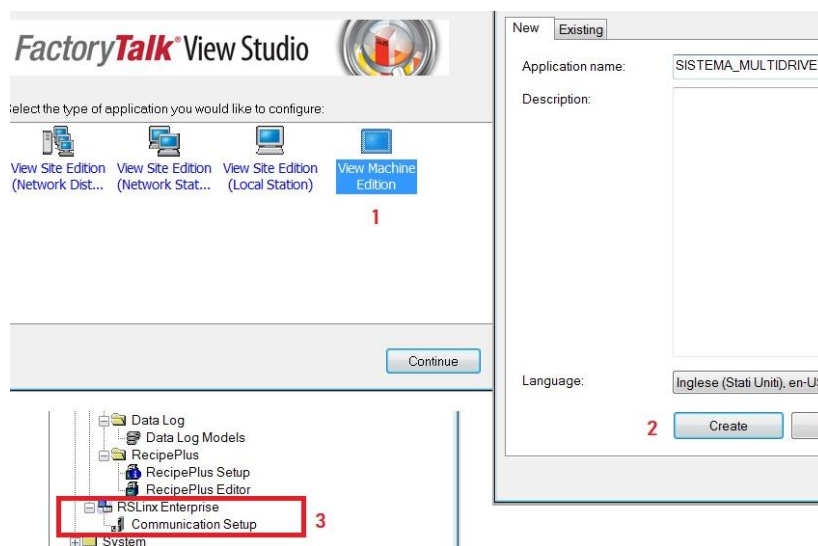


Figura 3-56. Nuevo proyecto en FactoryTalk View Studio

En la ventana de configuración, Figura 3-57, se añadió el controlador mediante la creación de un acceso, esta es una etiqueta que se le asignó el nombre de “Sistema_Multidrive” y es independiente de la configuración del controlador. Apareció la red de trabajo creada en el RSLinx Classic donde se seleccionó el CPU, el sistema debe estar en línea con el RSLogix 5000. Después se copió esta información de configuración a la rutina de diseño de HMI, posteriormente se verificó que se tenga acceso a esta información.

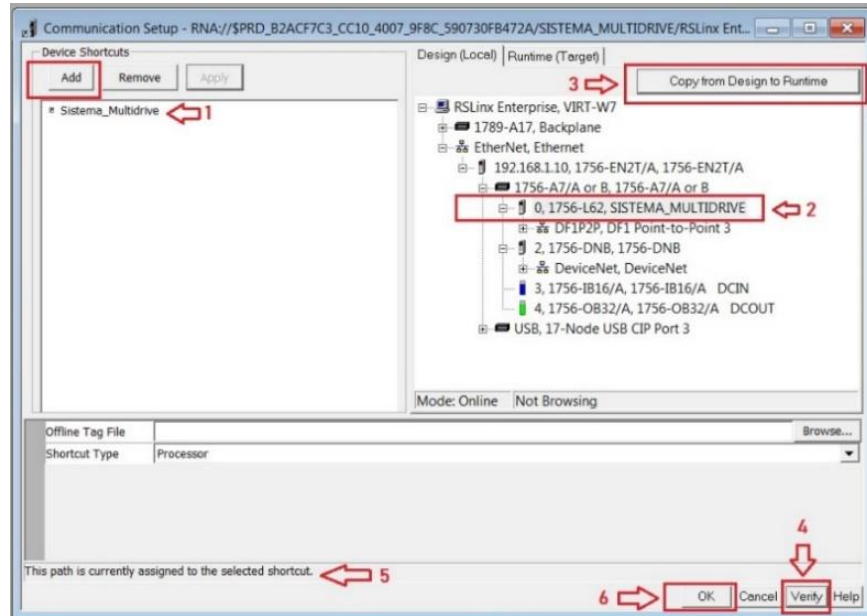


Figura 3-57. Acceso a dispositivo en FactoryTalk View

Ahora se tienen acceso a los tags creados en el RSLogix 5000 para poder asociarlos a las pantallas de trabajo.

3.7.2 Estructura de pantallas de la HMI

Las pantallas de la HMI están estructuradas como se muestra en el diagrama de la Figura 3-58, es decir, se tiene un menú que permite acceder a los modos de operación manual o automático que direccionan a pantallas de control, a continuación, se describe la estructura y funcionamiento de cada una de las pantallas.

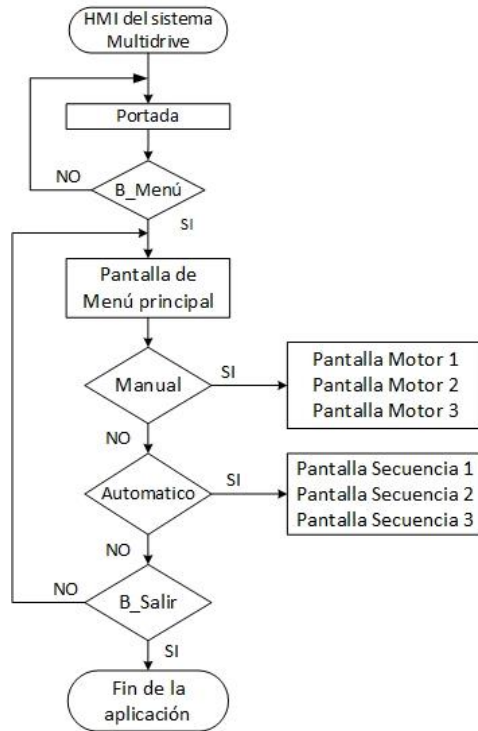


Figura 3-58. Diagrama de flujo de secuencia de pantallas de la HMI

3.7.3 Pantalla de menú

En esta pantalla, Figura 3-59, se activan los modos de control y se direccionan a todas las pantallas de operación, se tienen elementos indicadores del sistema en falla o listo para su funcionamiento y si los motores están en funcionamiento.

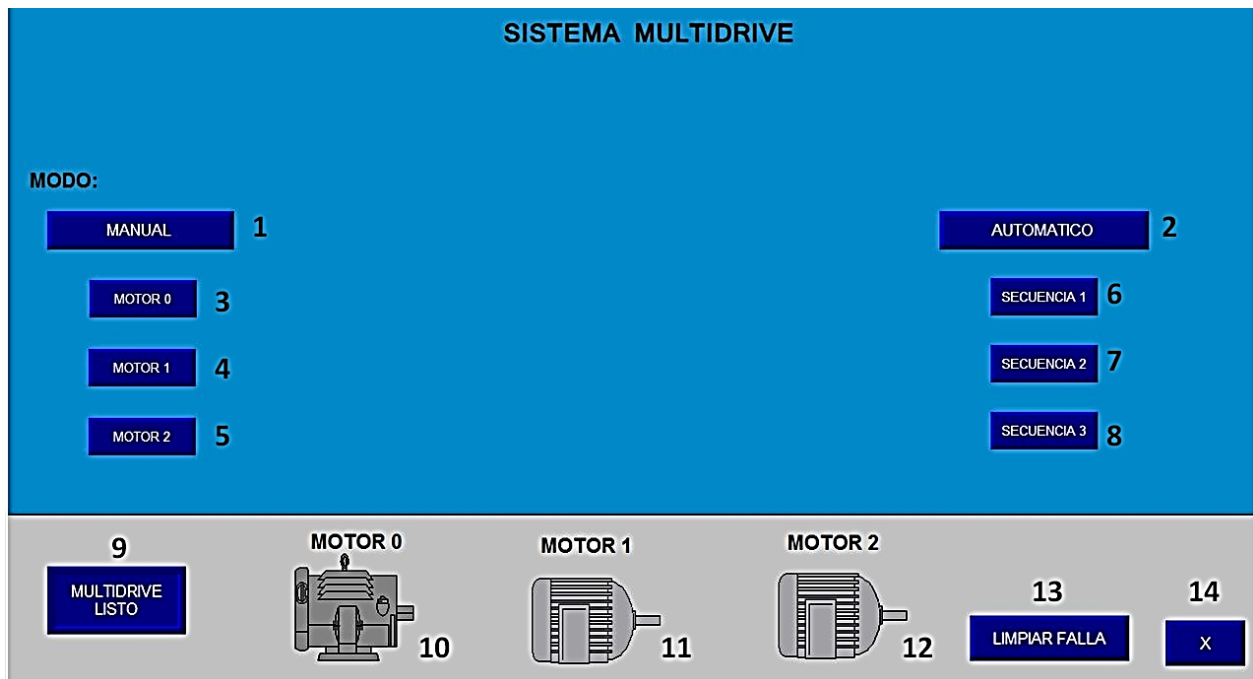


Figura 3-59. Elementos de la pantalla de menú

La Tabla 3-4 muestra la función de cada uno de los elementos de esta pantalla, el objeto a programar corresponde al elemento gráfico cargado en la pantalla de la HMI con el tag generado en el RSLogix 5000.

Tabla 3-4. Descripción de los elementos de la pantalla menú

Ítem	Objeto a programar	Tipo o función	Tag asociado
1	Push botón retentivo	Activar modo manual	HMI_Control_Manual
2	Push botón retentivo	Activar modo automático	HMI_Control_Automatico
3	Go to	Direcciona a pantalla de motor 0	
4	Go to	Direcciona a pantalla de motor 1	
5	Go to	Direcciona a pantalla de motor 2	
6	Go to	Direcciona a pantalla de secuencia 1	
7	Go to	Direcciona a pantalla de secuencia 2	
8	Go to	Direcciona a pantalla de secuencia 3	
9	Indicador	Indicar si hay fallas en el sistema	PF40_Faulted
10	Indicador	Indicar si el motor 0 está en funcionamiento	PF40_A_Outputfreq
11	Indicador	Indicar si el motor 1 está en funcionamiento	PF40_B_Outputfreq
12	Indicador	Indicar si el motor 2 está en funcionamiento	PF40_C_Outputfreq
13	Push botón momentáneo	Quitar fallas del sistema multidrive	ClearFaults
14		Salir de la aplicación	

La función Go to permite navegar entre las pantallas de la HMI, este botón es asignado a una pantalla y direcciona a dicha pantalla cuando este botón es accionado. A cada pantalla diseñada se le agrego este botón para regresar al menú principal.

El bloque de push botón retentivo permite forzar el valor de un bit, quedando enclavado en este valor, en la Figura 3-60 se muestra como se asigna el tag del RSLogix 5000, posteriormente se asignan los estados de las leyendas del push botón cuando este activado y desactivado.

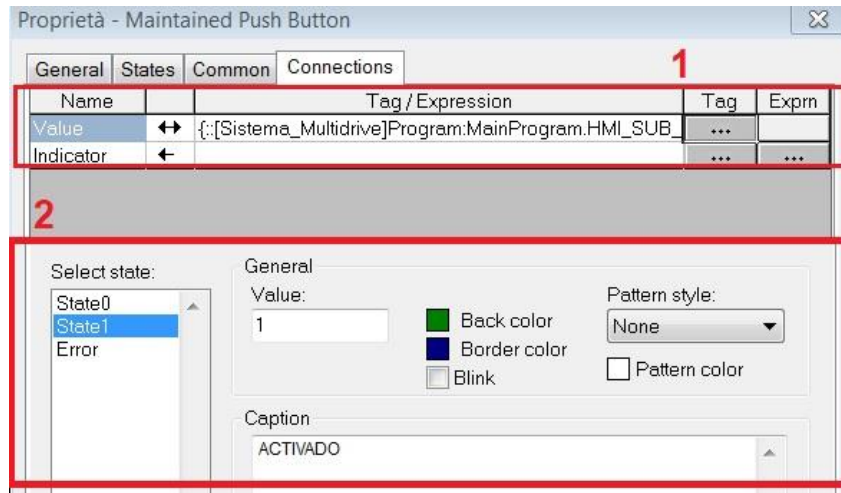


Figura 3-60. Asignación de tag al push botón

3.7.4 Pantalla de control manual del motor

La Figura 3-61 muestra la pantalla de control manual de los motores, aquí se envía un valor de velocidad en RPM y se monitorea la velocidad y frecuencia de salida del drive.



Figura 3-61. Pantalla de control manual de motor

La Tabla 3-5 describe los elementos que tiene esta pantalla junto con su funcionamiento y tag asociado.

Tabla 3-5. Descripción de elementos de la pantalla de control manual

Ítem	Objeto a programar	Tipo o función	Tag asociado
1	Push botón retentivo	Llamar a la subrutina de control manual del motor	HMI_SUB_DRIVE0

2	Push botón momentáneo	Activar el drive	HMI_Start_Drive0
3	Push botón momentáneo	Parar motor	HMI_Stop_Drive0
4	Push botón momentáneo	Sentido de giro en atraso	HMI_Reverse_Drive0
5	Push botón momentáneo	Sentido de giro en adelante	HMI_Forward_Drive0
6	Push botón momentáneo	Joggeo en motor	HMI_Jog_Drive0
7	Entrada numérica	Insertar las RPM de operación del motor	HMI_RPM_DRIVE0
8	Salida numérica	Visualizar la frecuencia enviada por puerto de comunicación	O.PF40_A_FreqCommand
9	Salida numérica	Visualizar la frecuencia de salida de las líneas del drive	I.PF40_A_OutputFreq
10	Salida numérica	Visualizar las RPM de operación del motor	RPM_SALIDA_M0
11	Indicador multiestado	Indicador de falla en drive	I.PF40_A_Faulted
12	Indicador multiestado	Indicador de alarma drive	I.PF40_A_Alarm
13	Indicador multiestado	Indicador de motor desacelerando	I.PF40_A_Decelerating
14	Indicador multiestado	Indicador de motor acelerando	I.PF40_A_Accelerating
15	Indicador multiestado	Drive trabajando	I.PF40_A_Active
16	Indicador multiestado	Drive listo para la operación	I.PF40_Ready
17	Indicador multiestado	Indicador de alcance de frecuencia	I.PF40_AtReference
18	Pantalla de tendencia	Gráfica de envió de bits	O.PF40_A_Stop O.PF40_A_Start O.PF40_A_Forward O.PF40_A_Reverse O.PF40_A_Jog
19	Pantalla de tendencia	Gráfica de frecuencia de referencia y salida	O.PF40_A_OuputFreq I.PF40_A_OutputFreq
20	Pantalla de tendencia	Grafica de RPM ingresadas y de salida	HMI_RPM_DRIVE0 RPM_SALIDA_D0

El elemento 1 de la pantalla es un seguro que permite llamar a la rutina cuando es accionado, esto con la finalidad de no llamar a 2 subrutinas a la vez y sobre escribir el tag de la referencia de frecuencia del drive.

Para ingresar el valor de las RPM se insertó un bloque de entrada numérica, una vez vinculado al tag como se mostró en la tabla anterior, se asignó una etiqueta a este bloque para que muestre el valor de las RPM en la pantalla, en la Figura 3-62 se observa que en la pestaña “label” se insertó como variable el tag “HMI_RPM_DRIVE0” que imprimirá en pantalla el valor ingresado.

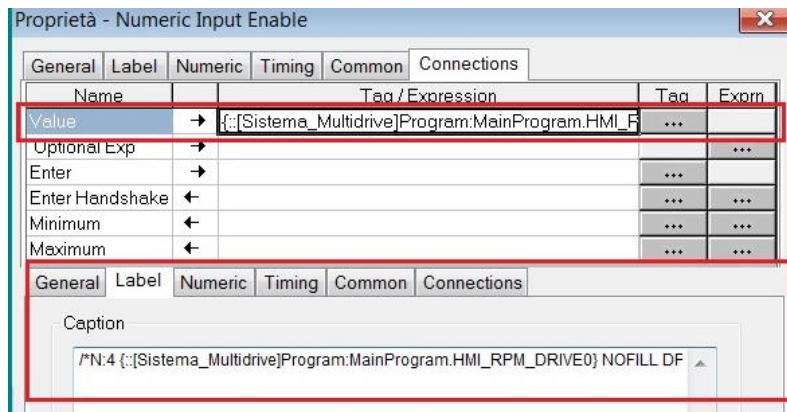


Figura 3-62. Configuración de la entrada numérica.

El procedimiento anterior fue utilizado para todos los indicadores numéricos de la pantalla.

Se tienen también indicadores luminosos que indican cuando el variador está listo para recibir órdenes de mando mediante el protocolo de comunicación. Estos elementos fueron animados con colores asignando estados.

Como se mencionó el comando de referencia de frecuencia de PowerFlex 40 está en función de múltiplos de 10, para la gráfica de comparación de frecuencia (elemento 19), se creó una expresión matemática que divide estos tags entre 10 para tener el valor real de frecuencia y graficarlos. En las pantallas de tendencias se ajustó el tiempo de muestreo a 500 ms para tener lecturas de frecuencia y velocidad, para la gráfica de bits se ajustó el tiempo de muestreo a 100 ms, ya que su activación es instantánea.

3.7.5 Pantalla de control de secuencia automática

La pantalla de control de secuencia automática tiene una estructura similar en la ubicación de elementos de la pantalla de control manual. En la Figura 3-63, se observa que se ingresan 3 frecuencias de operación para cada uno de los motores y se inicia la secuencia de operación.

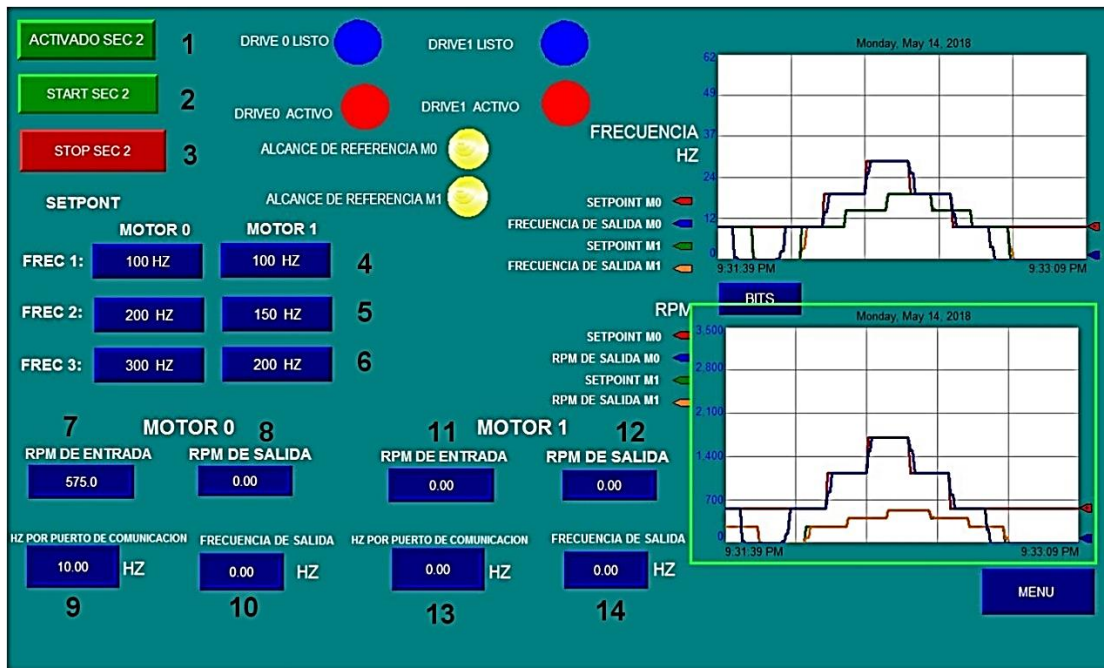


Figura 3-63. Pantalla de control de secuencia automática 1

La Tabla 3-6 describe los elementos de esta pantalla, se tienen elementos que indican las frecuencias y velocidades enviadas por protocolo de comunicación y de salida de los drives.

Tabla 3-6. Elementos de la pantalla de control de secuencia automática

Ítem	Objeto a programar	Tipo o función	Tag asociado
1	Push botón retentivo	Activar secuencia automática motor 0	HMI_SECUENCIA_AUTOMATICA_2DRIVES
2	Push botón momentáneo	Iniciar secuencia temporizada	HMI_Start_Secuencia2
3	Push botón momentáneo	Parar secuencia de operación	HMI_Stop_Secuencia2
4	Entrada numérica	Ingresar valores de primera frecuencia para motor 0 y motor 1	Frecuencia1_Secuencia2_Drive0 Frecuencia1_Secuencia2_Drive1
5	Entrada numérica	Ingresar valores de segunda frecuencia para motor 0 y motor 1	Frecuencia2_Secuencia2_Drive0 Frecuencia2_Secuencia2_Drive1
6	Entrada numérica	Ingresar valores de tercera frecuencia para motor 0 y motor 1	Frecuencia3_Secuencia2_Drive0 Frecuencia3_Secuencia2_Drive1

7	Salida numérica	Indicador de la velocidad de entrada motor 0	RPM_ENTRADA_D0
8	Salida numérica	Velocidad de salida del motor 0	RPM_SALIDA_D0
9	Salida numérica	Valor de frecuencia enviada por protocolo de comunicación motor 0	O.PF40_A_FreqCommand
10	Salida numérica	Frecuencia de salida del drive del motor 0	I.PF40_A_OutputFreq
11	Salida numérica	Indicador de velocidad de entrada motor 1	RPM_ENTRADA_D1
12	Salida numérica	Velocidad de salida del motor 1	RPM_SALIDA_D1
13	Salida numérica	Valor de frecuencia enviada por protocolo de comunicación motor 1	O.PF40_B_FreqCommand
14	Salida numérica	Frecuencia de salida del drive del motor 1	I.PF40_B_OutputFreq

CAPÍTULO 4. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL SISTEMA MULTIDRIVE

Se presentan los resultados de las distintas pruebas de comunicación realizadas a los drives mediante el control manual de los motores y las secuencias automáticas programadas.

4.1 Prueba de comunicación de la tarjeta 22-COMM-E con los drives

Una vez configurada la tarjeta 22-COMM-E en modo de operación multidrive en el software CCW y estando la red EtherNet/IP conectada junto con el bus RS485, se verificó el estado de los drives, esto para asegurar que se tiene acceso a los parámetros de operación de cada uno de ellos. La Figura 4-1 muestra los datos que están obtenidos mediante el puerto de comunicación, se indica que el drive está listo para la operación y se observa que la señal de frecuencia es obtenida mediante la red.

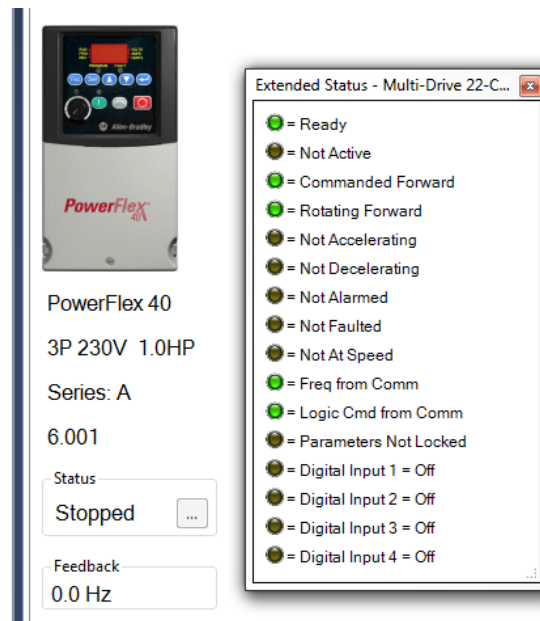


Figura 4-1. Estado del drive 0 integrado en sistema multidrive.

Si uno de los drives conectados en el bus del protocolo RS485 falla, los demás dispositivos no se ven afectados, pero si se pierde la comunicación con el drive tipo maestro que tiene la tarjeta de comunicación instalada se pierde el control de todos los drives conectados en la red.

4.2 Prueba de enlace de la tarjeta 22-COMM-E con el RSLogix 5000

Mediante el software RSLogix 5000 se llevó a cabo la programación de las secuencias de operación, la integración de la tarjeta 22-COMM-E como un módulo de aplicación de la red EtherNet/IP generó una lista de tags, antes de llevar a cabo la programación se hicieron pruebas con los tags para verificar que hay comunicación entre controlador y el sistema multidrive.

Al descargar la nueva configuración al PAC por razones de seguridad los variadores se van a falla, mediante el tag "O.PF40_A_ClearFaults" se quitó la falla forzando este registro a 1, una vez quitada la falla en cada uno de los drives ahora se pueden operar.

Como se muestra en la Figura 4-2 se forzó a 1 el bit de start para accionar el drive, inmediatamente de ingreso la frecuencia de 30 Hz, para ello se ingresó el valor de 300 al freqcommand.

SISTEMA_MULTIDRIVE:O.PF40_A_LogicCom...	2#000...		Binary	INT
SISTEMA_MULTIDRIVE:O.PF40_A_Stop	0		Decimal	BOOL
SISTEMA_MULTIDRIVE:O.PF40_A_Start	1		Decimal	BOOL
SISTEMA_MULTIDRIVE:O.PF40_A_Jog	0		Decimal	BOOL
SISTEMA_MULTIDRIVE:O.PF40_A_ClearFaults	0		Decimal	BOOL
SISTEMA_MULTIDRIVE:O.PF40_A_Forward	0		Decimal	BOOL
SISTEMA_MULTIDRIVE:O.PF40_A_Reverse	1		Decimal	BOOL
SISTEMA_MULTIDRIVE:O.PF40_A_LocalControl	0		Decimal	BOOL
SISTEMA_MULTIDRIVE:O.PF40_A_MOPIncr...	0		Decimal	BOOL
SISTEMA_MULTIDRIVE:O.PF40_A_AccelRate1	0		Decimal	BOOL
SISTEMA_MULTIDRIVE:O.PF40_A_AccelRate2	0		Decimal	BOOL
SISTEMA_MULTIDRIVE:O.PF40_A_DecelRate1	0		Decimal	BOOL
SISTEMA_MULTIDRIVE:O.PF40_A_DecelRate2	0		Decimal	BOOL
SISTEMA_MULTIDRIVE:O.PF40_A_FreqSel01	0		Decimal	BOOL
SISTEMA_MULTIDRIVE:O.PF40_A_FreqSel02	0		Decimal	BOOL
SISTEMA_MULTIDRIVE:O.PF40_A_FreqSel03	0		Decimal	BOOL
SISTEMA_MULTIDRIVE:O.PF40_A_MOPDecr...	0		Decimal	BOOL
SISTEMA_MULTIDRIVE:O.PF40_A_FreqCom...	300		Decimal	INT

Figura 4-2. Forzado de bits para envío de señales al PowerFlex 40

El motor se accionó, con esto se verificó que hay una comunicación entre el controlador y los drives, adicionalmente se forzaron los bits de paro, sentido de giro, una vez que comprueban todas las ordenes de mando mencionadas en cada uno de los drives se prosiguió a programar las secuencias de operación.

4.3 Prueba de velocidad de salida del drive

Esta prueba consiste en comparar los valores de frecuencia y velocidad de salida del drive con los valores enviados por medio de la red de comunicación. Dentro del RSLogix 5000 se agregaron pantallas de tendencias las cuales grafican el comportamiento de los tags Freqcommand y OutputFreq.

4.3.1 Respuesta de velocidad mediante control manual

Para esta prueba se llevó al motor a su velocidad máxima de operación para ello se ingresó 3450 RPM de operación en la pantalla de control manual de la HMI. En la gráfica de la Figura 4-3 se observan los resultados obtenidos.

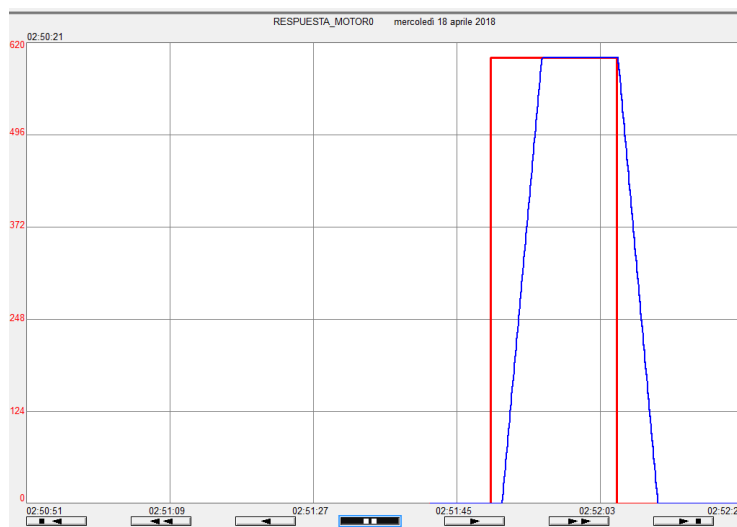


Figura 4-3. Frecuencia máxima de operación del motor 0

El valor de referencia (línea roja) aparece como una señal tipo escalón que converge en 60 Hz, la frecuencia de salida del drive esta graficada por la línea azul, esta tiene una rampa de aceleración y desaceleración que corresponde a los 5 segundos previamente configurados, la señal de frecuencia de salida del variador si alcanzo la señal de referencia.

Como se mencionó en el capítulo III se programó la ecuación de la recta en una instrucción add-on para obtener las RPM de salida. Para comparar la velocidad de salida con la señal de referencia enviada en la HMI, se decidió operar el motor a 1725 RPM que corresponden a 30 Hz.

En el software CCW se visualizan los parámetros del drive cuando está en operación, la Figura 4-4, muestra que la información es obtenida por el puerto 0 para el primer drive, se tienen parámetros que corresponden a la frecuencia, corriente y voltaje de salida. El PowerFlex 40 tiene un parámetro llamando pantalla de proceso, aquí se multiplica la frecuencia de salida por el factor de conversión para mostrar las RPM. Todos estos parámetros solo son de lectura y permiten conocer el estado del drive.

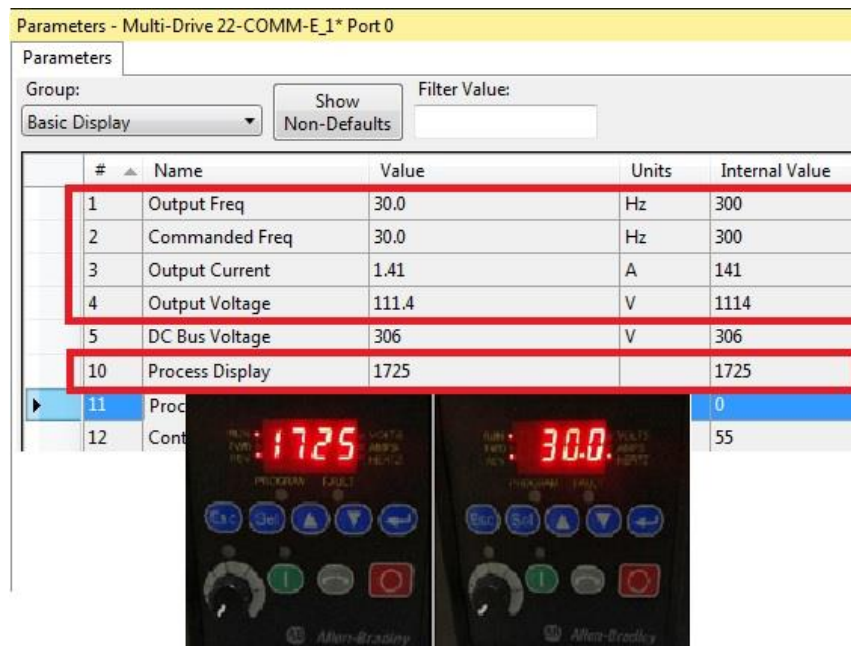


Figura 4-4. Indicación de RPM y frecuencia en panel.

4.3.2 Control de velocidad a bajas frecuencias

El modo de control implementado a los motores en este proyecto es el control vectorial, como se indicó en el capítulo I, este tipo de control permite llevar a un motor de inducción a operar con a bajas frecuencias, permitiendo tener un control de par y velocidad de manera exacta.

Se realizaron pruebas experimentalmente para conocer el valor de frecuencia mínima a la cual gira el motor, los resultados fueron registrados en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1. Frecuencias mínimas de operación de los motores.

Motor	RPM	Frecuencia de salida (Hz)	Corriente de salida (A)	Voltaje de salida (V)
Motor 0	250	4.3	1.21	19.6
Motor 1	180	6.6	0.60	28.3
Motor 2	150	5.5	0.66	30.6

Para esta prueba el motor 0 fue trabajado al vacío sin carga, teniendo la menor frecuencia de operación. Los motores 1 y 2 están acoplados a un sistema mecánico de bandas transportadoras, por lo cual, tienen una frecuencia mayor para vencer este par de inercia. En base a los datos obtenidos en las pruebas se determina que a una mayor frecuencia de operación implica una mayor corriente y voltaje de salida.

4.4 Monitoreo de instrucciones en control manual

Esta prueba se lleva a cabo en la pantalla de control manual de la HMI, consiste en visualizar el comportamiento de los tags de entrada y salida del drive.

4.4.1 Control manual del motor 0

La Figura 4-5 muestra la pantalla de operación para el drive 0, en el cual se ingresó la velocidad de 1725 RPM, lo que corresponde una frecuencia de 30 Hz, este valor es enviado al Freqcommand, se tienen 2 graficas, una que muestra el comportamiento de la frecuencia, la línea roja corresponde al valor enviado por comunicación y la línea azul es el valor de salida de frecuencia en el drive.

En la esquina superior derecha de la pantalla se tiene la gráfica de bits, se observa que cuando se acciona el bit start, inmediatamente inicia la rampa de aceleración después de unos segundos alcanza la referencia, y se activa el bit "atReferrence" cuando se cambia el sentido de giro, se observa que tanto la velocidad como frecuencia disminuyen y aumentan en forma de rampa.



Figura 4-5. Comportamiento de bits en control manual motor 0.

4.4.2 Control manual del motor 1

Para el motor 1, se enviaron 685 RPM, lo que corresponde una frecuencia de operación de 25 Hz, como se observa en la Figura 4-6, se enviaron los 25 Hz por puerto de comunicación, se dejaron pasar algunos segundos si presionar el botón de start, por lo cual aparece la línea de referencia desde el principio, cuando se activa start, inicia la rampa de aceleración, se realizó cambio de sentido de giro y por último cuando se presionó el botón de paro la velocidad decreció de manera progresiva.

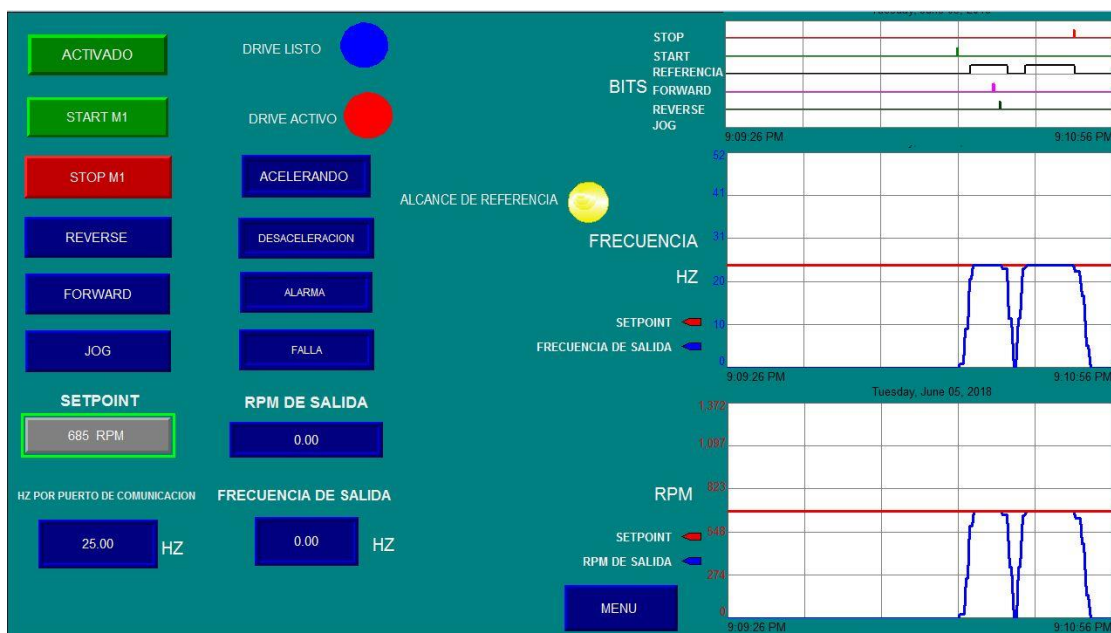


Figura 4-6. Pantalla de control manual del motor 1.

4.4.3 Control manual del motor 2

Como se observa en la Figura 4-7, para este motor de ingresaron 300 RPM, pero velocidad de salida se obtuvo 298.7 RPM, un valor aproximado al enviado a través del protocolo de comunicación.

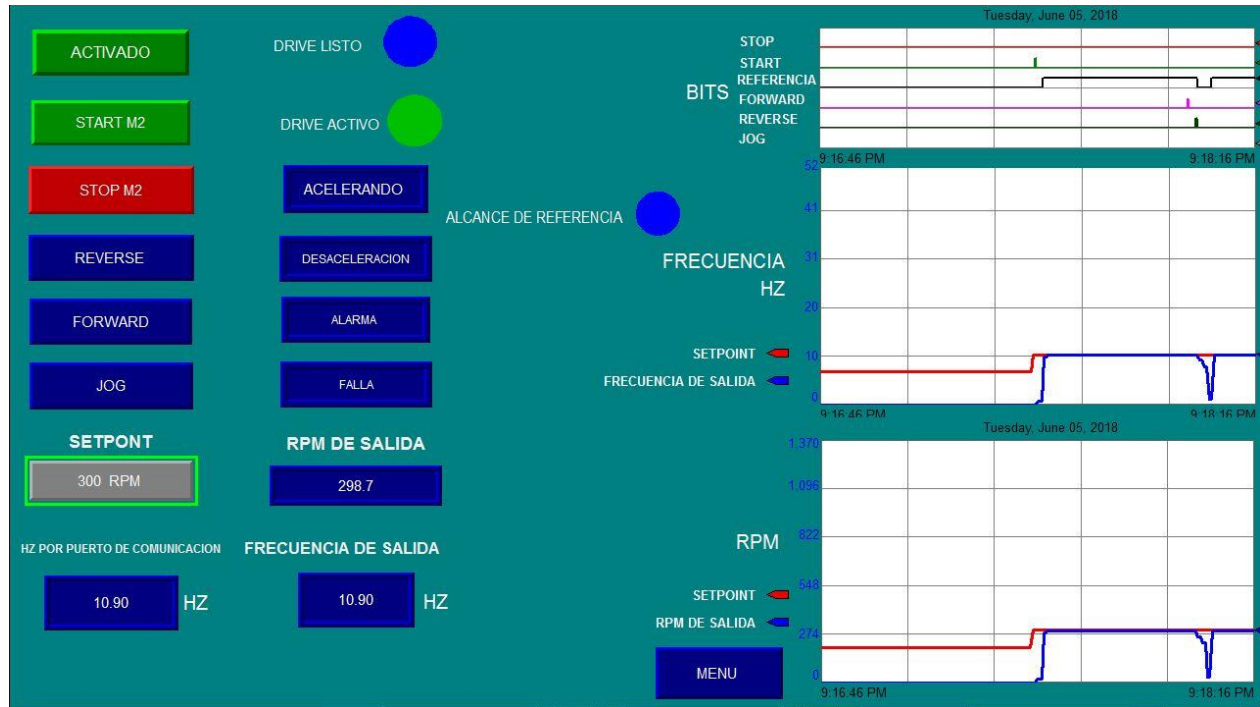


Figura 4-7. Pantalla de control manual del motor 2.

4.5 Monitoreo de instrucciones de secuencias automáticas

4.5.1 Secuencia automática 1

La Figura 4-8, muestra el comportamiento de los tags utilizados para generar esta secuencia, en la cual solo se trabaja el motor 0. Cómo la secuencia incrementa la frecuencia de operación cada 5 segundos en 10 Hz, cuando se lleva a cabo este incremento se activa el bit de aceleración, cuando alcanza el valor de referencia del Freqcommand se desactiva el valor de este tag. Cuando el motor pasa de una mayor a menor velocidad se activa el bit de desaceleración. Se observa también que se tiene un tag de señal que representa que el drive está trabajado cuando ocurre la secuencia, esta para a valor cero cuando el bit de paro pasa a tomar el valor de uno.

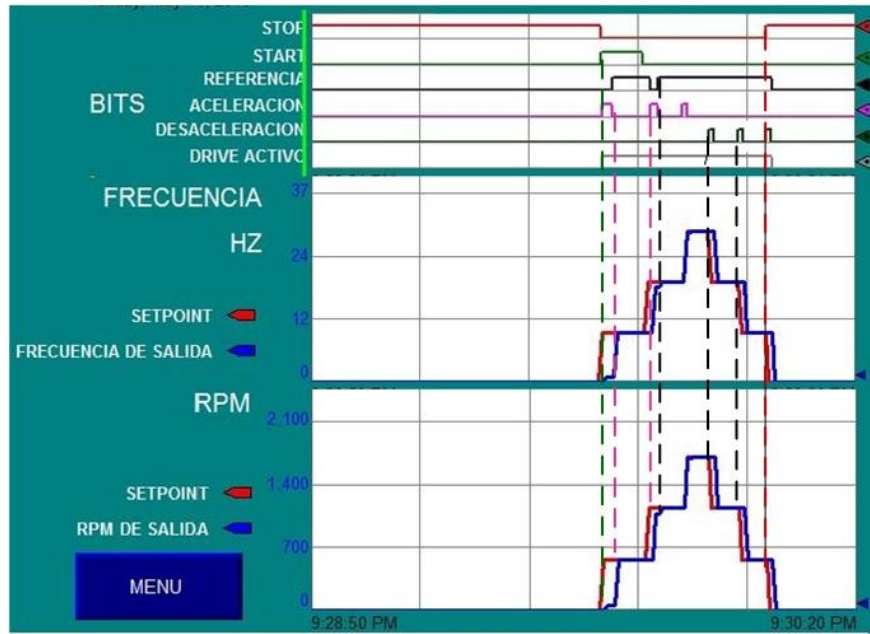


Figura 4-8. Comportamiento de bits de secuencia automática 1

4.5.2 Secuencia automática 2

Esta secuencia trabaja con el motor 0 y motor 1, en la Figura 4-9 se observa que se tienen las 3 frecuencias de operación correspondientes para cada motor, en la pantalla también aparecen indicadores de cuando los drives están activos, las frecuencias de operación son de manera escalonada, es decir, aumentan progresivamente.

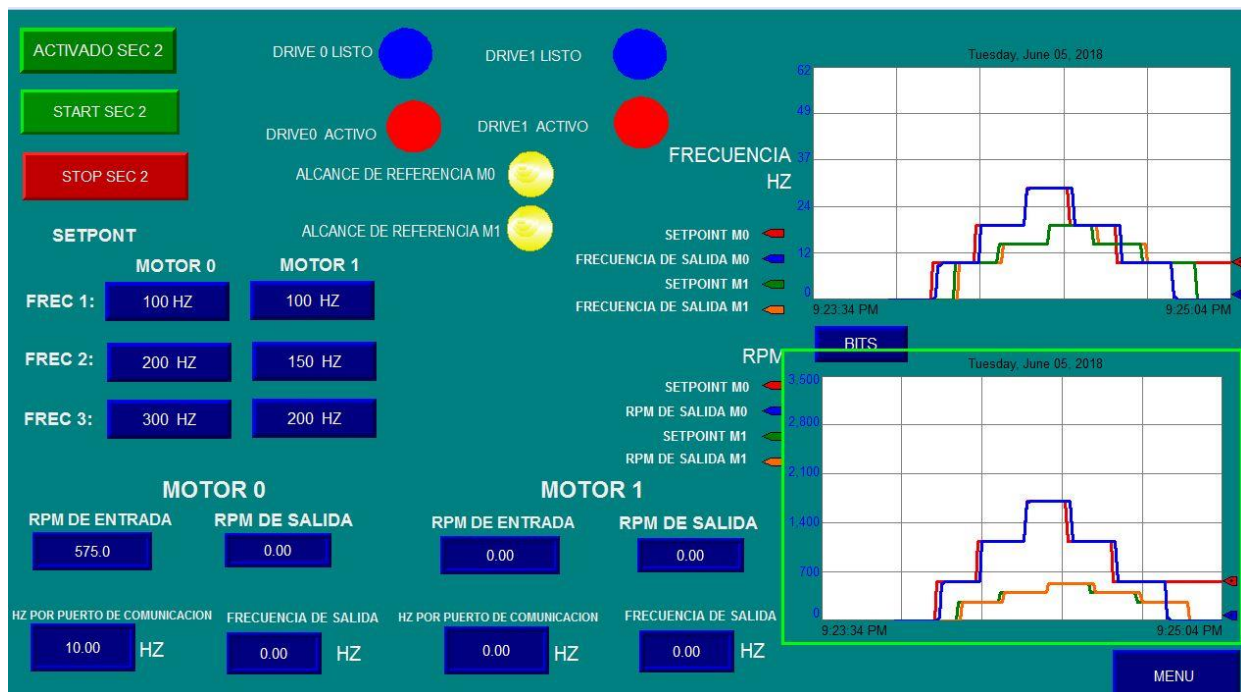


Figura 4-9. Pantalla secuencia automática 2

Dado que en la pantalla principal de la secuencia 2 no hay espacio para graficar el comportamiento de bits de esta secuencia, se agregó una pantalla donde se muestran los bits de ambos drives, en la Figura 4-10 se observa que los tags de aceleración se inician primero ya que las frecuencias aumentan, cuando acelera el motor el bit de alcance de referencia pasa a tener un estado bajo, esto también ocurre con el bit de desaceleración, la duración de los bits de aceleración es menor cuando el cambio de frecuencias es muy cercano.



Figura 4-10. Comportamiento de bits de secuencia automática 2

4.5.3 Secuencia automática 3

Esta secuencia trabaja con los 3 motores simultáneamente, y solo se tienen 2 frecuencias de operación para cada motor, el motor 0 tiene la frecuencia de operación más alta la cual es 30 Hz, los motores 1 y 2 tienen trabajos a 20 Hz. Como se observa en la Figura 4-11 se graficaron los bits de los 3 motores. El motor 0 es el primero en activarse, posteriormente el motor 1 y motor 2. Se graficaron los bits de aceleración y desaceleración y alcance de referencia.

En esta secuencia se observa que para los motores 1 y 2 es menor el tiempo para alcanzar la referencia de frecuencia.

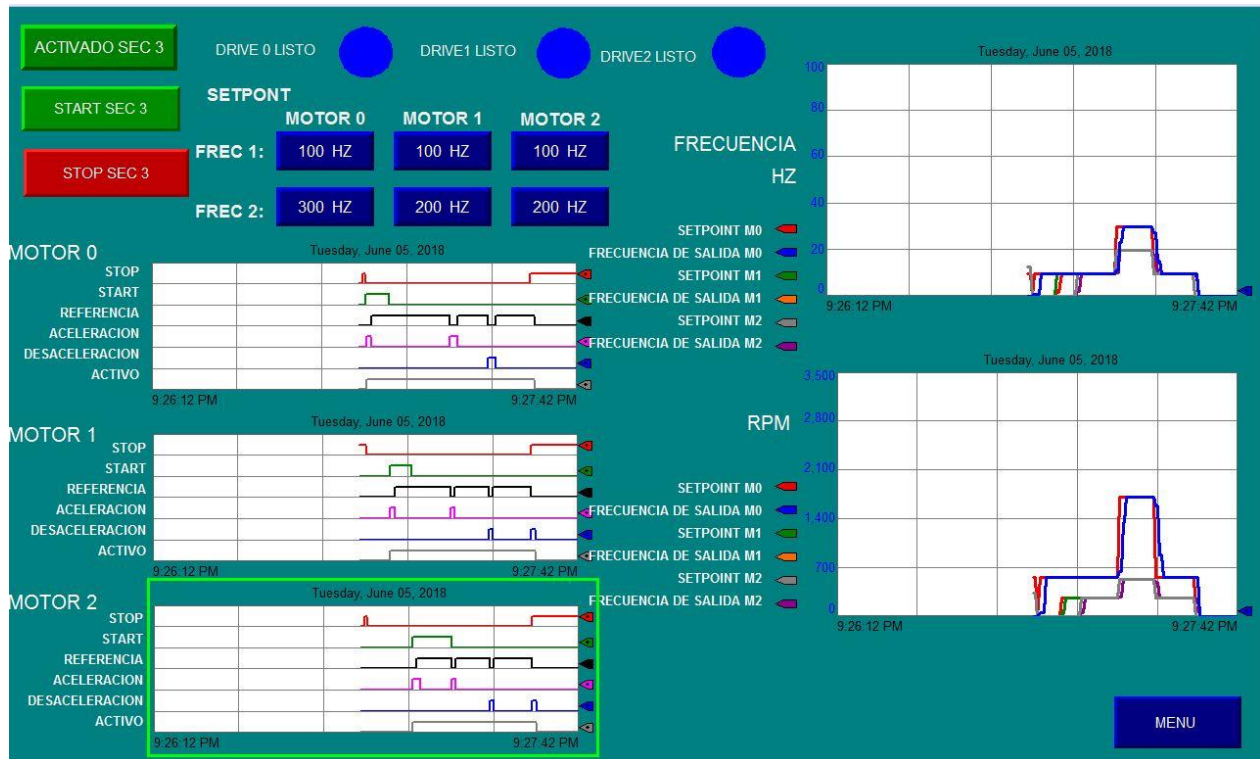


Figura 4-11. Pantalla de operación de la secuencia 3

CAPÍTULO 5. COSTOS

En este apartado se desarrollan los costos de implementación del proyecto.

5.1 Costos de los equipos del tablero de control

Los equipos utilizados en este proyecto son de la compañía Rockwell Automation, la cual tiene un software de costos. Dentro del software “Integrated Architecture Builder” se añadieron los dispositivos utilizados en este proyecto. La Tabla 5-1 es generada por este software y contiene los precios actuales de los componentes.

Tabla 5-1. Costos de los equipos del tablero de control.

Cantidad	# Catálogo	Descripción	Precio unitario (USD)	Precio total (USD)
1	1756-A7	1756 Chasis 7 ranuras	565.00	565.00
1	1756-PA75	Fuente de alimentación 85-265 V CA (5V a 13 A)	1,240.00	1,240.00
1	1756-L71	Logix5571 Controlador con 2 Mb de memoria	5,930.00	5,930.00
1	1756-EN2T	Módulo EtherNet 10-100M	3,020.00	3,020.00
1	1756-DNB	Módulo DeviceNet / Módulo Scanner. Serie E	1,380.00	1,380.00
1	1756-IB16	Entradas 16 Pts. 10-31 V CD (20 Pin)	400.00	400.00
1	1756-TBNH	Bloque de tornillos con abrazadera 20 localidades	77.10	77.10
1	1756-OB32	Salidas 32 Pts. 10-31 V DC (36 Pin)	748.00	748.00
1	1756-TBCH	Bloque de tornillos con abrazadera 36 Pin	95.50	95.50
3	22B-B5P0N104	PowerFlex40 Drive	759.00	2277
1	22-COMM-E	Componente de PowerFlex, adaptador EtherNet/IP	529.00	529.00
1	2097-V33PR1-LM (Pos)	120/240 V CA, 1 a 3 fases, 2 A RMS, 500W,	759	759.00
1	2711P-B10C4A9	Terminal gráfica, PanelView Plus 6 con características extendidas, 1000, teclado y táctil, Color, CA, Ethernet, RS232	6,610.00	6,610.00
1	1783-BMS10CGN	Stratix 5700, 8 líneas 10/100 puertos	2,680.00	2,680.00
4	1585J-M4TBJM-2	Cable de conexión: RJ45 macho/RJ45 macho, 4-conductores, 2 metros	42.00	168.00
1	1585J-M8UBJM-2	Cable de conexión: RJ45 macho/RJ45 macho, 8-conductores, 2 metros	54.70	54.70
			Total:	\$ 26,533.3

El precio de los equipos del proyecto es de \$ 26,533.3 USD, si se considera el valor del dólar a \$ 20 MXN. El precio de los equipos aproximadamente es de \$530,666.00 MXN. Esto no incluye impuestos ni gastos de transporte.

5.2 Costos de material eléctrico

La Tabla 5-2 muestra los costos del material eléctrico utilizado para la elaboración del tablero de control, contempla elementos auxiliares para la conexión y funcionamiento del sistema multidrive.

Tabla 5-2. Costos de material eléctrico

Cantidad	Concepto	Unidad	Precio unitario	Precio total en MXN
1	Cable condumex 14 AWG rojo	Rollo (100 m)	890.00	890.00
1	Cable condumex 18 AWG negro	Rollo (100 m)	400.00	400.00
1	Torre de señales LCE-302U	PZA	3,363.00	3,363.00
3	Conector RS485 AK-U0-RJ45-TB2P	PZA	220.00	660.00
10	Cable utp categoría 6	Metro	15.00	150.00
28	Clemas de conexión	PZA	15.00	420.00
1	Clema doble portafusible	PZA	25.00	25.00
2	Riel DIN 35 mm x 7.5 mm	Metro	80.00	160.00
6	Botones pulsadores NA 12 mm	PZA	21.50	129.00
6	Lámpara piloto 24 V 22 mm	PZA	23.00	138.00
4	Botón pulsador metálico rojo NC 22 mm	PZA	60.00	240.00
1	Botón pulsador metálico verde NA 22 mm	PZA	60.00	60.00
15	Selector eléctrico 2 posiciones 22 mm	PZA	75.00	1,125.00
3	Botonera de plástico ABB para 6 selectores	PZA	503.50	1,510.50
1	Botonera metálica Allen-Bradley 2 orificios	PZA	950.00	950.00
1	Relevador OMRON MK2P-S	PZA	159.00	159.00
1	Canaleta ranurada PVC 2" ancho por 6' largo	PZA	95.25	95.25
50	Terminal eléctrica punta 14 AWG con forro	PZA	2.00	100.00
50	Terminal eléctrica punta 18 AWG con forro	PZA	2.00	100.00
			Total	\$ 10,674.75

Los costos del sistema de bandas transportadoras están desarrollados en la Tabla 5-3, se compone de un sistema mecánico y un reductor de velocidad trifásico.

Tabla 5-3. Costos de sistema de bandas transportadoras

Cantidad	Concepto	Unidad	Precio unitario	Precio total en MXN
3	Reductor REXROTH 0.18 Kw, 50/60 HZ 230/400 V, 0.75/1.3 A	PZA	6,534.24	19,602.72
3	Banda transportadora marca BORUNTE, capacidad de carga 15 kg, base de aluminio, cinta de acero inoxidable, 2.5 m de largo, 0.3 m ancho.	PZA.	19,212.44	57,637.32
			Total	\$ 77,240.04

5.3 Costo de ingeniería

Los costos de ingeniería y mano de obra de un proyecto dependen del tamaño de la empresa tomando en cuenta también si es nacional o extranjera. Basándose en el estudio de la revista digital "Energía a Debate" que proporciona una tabla con los valores de horas hombre tomando en cuenta estas variables, en este caso es una empresa mexicana cuya

plantilla de personal está entre 150 a 700 empleados. Se tiene un rango que va de los 300 a 400 pesos.

Los cotos para este proyecto en cuanto a personal son:

- Hora hombre dibujante: 300.00 MXN
- Hora hombre programador: 400 MXN
- Hora hombre diseñador: 400 MXN

En base a la experiencia obtenida en la elaboración del proyecto se tiene la estimación de las horas hombre, la Tabla 5-4 muestra los costos por cada etapa del proyecto. El montaje del tablero de control es realizado por el diseñador.

Tabla 5-4. Costos de horas-hombre

Actividad	Horas-Hombre			Costo en MXN
	Programador	Diseñador	Dibujante	
Diseño de circuitos de alimentación.		2	3	1,700.00
Diseño de los circuitos de entradas y salidas del sistema		4	4	2,800.00
Diseño de las topologías de red		2	2	1,400.00
Diseño de la distribución del tablero de control		6	6	4,200.00
Pruebas al tablero de control	1	2		1,200.00
Configuración de red Ethernet/IP	1			400.00
Integración del sistema multidrive con RS485	2		1	1,200.00
Proyecto en RSLogix 5000	1			400.00
Programación de secuencias manuales	3			1,200.00
Programación de secuencias automáticas	10			4000.00
Elaboración de HMI en Factory Talk View	15			6000.00
Total				\$ 24,500.00

5.4 Costo total del proyecto

Una vez calculado los costos de las diferentes partes del proyecto se suman estos montos aumentando el 16% de IVA, la Tabla 5-5 muestra el desglose del costo total del proyecto.

Tabla 5-5. Costo total del proyecto

Costo de equipos del tablero de control	530,666.00
Costo de material eléctrico	10,674.75
Costo de bandas transportadoras	77,240.04
Costo de ingeniería	24,500.00
Subtotal	643,080.79
+ 16% de IVA	102,892.93
Total	\$ 745,973.72

El costo del proyecto es de \$ 745,973.72 MXN incluyendo todos los equipos para su funcionamiento y mano de obra.

Conclusiones

En este proyecto se demostró la eficiencia de la implementación de las redes industriales de comunicación en un proceso de automatización. El sistema multidrive utiliza la red de comunicación EtherNet/IP y el estándar RS485 para crear un bus de comunicación entre drives, de esta forma se tiene un enlace con el controlador y los motores instalados en campo.

Mediante las redes de comunicación se eliminó el cableado tradicional, el cual implica ocupar entradas y salidas del controlador, haciendo una instalación difícil en cuanto al número de cables y la distancia a la cual está instalado el drive respecto del tablero de control.

Con la red se envían y reciben datos en tiempo real de la operación y estado de los drives. Con el control manual se demostró que se puede controlar independientemente cada motor, sin estar condicionado a la operación de los otros drives. Respecto a las topologías implementadas, se resalta que la topología tipo bus entre drives hace que se tenga un funcionamiento independiente de cada variador, es decir, si un variador se va a falla no afecta en el funcionamiento de los demás variadores.

Dado que el sistema multidrive genera una serie de tags, estos son de gran utilidad para la programación de secuencias de operación que resultan ser complejas, en este proyecto se demostró con las secuencias automáticas de operación donde se sincroniza el trabajo de diferentes motores a la vez.

Analizando los costos del proyecto se concluye que este tipo de sistema se ajusta para aplicaciones complejas de empresas grandes, en donde los procesos tienen un número considerable de motores a controlar, facilitando la instalación y mantenimiento. Se reducen los nodos de red y los costos, ya que, con una tarjeta de comunicación se controlan cinco drives. Como se explicó en el desarrollo del proyecto, para controlar los drives no se realizó ninguna conexión de las tarjetas de entradas y salidas del controlador hacia los bornes de drives.

Finalmente se concluye que las redes de comunicación juegan un papel importante en la integración de sistemas de automatización, esto debido que los procesos cada vez son más exigentes. En este proyecto se implementaron estándares de comunicación actuales en la industria, por lo que es necesario tener bases sólidas como ingeniero en control y automatización. Con los resultados obtenidos en las pruebas se da por hecho que se alcanzan los objetivos planteados al inicio del trabajo.

Trabajos futuros

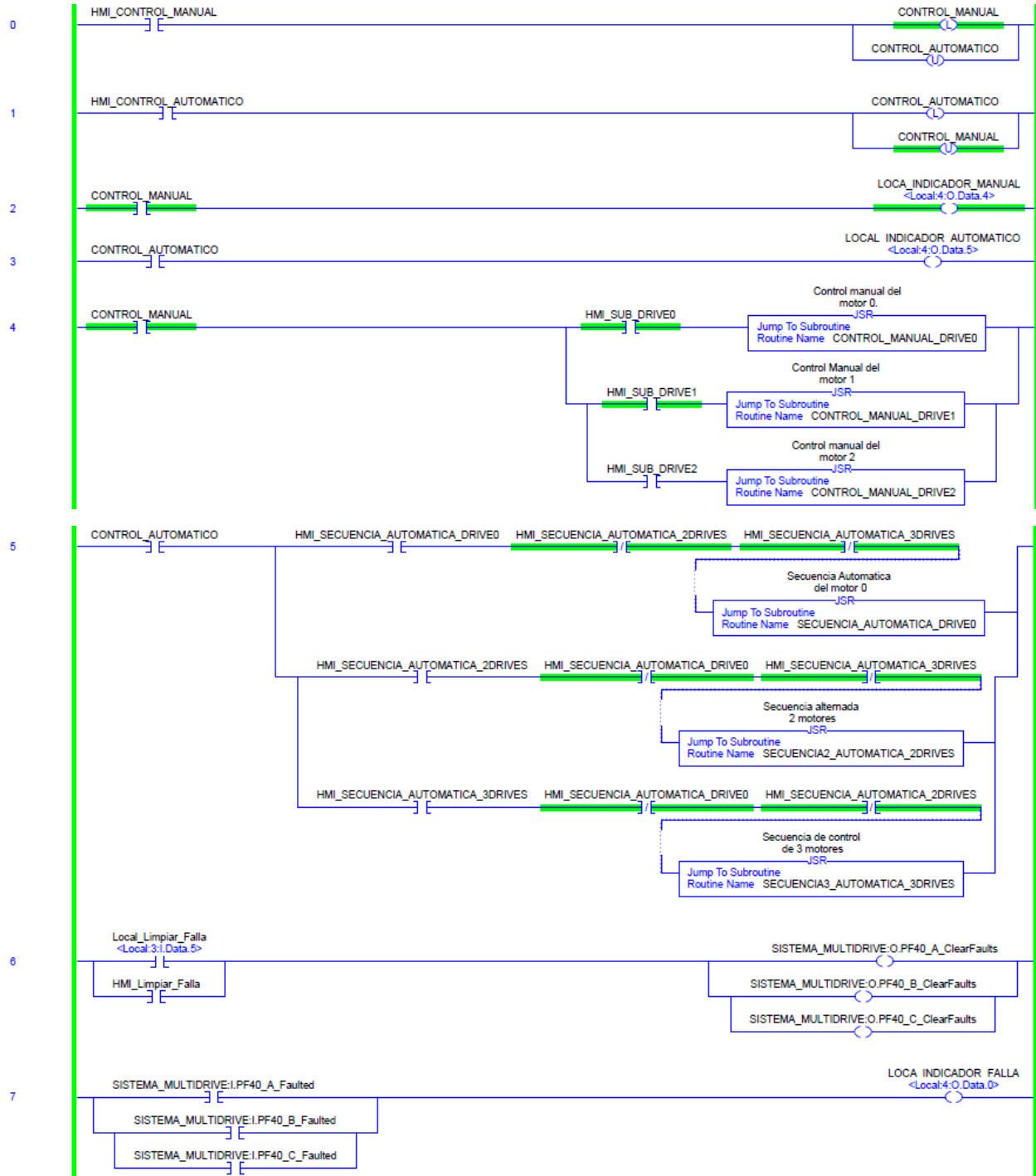
En este trabajo se realizó un control vectorial sin retroalimentación, un trabajo futuro es hacer un control vectorial retroalimentado mediante la instalación de un encoder en cada motor, esto es para aplicaciones que requieren un estricto control de velocidad.

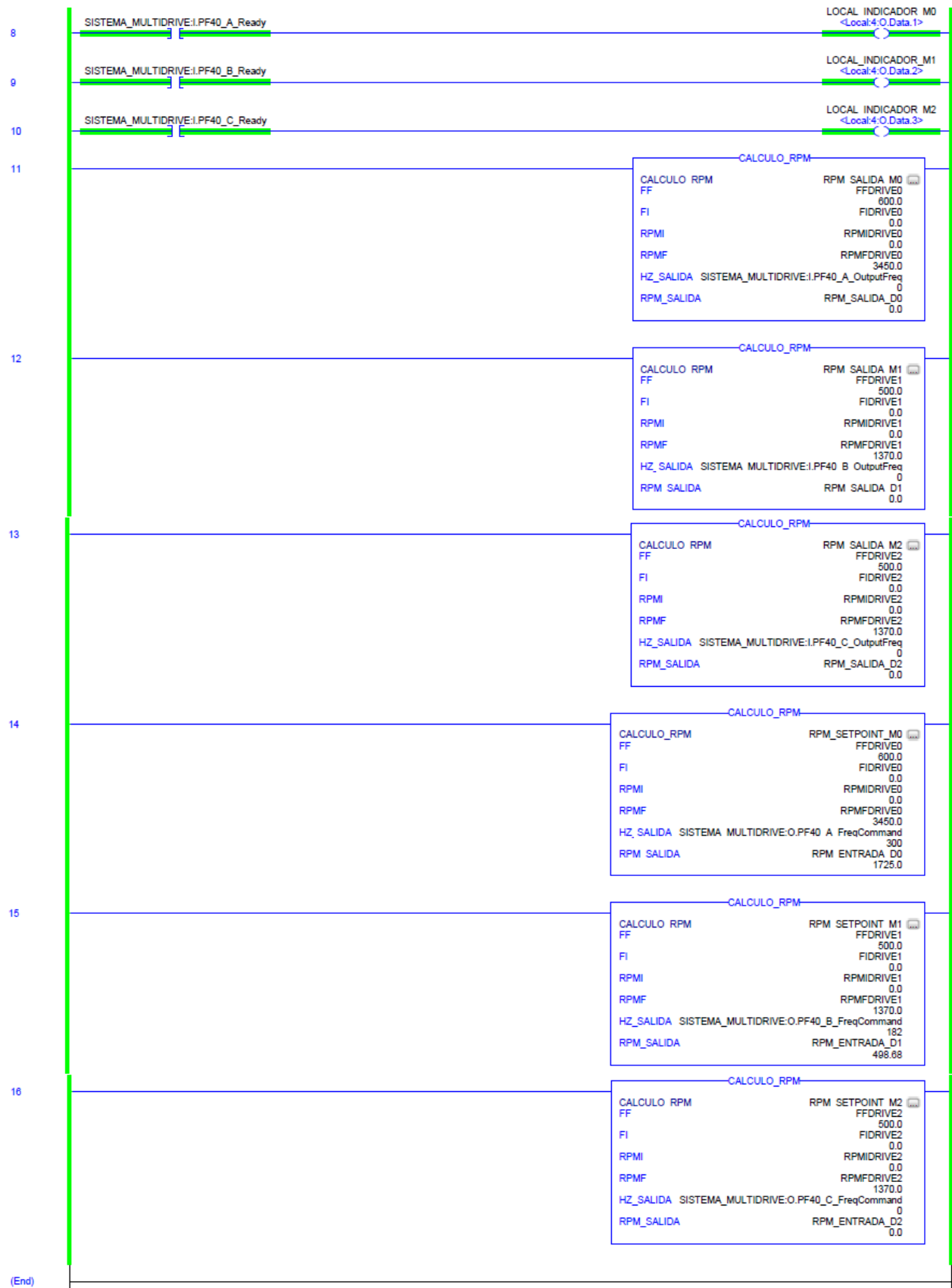
Dado que el sistema empleado en este proyecto es el ControlLogix con drives tipo PowerFlex 40, la tarjeta de comunicación 22-COMM-E puede integrar en el bus drives tipo PowerFlex 525, la idea de este trabajo futuro consiste en combinar diferentes tipos de familias de variadores para control de motores.

Anexos

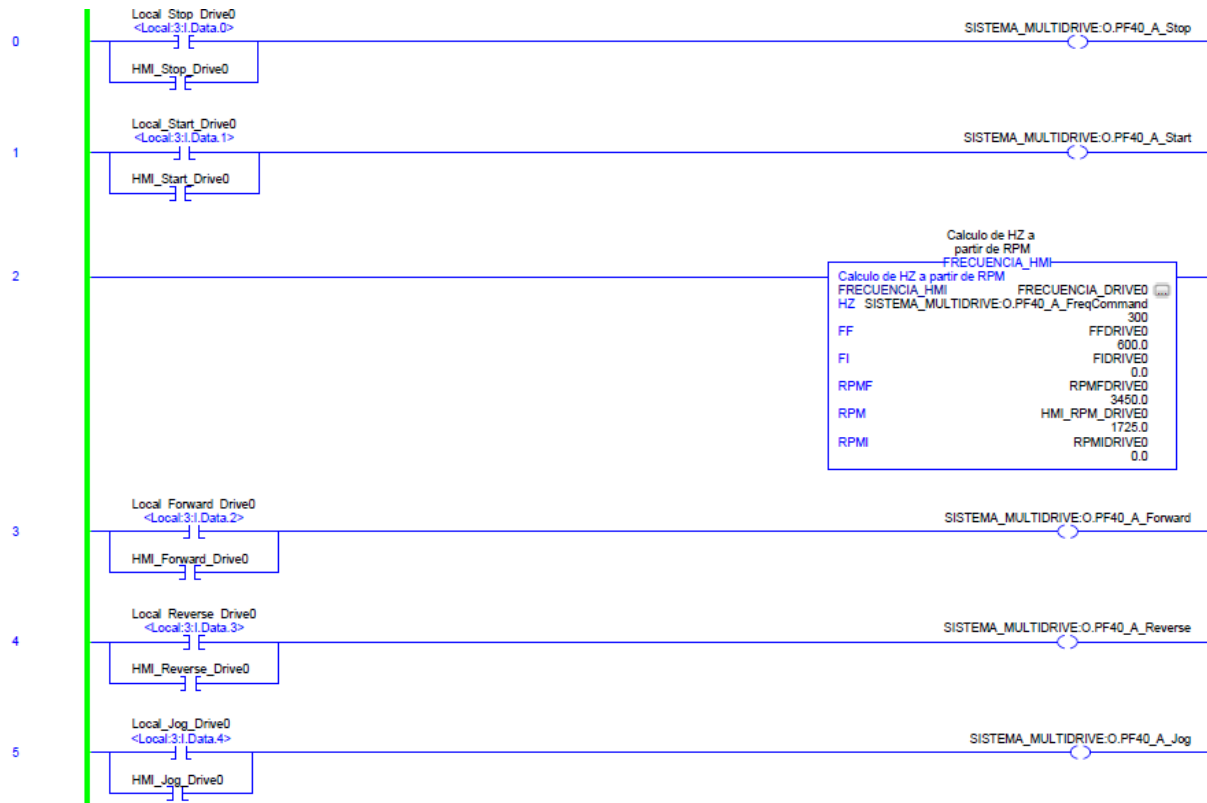
Anexo 1: Programación

Rutina principal

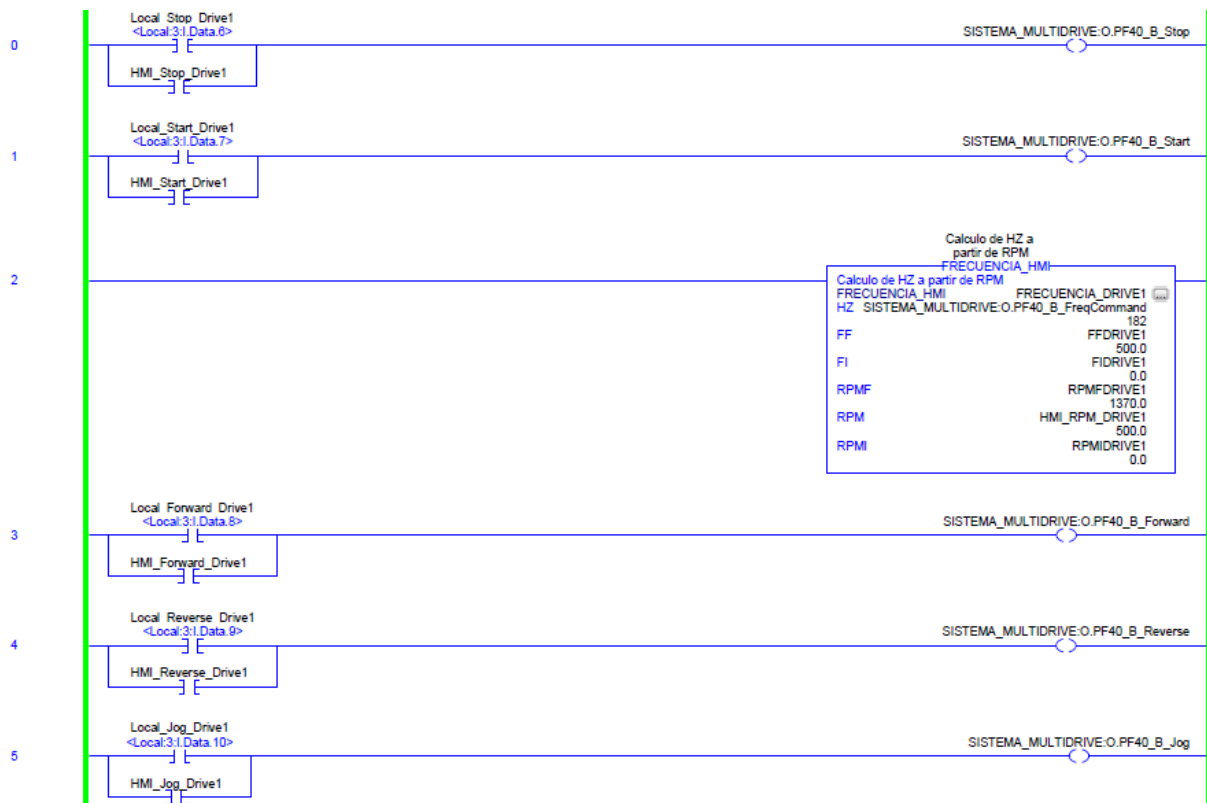




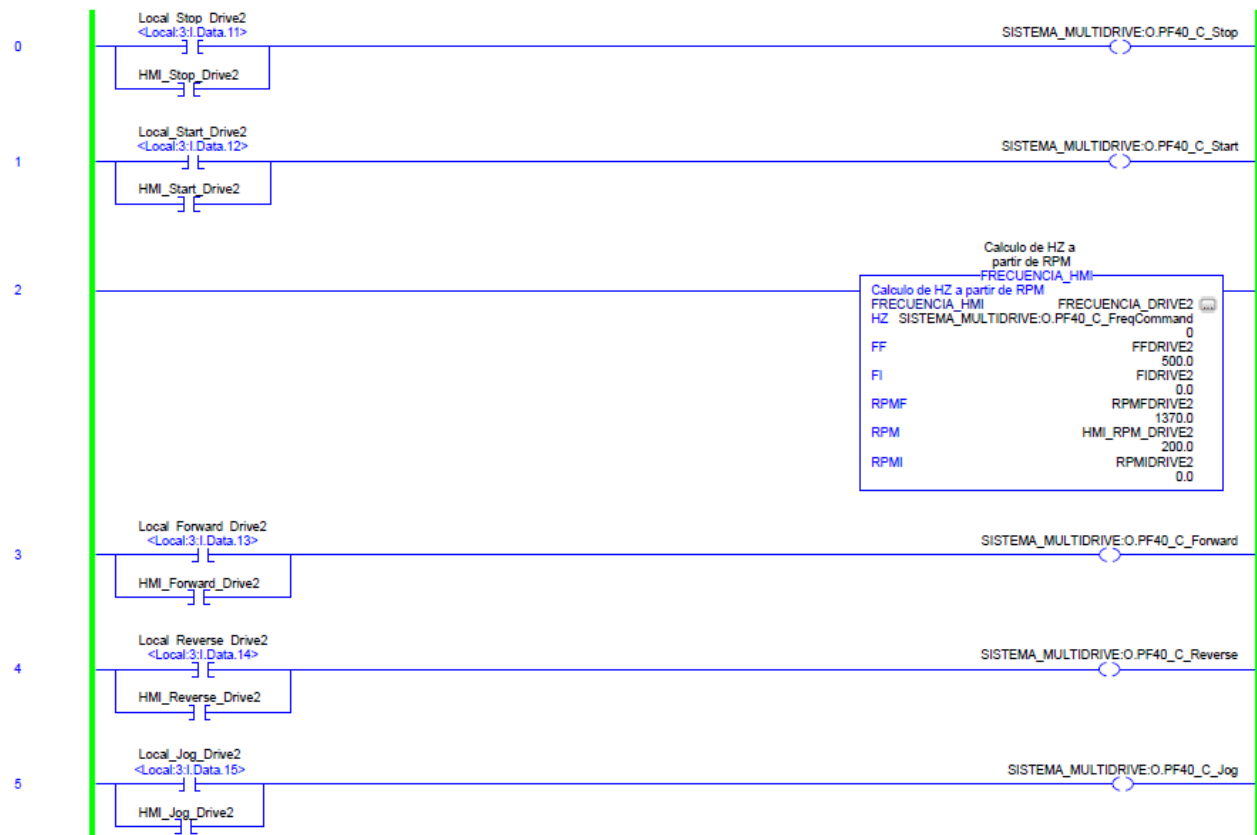
Subrutina de control manual del motor 0



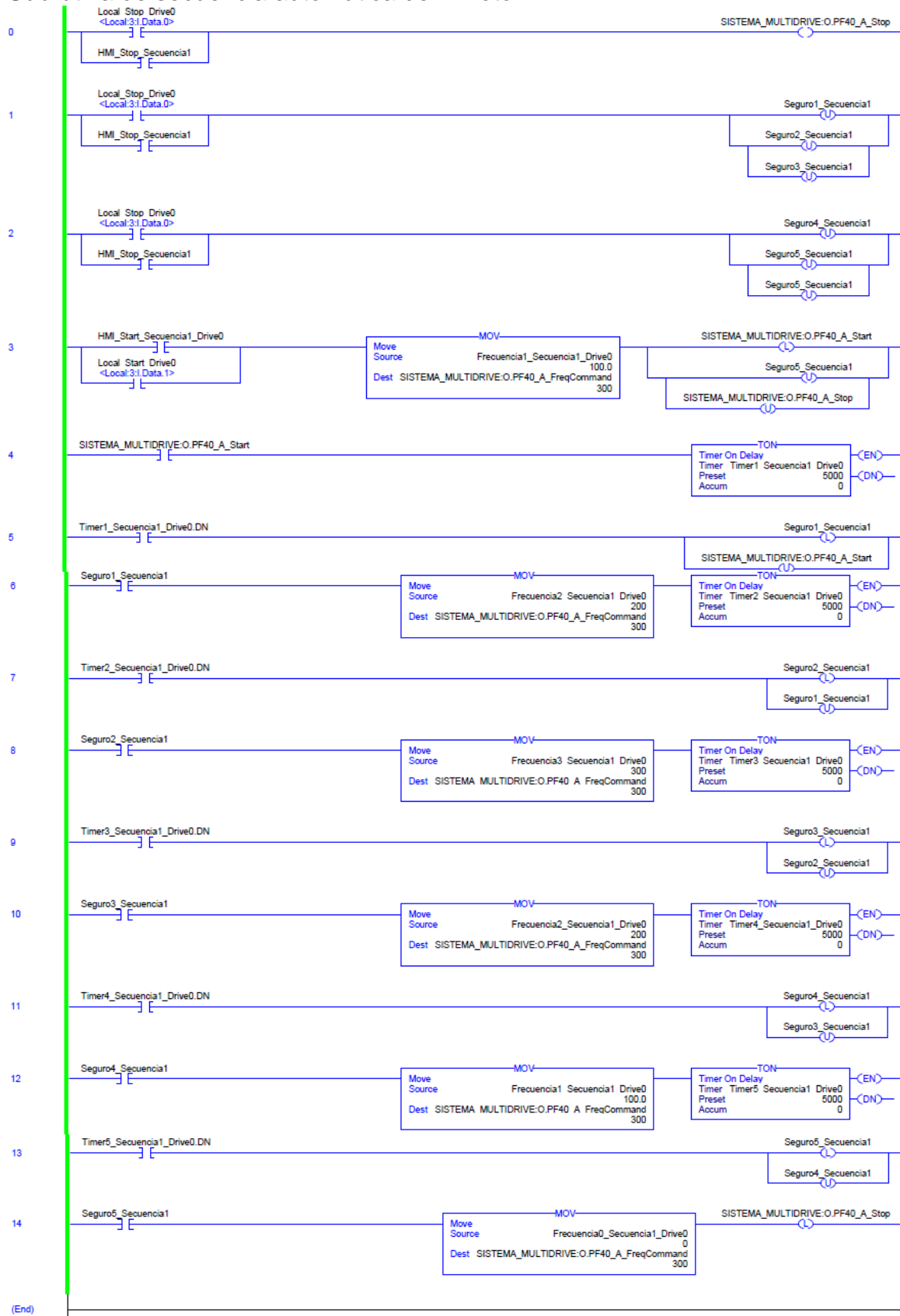
Subrutina de control manual del motor 1



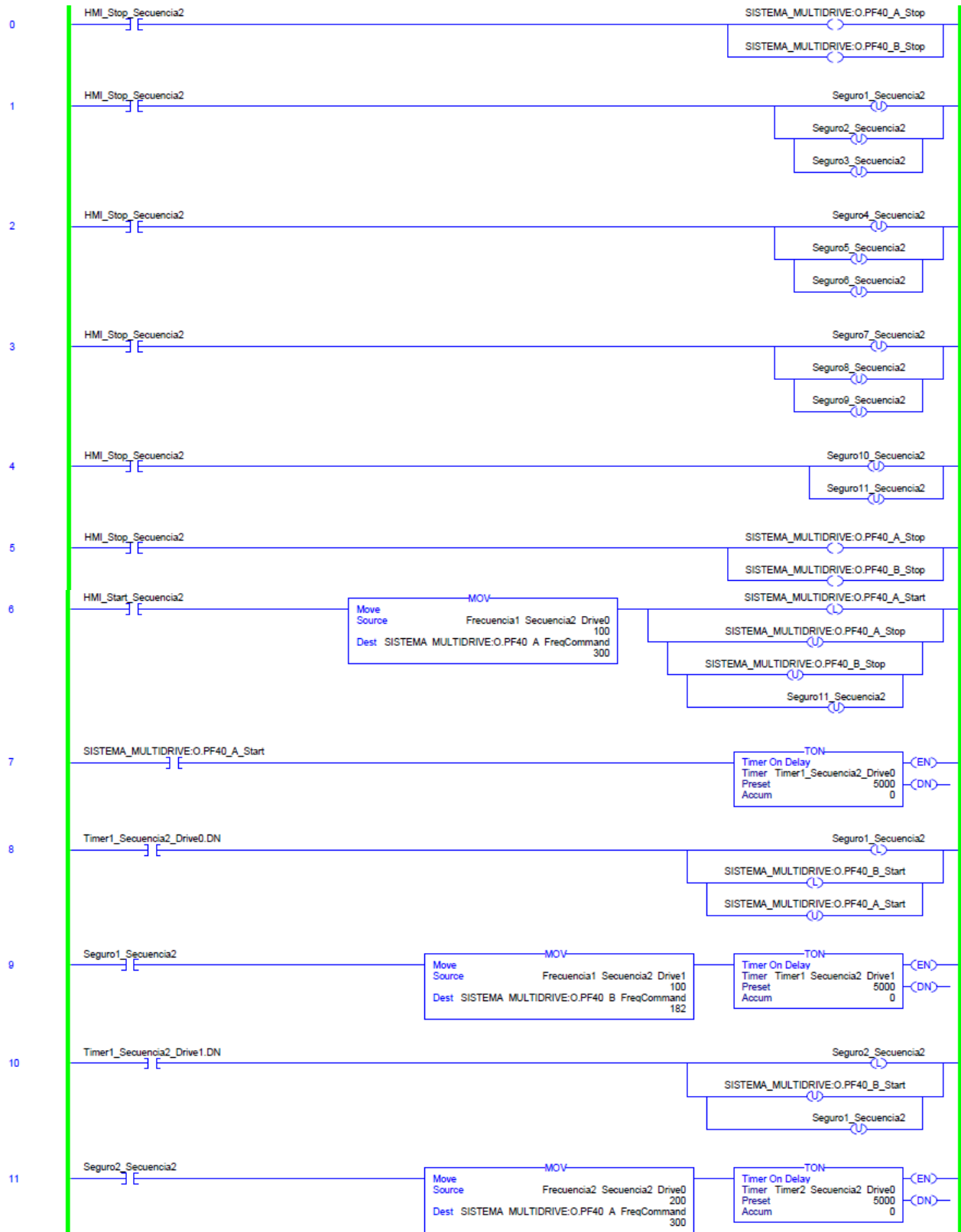
Subrutina de control manual del motor 2

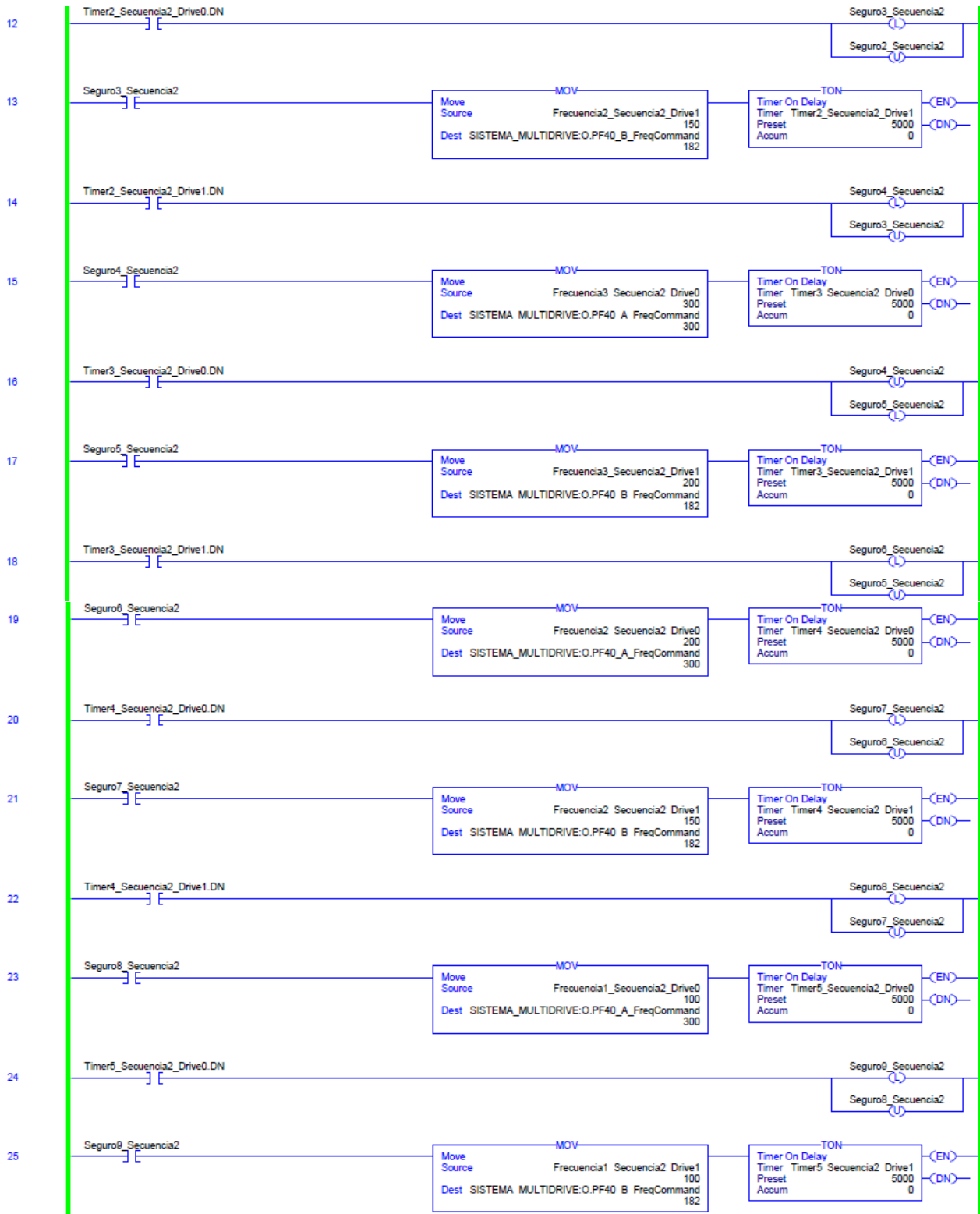


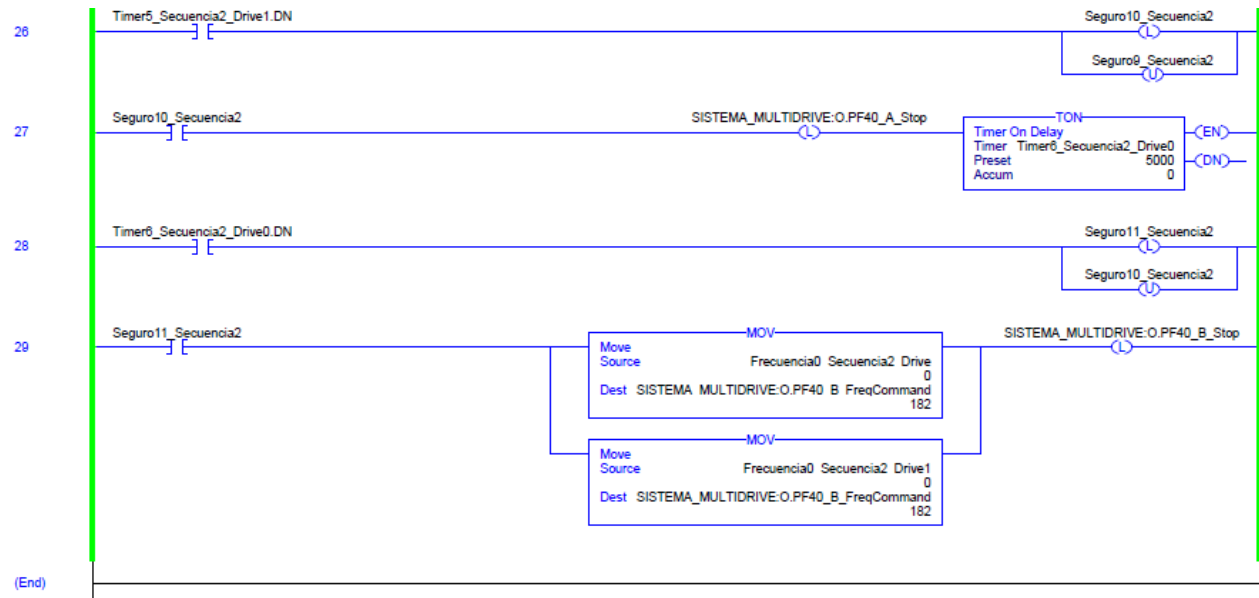
Subrutina de secuencia automática de 1 motor



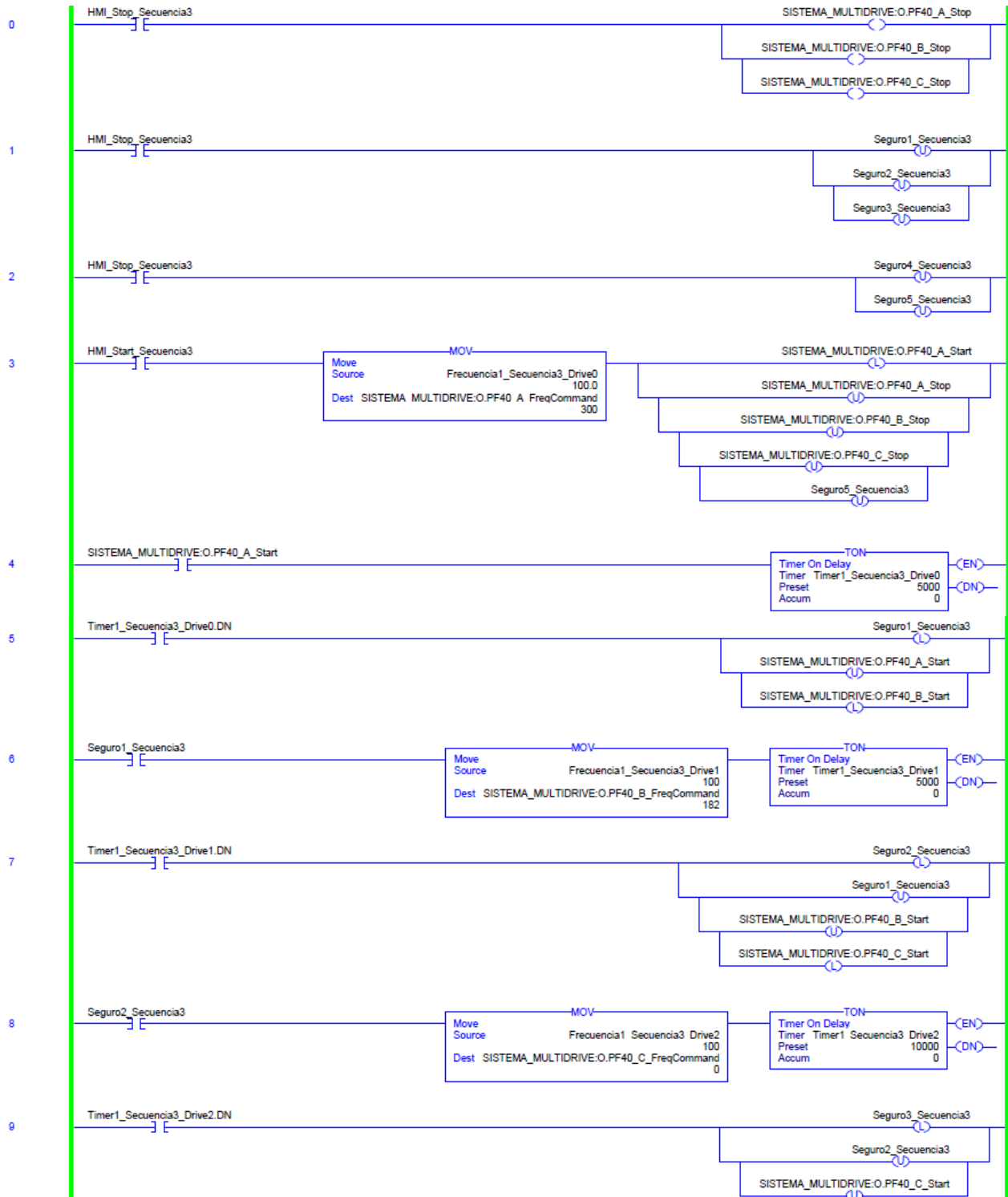
Subrutina de secuencia automática de 2 motores

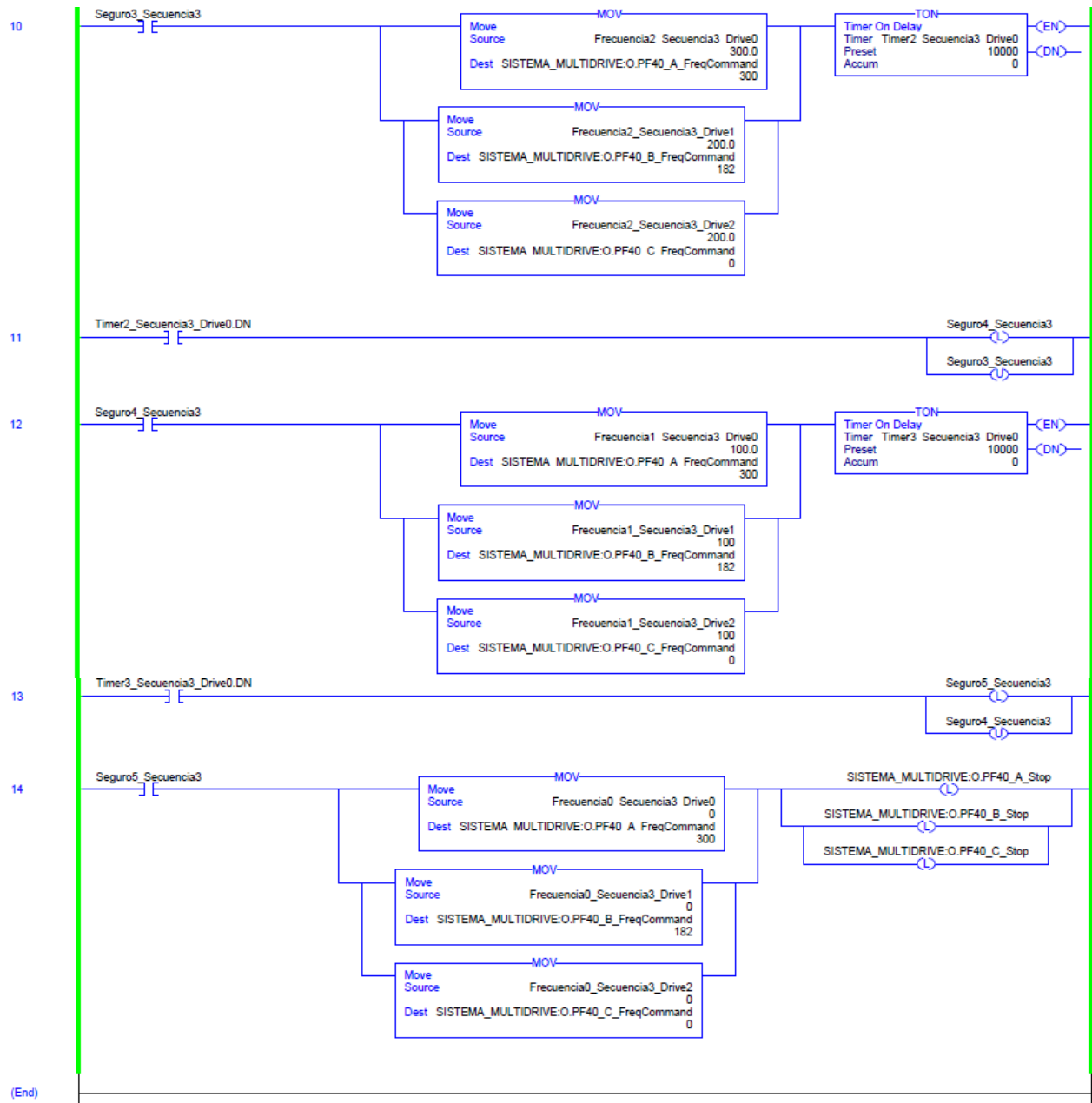






Subrutina de secuencia automática de 3 motores





Referencias

- Álvarez Pulido, M. (2000). *Convertidores de Frecuencia, Controladores de Motores Y SSR*. Barcelona : Marcombo.
- Alzate Gómez, A. (Diciembre de 2009). *CONTROL VECTORIAL DE LA MAQUINA DE INDUCCION*. Obtenido de <http://www.redalyc.org/>: <http://www.redalyc.org/html/849/84917310010/>
- COPADATA. (2018). *Interfaz hombre-máquina (HMI)*. Obtenido de COPADATA: <https://www.copadata.com/es/soluciones-hmi-scada/interfaz-hombre-maquina-hmi/>
- De Almedia, A. (2015 de Diciembre de 2015). *Partner for prosperity* . Obtenido de <https://www.energia.gob.ec/>: <https://www.energia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/12/10.-Controles-de-motores.pdf>
- De Valdevira, A. (Noviembre de 2011). *Motores de corriente alterna*. Obtenido de Sistemas automáticos de producción: platea.pntic.mec.es/~jgarrigo/SAP/archivos/1eva/introduccion_motores_ca.pdf
- Enriquez, H. (2009). *Accionamientos Eléctricos*. México: Limusa.
- FLUKE. (2010). *¿ Por qué conectar a tierra, por qué comprobar los sistemas de conexión a tierra?* Obtenido de FLUKE : <http://www.fluke.com/fluke/pees/soluciones/resistencia-de-tierra/por-qu%C3%A9-conectar-a-tierra>
- Guerrero, V., Yuste, R., & Martinez , L. (2010). *Comunicaciones Industriales* . México: Alfaomega.
- Guru, B. S. (2003). *Máquinas Eléctricas y Transformadores* . Oxford : Alfaomega .
- Hallberg, B. (2007). *Fundamentos de Redes*. España: McGraw-Hill.
- Herrero Collantes, M. (Febrero de 2017). *Protocolos y seguridad de red en infraestructuras SCI*. Obtenido de Incibe: https://www.certs.es/sites/default/files/contenidos/guias/doc/incibe_protocolos_seguridad_red_sci.pdf
- Marrugat, J. (2005). *Comunicaciones abiertas. EtherNet/IP*. Obtenido de <https://www.rockwellautomation.com/>: <https://www.rockwellautomation.com/>
- Pardo Alonso, J. L. (2012). *Montaje y puesta en marcha de sistemas robóticos y sistemas de visión, en bienes de equipo y maquinaria industrial*. Barcelona : IC Editorial.
- PARKER. (2015). *Fundamentos de Drives*. Obtenido de Parker: <http://slideplayer.es/slide/1593173/>
- Peréz Donsión , M. (Diciembre de 2004). *Estrategias y circuitos de control de la velocidad de los motores de inducción*. Obtenido de Tecnicaindustrial: <http://www.tecnicaindustrial.es/tiadmin/numeros/14/38/a38.pdf>

-
- Ponce Cruz, P., & Sampé López, J. (2008). *Máquinas Eléctricas y Técnicas Modernas de Control*. México: Alfaomega .
- Raya, J. L., Raya, L., & Martínez, M. (2009). *Redes Locales-Instalación y configuración básicas*. México: Alfaomega .
- Rockwell Automation . (2003). *EtherNet/IP 22-COMM-E*. Milwaukee: A-B.
- Rockwell Automation . (2007). *PowerFlex 40, Adjustable Frequency AC Drive*. Milwaukee: A-B.
- Rockwell Automation . (2015). *Módulos de E/S digitales ControlLogix*. Milwaukee: A-B.
- Rockwell Automation. (Marzo de 2018). *Connected Components Workbench Design & Configuration Software*. Obtenido de RockwellAutomation.com: https://www.rockwellautomation.com/global/detail.page?pagetitle=Connected-Components-Workbench-Design-%26-Configuration-Software&content_type=tech_data&docid=7c028f3b448fcef185a20f4e05c5fd06
- Rockwell Automation. (Marzo de 2018). *Studio 5000 Logix Designer*. Obtenido de Rockwellautomation.com: <https://www.rockwellautomation.com/rockwellsoftware/products/studio5000-logix-designer.page>
- Rockwell Automation. (2008). *CÓMO OBTENER RESULTADOS CON RSLINX CLASSIC*. USA: A-B.
- Suyama, M. (30 de Agosto de 2004). *Protocolos de comunicaciones* . Obtenido de Desarrollo web: <https://desarrolloweb.com/articulos/1617.php>
- Valencia, U. d. (2010). *Redes de comunicación, topología y enlaces*. Obtenido de UV: https://www.uv.es/rosado/courses/sid/Capitulo2_rev0.pdf
- Vázquez, G. (Julio de 2010). *Accionamientos Eléctricos*. Obtenido de Revista Electroindustria: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1441&tip=7>
- Weis, O. (20 de Febrero de 2018). *¿Qué es RS485?* Obtenido de Eltima.com: <https://www.eltima.com/es/article/rs485-data-logger.html>