

Trabajo Fin de Grado

Control remoto de motores eléctricos a través de
variadores de frecuencia activados por autómatas

Remote control of electric motors using frequency
inverters activated by logic controllers

Autor

Stefan Stana Stana

Director

Raúl Igual Catalán

Codirector

Raúl Martín Ferrer

Resumen.

En este trabajo fin de grado se ha realizado el control de dos motores eléctricos mediante dos variadores de frecuencia: uno de la marca Schneider y otro de la marca Omron.

Los variadores se controlan por un autómata de la marca Schneider, en concreto el Modicon M221. El control es, tanto directo desde el autómata por medio de sus entradas, como a través de una pantalla HMI.

Los dos variadores, la pantalla HMI y el autómata forman una red, en la que el autómata es el maestro y los demás componentes los esclavos. La comunicación dentro de la red se lleva a cabo mediante el protocolo de comunicación Modbus/RTU.

En este trabajo fin de grado se ha realizado el control de los motores mediante las entradas del autómata y desde la pantalla HMI. En concreto, se han programado numerosas rutinas de automatización entre las que se incluyen cambios en la configuración de los variadores o realización de posicionamientos.

Abstract.

In this final degree project, two electric motors have been controlled by means of two frequency inverters: one from the Schneider brand and the other from the Omron brand.

The drives are controlled by a Schneider automaton, specifically the Modicon M221. The control is both direct from the automaton, and through an HMI screen.

The two drives, the HMI screen and the controller form a network. The controller is the master and the other components are the slaves. The Modbus / RTU communication protocol is used for communication.

In this final degree project, the motors have been controlled through the PLC inputs and from the HMI screen. Specifically, numerous automation routines have been programmed, including configuration of the drives or positioning.

Índice de contenido

3	Materiales.	2
3.1	Motores trifásicos.	2
3.2	Variadores de frecuencia.	3
3.3	Variador Altivar ATV320.	4
3.4	Variador Omron MX2.	6
3.5	Pantalla HMI.	7
3.6	Encoder.	7
3.7	Autómata.	8
4	Sistema implementado.	9
4.1	Presentación general del sistema.	9
4.2	Descripción del funcionamiento de la aplicación.	11
4.2.1	Modo Botonera.	12
4.2.2	Modo Pantalla.	16
5	Desarrollo de la aplicación.	22
5.1	Cableado.	22
5.1.1	Parte de potencia: cableado de los motores y los variadores a la red.	22
5.1.1.1	Conexión del variador ATV320 y el motor 1 a la red.	22
5.1.1.2	Conexión del variador Omron y el motor 2 a la red.	23
5.1.2	Cableado de las entradas del autómata y comunicaciones.	24
5.1.2.1	Cableado de las entradas.	24
5.1.2.2	Cableado de las comunicaciones.	26
5.2	Comunicaciones.	26
5.2.1	Protocolo Modbus/RTU.	27
5.2.2	Cableado de la red Modbus/RTU.	29
5.3	Programación.	31
5.3.1	Programación de la pantalla HMI.	31
5.3.2	Programación de los variadores.	32
5.3.2.1	Configuración del variador ATV 320.	32
5.3.2.2	Configuración del variador Omron MX2.	33
5.3.3	Configuración y programación de PLC.	35

Índices

5.3.3.1	Configuración previa.	36
5.3.3.2	Programación del PLC.....	40
6	Conclusiones y trabajo futuro.	48
6.1	Conclusiones.....	48
6.2	Trabajo futuro.	49
7	Listado bibliográfico.	50

Índice de figuras.

Figura 1. Figura ilustrativa del funcionamiento básico de una maquina asíncrona con rotor de jaula de ardilla (Mora 2008).	3
Figura 2. Esquema simplificado de un variador de frecuencia (Omron 2009).	4
Figura 3. Circuito simplificado de las dos etapas del variador de frecuencia (Mora 2008).	4
Figura 4. Forma de onda después del puente rectificador (Mora 2008).	4
Figura 5. Imagen del variador ATV320U30N4B (Schneider Electric 2021c).	5
Figura 6. Variador de frecuencia OMRON MX2 (OMRON INDUSTRIAL 2021a)	7
Figura 7. Pantalla HMI de Schneider (Schneider Electric 2021b).	7
Figura 8. Encoder de la marca OMRON (OMRON 2021).	8
Figura 9. Pulsos en la salida del encoder.	8
Figura 10. Imagen del autómatas programable Modicon M221 (Schneider Electric 2021a).	8
Figura 11. Modulo de salidas analógicas TMC2AQV (Schneider Electric 2021a).	9
Figura 12. Elementos que componen el sistema.	10
Figura 13. Pantalla de información del Modo Botonera, sin tener el modo seleccionado.	13
Figura 14. Pantalla informativa del Modo Botonera, con ese ya seleccionado.	13
Figura 15. Pantalla Modo Botonera, modo y velocidad máxima seleccionados.	14
Figura 16. Pantalla Modo Botonera con el modo y velocidad analógica seleccionados.	14
Figura 17. Mini fuente de voltaje variable, basada en el LM317.	14
Figura 18. Pantalla Modo Botonera, los dos motores funcionando a su máxima velocidad.	15
Figura 19. Motor 2 funcionando con velocidad analógica.	15
Figura 20. Pantalla principal del Modo Pantalla.	16
Figura 21. Pantalla Configuración, dentro del Modo Pantalla.	16
Figura 22. Pantalla accionamiento motores desde la pantalla, dentro del Modo Pantalla.	17
Figura 23. Pantalla accionamiento motores después de pulsar START, dentro del Modo Pantalla.	17
Figura 24. Pantalla de accionamiento de motores con las velocidades introducidas, falta validar.	18
Figura 25. Pantalla de accionamiento con los dos motores funcionando.	18
Figura 26. Pantalla para elegir el tipo de posicionamiento, dentro del Modo Pantalla.	19
Figura 27. Pantalla de posicionamiento mediante introducción de la medida por pantalla, dentro del Modo Pantalla.	19

Figura 28. Captura de pantalla con el motor 2 posicionando mediante la introducción de medidas.....	19
Figura 29. Pantalla de información del posicionamiento mediante medidas prefijadas, dentro del Modo Pantalla.....	20
Figura 30. Pantalla de elección de medidas para posicionar, dentro del Modo Pantalla.....	20
Figura 31. Pantalla de elección entre posicionar y almacenar otra medida.....	21
Figura 32. Posicionamiento iniciado.....	21
Figura 33. Conexión estrella del motor 1 (Martín and García 2009).....	22
Figura 34. Conexión del variador ATV320 y el motor 1.....	23
Figura 35. Conexión triángulo del motor 2 (Martín and García 2009).....	23
Figura 36. Conexión del variador Omron MX2 y el motor 2.....	23
Figura 37. Solución a la incompatibilidad del encoder E6B2-CWZ5C, tipo NPN, con la lógica del autómatas (OMRON 2021).....	24
Figura 38. Módulo de simulación, ABE-TES160 (RS-ONLINE 2021).....	25
Figura 39. Circuito simplificado del encoder E6B2-CWZ5B, tipo PNP (OMRON INDUSTRIAL 2021b).....	25
Figura 40. Cableado de las entradas del autómatas.....	25
Figura 41. Conexión de las comunicaciones entre dispositivos.....	26
Figura 42. Ejemplo de cableado de una red Modbus/RTU.....	29
Figura 43. Pines necesarios para la comunicación Modbus/RTU (SchneiderElectric 2019).....	30
Figura 44. Distribución de los cables, por color, en un conector RJ45.....	30
Figura 45. Interfaz de configuración del ATV30 (Schneider Electric 2020a).....	32
Figura 46. Pasos a seguir para la configuración de parámetros (Schneider Electric 2020a).....	33
Figura 47. interfaz de control del variador Omron MX2(Omron 2009).....	34
Figura 48. Pantalla de configuración del autómatas M221.....	36
Figura 49. Pantalla configuración de contadores rápidos (encoder), autómatas M221.....	36
Figura 50. Pantalla de configuración del encoder.....	37
Figura 51. Pantalla de configuración del puerto serie, SL1.....	37
Figura 52. Pantalla para añadir los dispositivos que componen la red Modbus: esclavos.....	38
Figura 53. Esquema básico de la arquitectura interna de un autómatas programable.....	38
Figura 54. Canal de comunicación para la escritura de registros.....	39
Figura 55. Canal de comunicación para la lectura de registros.....	39
Figura 56. Pantalla para añadir canales de comunicación.....	40

Figura 57. Pantalla de configuración de los canales de configuración.	40
Figura 58. Diagramas de bloques de la aplicación.	41
Figura 59. GRAFCET PRINCIPAL.	41
Figura 60. GRAFCET MODO BOTONERA.....	42
Figura 61. Relación voltaje/velocidad para los dos motores.	43
Figura 62. GRAFCET MODO PANTALLA.	44
Figura 63. GRAFCET CONFIGURACION (MODO PANTALLA).....	45
Figura 65. GRAFCET POSICIONAMIENTO (MODO PANTALLA).	46
Figura 66. Perfil de la frecuencia de salida en el modo POSICIONAMIENTO (variador OMRON).	46

Índice de tablas.

Tabla 1. Principales características del variador ATV320 (Schneider Electric 2021c).	5
Tabla 2. Principales características del variador OMRON MX2 (Omron 2009).	6
Tabla 3. Utilización de las entradas del autómeta.	12
Tabla 4. Estructura de un mensaje Modbus/RTU (Modicon 1996).....	28
Tabla 5. Estructura interna del mensaje, secuencia bit a bit, con bit de paridad (Modicon 1996).	28
Tabla 6. Estructura interna del mensaje, secuencia bit a bit, sin bit de paridad (Modicon 1996).	28
Tabla 7. Principales códigos de función (Modicon 1996).....	29
Tabla 8. Lista de direcciones dentro de la red Modbus.	31
Tabla 9. Listado de parámetros configurados en el variador ATV320 (Schneider Electric 2020b).	33
Tabla 10. Pasos y parámetros a configurar para restablecer el variador Omron MX2 a valores de fábrica(Omron 2009).....	34
Tabla 11. Configuración para realizar el autoajuste del motor 2, variador Omron MX2 (Omron 2009).	35
Tabla 12. Configuración del control y la referencia de frecuencia del variador Omron MX2 (Omron 2009).....	35
Tabla 13. Configuración de los parámetros de comunicación del variador Omron MX2 (Omron 2009).	35

Índice de anexos.

Anexo 1. Programación detallada del autómatas programable (PLC).....	1
Anexo 2. Configuración y programación de la pantalla HMI.....	161

Listado de anexos digitales.

- Anexo digital 1. Archivo de la programación del autómatas.
- Anexo digital 2. Archivo de la programación de la pantalla.
- Anexo digital 3. Guía de Referencia del Protocolo Modbus.
- Anexo digital 4. Guía Rápida del Variador Omron MX2.
- Anexo digital 5. Manual de Referencia del Variador Omron MX2.
- Anexo digital 6. Guía Rápida del Variador Schneider Altivar ATV 320.
- Anexo digital 7. Manual de Referencia del Variador Altivar ATV 320.
- Anexo digital 8. Tabla de Parámetros de Comunicación del Variador Altivar ATV 320 (Direcciones Modbus).
- Anexo digital 9. Video 1: presentación general del sistema.
- Anexo digital 10. Video 2: presentación del Modo Botonera y Configuración (Modo Pantalla).
- Anexo digital 11. Video 3: presentación del Modo Run (Modo Pantalla).
- Anexo digital 12. Video 4: presentación del Modo Posicionamiento, parte 1 (Modo Pantalla).
- Anexo digital 13. Video 5: Presentación del Modo Posicionamiento, parte 2 (Modo Pantalla).

1 Motivación.

Los motivos que me han impulsado a realizar este trabajo fin de grado (TFG) son varios: el principal es que parte de este trabajo se va a poder utilizar en un futuro en la vida real, concretamente en una industria.

Esto se debe a que este proyecto se ha llevado a cabo con la colaboración de una empresa industrial de nuestra ciudad, Maderas Bielsa S.c., empresa dedicada al aserrado y cepillado de madera para fines industriales.

La colaboración se hace a través de Raúl Martín Ferrer, codirector del trabajo. Sin la colaboración de la empresa este proyecto no se podría haber realizado, ya que parte del material ha sido prestado por la empresa, como el variador de la marca Schneider, un encoder de la marca Omron y material adicional para las comunicaciones.

Parte de este proyecto o, incluso el proyecto entero si así lo estima conveniente la empresa, va a poder ser utilizado en la industria colaboradora. En concreto, para el control y el posicionamiento de una máquina de corte existente en la empresa. Al menos puede servir de punto de partida.

Otro de los motivos para realizar este TFG es que una parte puede servir en un futuro para la docencia, ya que se ha utilizado una de las pantallas HMI que no se había utilizado previamente en la EUPT. Otra de las motivaciones es establecer la comunicación entre el autómatas y un dispositivo de otra marca. Este proyecto puede servir a los profesores del área de automática como punto de partida, ya que se va a disponer de un sistema probado y totalmente funcional.

También está la motivación personal, quería hacer un proyecto enfocado a la vida real, enfocado hacia la industria, que supusiera un pequeño desafío, ya que iba utilizar cosas totalmente nuevas: variadores de frecuencia, una pantalla HMI, encoders, el autómatas, etc. El autómatas utilizado es nuevo (no ha sido utilizado antes en la EUPT). Para manejarlo se hizo uso de un protocolo de comunicación industrial.

2 Objetivos generales y específicos.

En este proyecto se pretende configurar diversas rutinas de control de motores eléctricos a través de variadores de frecuencia.

Es un proyecto que se realiza en colaboración con una empresa industrial del entorno de Teruel que necesita el control automático de los motores para llevar a cabo su producción. En concreto, el objetivo es realizar el control y posicionamiento de una máquina de corte.

Estos objetivos generales se pueden desgranar en una serie de objetivos específicos. Para comprender los objetivos específicos es necesario primero enumerar los dispositivos que se van a utilizar en el TFG:

- Dos motores eléctricos asíncronos trifásicos.
- Dos variadores de frecuencia, uno de la marca Schneider y otro de la marca Omron. Serán los encargados de controlar la velocidad de los motores.
- Un encoder de la marca Omron.
- Un autómatas de la marca Schneider, el Modicon M221CE24R, que controlará los dos variadores.
- Una pantalla HMI, Magelis STU655/855, que servirá de interfaz entre el usuario y las máquinas.

Se programarán diversas rutinas de automatización avanzadas en los dos modelos de variadores para conseguir los objetivos generales del proyecto. Como rutinas de automatización se contemplan las siguientes:

- Controlar la velocidad de los motores mediante las entradas analógicas del autómeta, utilizando una tensión variable entre 0 y 10 V, o bien desde la HMI.
- Realizar operaciones de marcha/paro mediante las entradas del autómeta y también a través de la pantalla HMI.
- Configurar diferentes parámetros de los variadores, como las rampas de aceleración y deceleración, a través de la pantalla HMI.
- Realizar posicionamiento, frenado dinámico de uno de los motores (solo uno de ellos dispone de encoder) controlado mediante la pantalla HMI.

Para llevar a cabo estas rutinas de automatización habrá que:

- Solventar los diferentes problemas de compatibilidad entre fabricantes.
- Configurar y programar la pantalla HMI mediante el programa Vijeo Designer.
- Programar y configurar el autómeta mediante EcoStructure Machine Expert.
- Configurar y programar los dos variadores.
- Comunicar todos los dispositivos mediante el protocolo de comunicación Modbus/RTU.
- Cablear todos los componentes de manera pertinente, incluyendo los esquemas de cableado.

Como resultado se va a lograr el control de los dos motores a través de los distintos variadores, gestionados por autómeta, utilizando la pantalla HMI como interfaz entre el operario y la máquina.

3 Materiales.

En este apartado se van a describir los materiales utilizados, explicando cada uno de ellos detalladamente, y también los métodos utilizados para llevar a cabo el proyecto.

Los materiales utilizados van a ser los siguientes:

- Dos motores eléctricos asíncronos, de diferentes potencias, uno de 0,73 kW y otro de 0,37 kW. Uno de los motores dispone de una reductora y a su vez lleva incorporado un encoder.
- Dos variadores de frecuencia, uno de la marca Schneider, el ATV 320, y otro de la marca Omron, el MX2
- Una pantalla HMI de la marca Schneider, STU855
- Un autómeta, el Modicon M221CE24R de la marca Schneider.
- Diferentes cables con terminación RJ45 para la comunicación.

3.1 Motores trifásicos.

El principio de funcionamiento de estas máquinas se basa en el concepto de campo magnético giratorio. Los primeros motores aparecieron en 1888 de la mano del profesor Galileo Ferraris, en Italia, y de Nikola Tesla, en Estados Unidos.

Ambos se basaban en la producción de campos magnéticos giratorios, con un desfase de 90 grados, ya que utilizaban sólo dos fases en cuadratura.

Posteriormente, las patentes de Tesla fueron adquiridas por G. Westinghouse en 1880, que se dedicó a la fabricación de estas máquinas, más o menos en el mismo año que el ingeniero de la AEG (Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft, Compañía General de Electricidad), Dolivo Dobrowolsky inventó el motor asíncrono trifásico, precisamente el de rotor de jaula de ardilla. A partir de entonces empezaron a utilizarse las maquinas asíncronas trifásicas (Mora 2008).

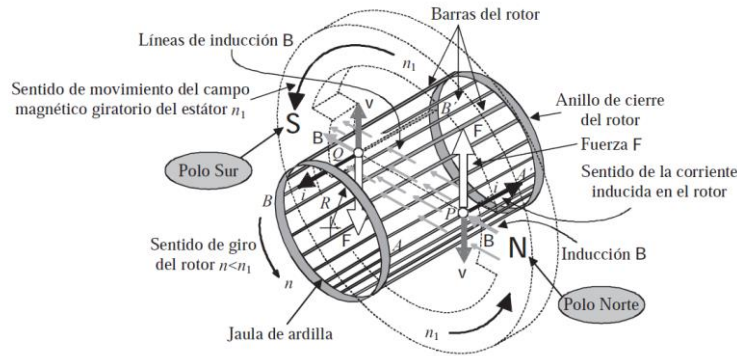


Figura 1. Figura ilustrativa del funcionamiento básico de una maquina asíncrona con rotor de jaula de ardilla (Mora 2008).

Al utilizarse una red trifásica con un desfase de 120 grados, y unos devanados del estator con el mismo desfase se consigue un campo magnético giratorio cuya velocidad mecánica en rpm viene expresada por la siguiente expresión:

$$n_1 = \frac{60 * f}{p}$$

n_1 = velocidad de sincronismo

f = frecuencia de la tensión

p = numero de polos del motor

De allí podemos deducir que si se desea controlar la velocidad de funcionamiento de un motor asíncrono el único parámetro que se puede modificar es la frecuencia de su tensión de alimentación y para eso se utilizaran los variadores de frecuencia.

3.2 Variadores de frecuencia.

¿Qué es un variador de frecuencia?

Un variador de frecuencia es un dispositivo de electrónica de potencia. Su funcionamiento abarca varias fases: la primera consiste en pasar de AC a DC y la segunda se basa en pasar de DC a AC, pero esta vez con la frecuencia deseada (Figura 2).

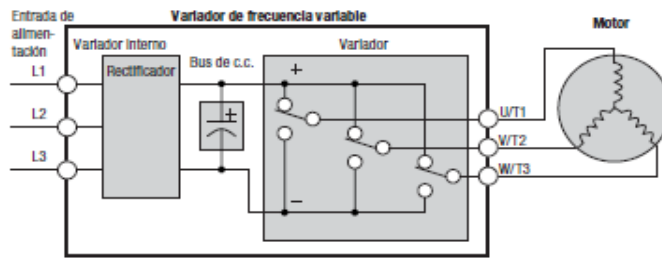


Figura 2. Esquema simplificado de un variador de frecuencia (Omron 2009).

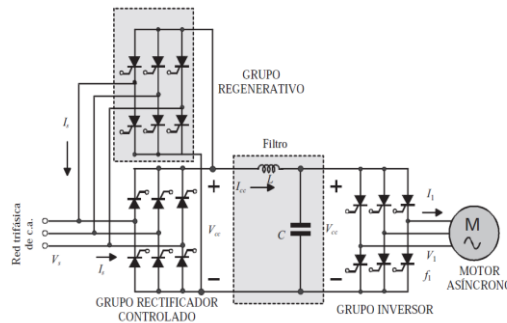


Figura 3. Circuito simplificado de las dos etapas del variador de frecuencia (Mora 2008).

Como se puede observar en la figura se pueden distinguir bien las dos partes (Figura 3).

El paso de AC a DC se hace mediante un puente rectificador seguido de una etapa de filtrado. Lo que se va a conseguir es pasar de una onda con amplitudes tanto positivas como negativas, a una onda con amplitudes solo positivas (Figura 4).

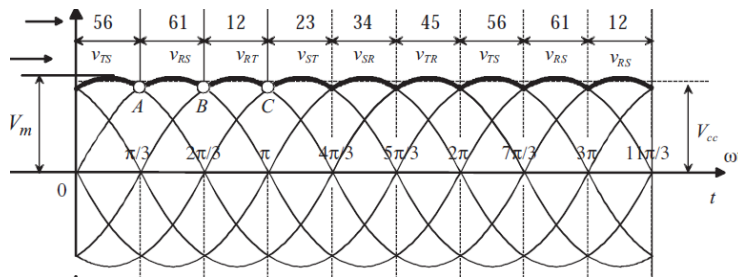


Figura 4. Forma de onda después del puente rectificador (Mora 2008).

Después de la etapa de filtrado el rizado de la onda se minimizará, dando lugar a una tensión continua positiva.

El segundo paso, de DC a AC, se realiza mediante tiristores o triacs, de tal forma que, controlando el disparo de estos, se consigue la onda deseada. El control se realiza mediante un microcontrolador en el caso de los variadores que vamos a emplear.

3.3 Variador Altivar ATV320.

Uno de los dos variadores que se han utilizado en este TFG es el Altivar ATV 320, en concreto el ATV320U30N4B, que es un variador trifásico. Sus principales características se recogen en la tabla (Tabla 1):

Tabla 1. Principales características del variador ATV320 (Schneider Electric 2021c).

Potencia máxima admitida	3 kW
Tensión de entrada/salida	380 V/500 V
Corriente nominal de salida	7,1 A
Frecuencia de red	50/60 Hz
Comunicación	Serie Modbus
Entradas digitales	7, DI1, DI2, DI3, DI4, DI5, DI6, Di5 (se puede programar como entrada de pulsos)
Entradas analógicas	3, AI1, AI2, AI3, AI1 tensión de 0 a 10 V, AI2 (tensión bipolar ± 10 V), AI3 (corriente de 0 a 0,20 mA)
Salidas analógicas	1, configurable como salida a tensión o corriente, a tensión de 0 a 10 V, a corriente de 0 a 0,20 mA
Salidas digitales	2, DQ+ y DQ-
Salidas a relé	3, R1A, R1B, R1C
Regulación en bucle cerrado	PID



Figura 5. Imagen del variador ATV320U30N4B (Schneider Electric 2021c).

También cabe destacar que el mismo variador tiene un pequeño PLC embebido. Esto permite llevar a cabo una programación sencilla utilizando las entradas disponibles, mediante funciones lógicas. Para llevar a cabo la programación hay que utilizar su propio programa SOMOVE. A través de este también se pueden configurar los parámetros del variador.

3.4 Variador Omron MX2.

Por otro lado, también se ha utilizado el variador 3G3MX2 de OMRON, con entrada monofásica (Figura 6). Sus principales características se recogen en la tabla (Tabla 2):

Tabla 2. Principales características del variador OMRON MX2 (Omron 2009).

Potencia máxima admitida	0,4 kW
Tensión de entrada/salida	200 V/380 V
Corriente nominal de salida	1,9 A
Frecuencia de red	50/60 Hz
Comunicación	Modbus RTU, RS-485
Entradas digitales	7, 1, 2, 3/GS1, 4/GS2, 5/PTC, 6/EB, 7
Tren de pulsos	EA (entrada de tren de pulsos), EO (salida de tren de pulsos)
Salidas a relé	3, AL1, AL2, AL3
Entradas analógicas	O (entrada analógica a tensión de 0 a 10 V), O1 (entrada analógica a corriente de 4 a 20 mA)
Regulación en bucle cerrado	PID
Terminales comunicación	SP y SN

Similar al caso del variador anterior, este también está provisto de un sistema de programación embebido, pudiendo programarse utilizando el programa CX DRIVE, que sirve a su vez para realizar la configuración del variador.

Podemos concluir que son dos variadores muy parecidos, con la salvedad de que el variador OMRON no necesita una conexión trifásica. Si hablamos sobre la programación del autómatas, el de la marca Schneider es más fácil de programar ya que dispone de bloques de funciones predefinidos al ser de la misma marca que el autómatas (sección 1.1.5).



Figura 6. Variador de frecuencia OMRON MX2 (OMRON INDUSTRIAL 2021a)

3.5 Pantalla HMI.

La pantalla HMI que se va a utilizar en este proyecto es de la marca Schneider, en concreto, el modelo MAGELIS STU855 (Figura 7).

Es una pantalla de 5,7 pulgadas, de color, táctil, que incorpora una CPU propia, de arquitectura ARM9 de 16 bits y con una frecuencia de reloj de 333 MHz.

El software que hay que emplear para su programación es el Vijeo Designer.



Figura 7. Pantalla HMI de Schneider (Schneider Electric 2021b).

Otras características básicas que podemos destacar son los protocolos propios de comunicación de la marca (Modbus/RTU, Modbus/TCP y Modbus/Slave) y otros como, por ejemplo, el XWAY TCP/IP (permite la comunicación con autómatas más antiguos).

3.6 Encoder.

Se han utilizado dos encoders diferentes. En un principio el motor 2 tenía un encoder, pero se reemplazó por otro. El encoder que originalmente había conectado al eje de la reductora del motor 2 era un encoder tipo NPN en colector abierto, en concreto, el E6B2-CWZ6C de la marca OMRON, con una precisión de 2000 pulsos/vuelta. Aquí aparecieron problemas que había que solucionar, ya que la lógica utilizada en el programa era positiva y este tipo de encoders necesita lógica negativa. Este problema se solucionó, y se detallará en el apartado de cableado.

Como ya se ha mencionado, se optó por utilizar otro encoder de tipo PNP, con una precisión de 1000 pulsos/vuelta, en concreto, el modelo E6B2-CWZ5B (Figura 8).



Figura 8. Encoder de la marca OMRON (OMRON 2021).

El funcionamiento de estos encoders es practicamente idéntico, solo se diferencian en el tipo de transistor que utilizan para conmutar los pulsos. Internamente tienen una rueda provista de orificios por los que pasa un haz de luz. En el momento que el haz pasa por el orificio se activa el transistor que genera los pulsos, ya sean ascendentes o descendentes.

Cabe destacar que están provistos de tres salidas:

- La salida A es la encargada de emitir los pulsos.
- La salida B es la que indica el sentido de giro.
- La salida Z indica el paso por cero: solo se activa al realizar el encoder una vuelta completa.

Con este tipo de encoders se pueden detectar los pulsos y la dirección ya que las dos fases, A y B, están sincronizadas, en cuadratura, y dependiendo de cuál de las dos se adelanta se detecta un sentido u otro.

Diagrama de tiempos:

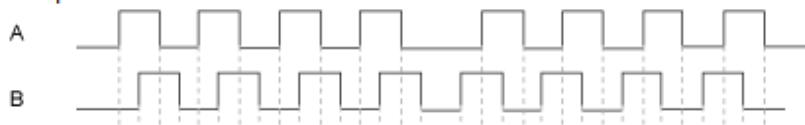


Figura 9. Pulsos en la salida del encoder.

El funcionamiento es el siguiente: si la fase A se adelanta a la fase B, el conteo de los pulsos es ascendente; y descendente en el caso contrario (Figura 9).

3.7 Autómata.

Se presenta una breve introducción al PLC que se va a utilizar. Se trata del Modicon M221 TM221CE24R, un controlador muy compacto. A continuación, se detallan sus principales características.



Figura 10. Imagen del autómata programable Modicon M221 (Schneider Electric 2021a).

Las principales características del controlador TM221C24R son:

- 14 entradas digitales
 - 4 entradas rápidas (HSC)
 - 10 entradas normales
- 10 salidas digitales
 - 10 salidas de relé
 - 2 entradas analógicas
- Puertos de comunicación
 - 1 puerto de línea serie
 - 1 puerto Ethernet
 - 1 puerto de programación USB mini-B

Cabe destacar que no necesita fuente de alimentación externa ya que la lleva incorporada. Sin embargo, aunque puede ser un punto a favor, tiene una parte negativa: no dispone de ninguna salida analógica, por lo que se necesitaría algún módulo externo para este fin.

Se menciona la limitación de las salidas analógicas, ya que se suelen necesitar para el control de los variadores de frecuencia si no se emplea ningún protocolo de comunicación.

En un hipotético caso, que no sea posible comunicarse con el variador, ya sea por incompatibilidad de protocolos, o simplemente porque el variador no disponga de esta opción, se necesitaría una salida analógica para controlar su velocidad de salida. La falta de una salida de este tipo implica que sólo se puede utilizar el variador con unas velocidades prefijadas. Por ejemplo, en nuestro caso, vamos a variar la velocidad de los variadores continuamente. Este inconveniente se puede remediar añadiendo un módulo de expansión que se integra en el mismo controlador, se trata del módulo TMC2AQ2V, provisto de dos salidas analógicas a tensión entre 0 y 10 V (Figura 11).

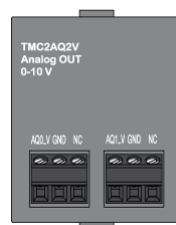


Figura 11. Modulo de salidas analógicas TMC2AQV (Schneider Electric 2021a).

4 Sistema implementado.

En este apartado se va a hacer una presentación general del sistema y se describirá el funcionamiento de la aplicación.

4.1 Presentación general del sistema.

En la figura siguiente se muestran todos los elementos que van a componer el sistema, que son los enumerados en el apartado anterior (Figura 12).

Las tareas que el sistema va a realizar son las siguientes:

- Controlar los dos motores, mediante las entradas del autómatas o mediante la pantalla.
- Mostrar en todo momento información del funcionamiento de los motores por pantalla.
- Cambiar configuración de los variadores a través de la pantalla.

- Posicionar utilizando el motor 2.

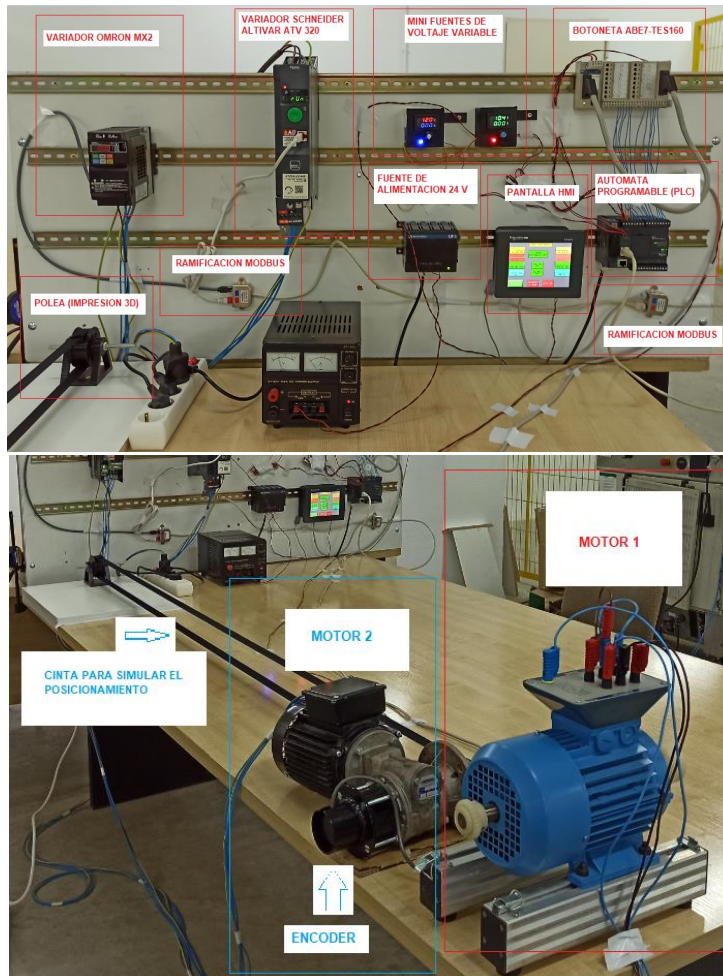


Figura 12. Elementos que componen el sistema.

A continuación, se describirá de manera general la función y tarea de cada uno.

Autómata programable (PLC).

Es una parte importante del sistema y su misión es:

- Controlar los dos variadores de frecuencia y la pantalla HMI. El autómata es el encargado de dar las órdenes de marcha/paro, determinar la frecuencia de salida o cambiar algunos parámetros de configuración de los variadores.
- Controlar la pantalla HMI. Permite cambiar de una pantalla a otra, escribir y leer información en la misma. En base a la información intercambiada con la pantalla HMI el autómata controlará los variadores.

Variador Schneider Altivar ATV 320.

Su función es controlar el motor 1, en base a las órdenes que recibe desde el autómata. Controla el arranque, la parada y la velocidad de giro del mismo.

Variador OMRON MX2.

Es el encargado de controlar el motor 2, en base a las órdenes recibidas por el autómatas. Controla el arranque, la parada y la velocidad de giro del mismo.

Pantalla HMI.

Es una interfaz gráfica entre el sistema y el usuario. A través de esta se realiza un continuo intercambio de información entre el usuario y el sistema. Muestra información de diferentes magnitudes de los motores, velocidades, tensiones, intensidades, frecuencia de salida de los variadores, etc. Es el medio por el cual el usuario intercambia información con el autómatas. Dicha información puede ser: valores de magnitudes del sistema, estados actuales del sistema y órdenes que el usuario transmite al autómatas.

Botonera ABE7-TES160.

Su función es activar las entradas del autómatas. Dependiendo de las entradas que se activen y la programación, el autómatas ejecutará el control sobre los dispositivos del sistema.

Mini fuente de voltaje regulable.

Su función es proveer las entradas analógicas del autómatas con una tensión variable, entre 1,2 y 10 V. En base a ello se puede controlar de forma manual la velocidad de giro de los motores.

Encoder.

Es la realimentación que necesita el autómatas para conocer la velocidad de giro o las vueltas que ha realizado el motor 2. En base a esta información el autómatas puede ejercer un control más preciso sobre este. Al haber un encoder montado en el motor 2, se puede realizar un posicionamiento simple y saber la velocidad de giro del motor.

Ramificación Modbus.

Su única función es facilitar el conexionado de la red de comunicación.

Fuente de alimentación de 24 V.

Se utiliza para alimentar la pantalla HMI.

Polea y cinta.

La polea y la cinta se utilizan para poder simular un proceso real. La polea se ha diseñado mediante un programa de diseño 3D y para su fabricación se ha utilizado la impresora 3D. La cinta es una simple cinta de algodón.

4.2 Descripción del funcionamiento de la aplicación.

En este apartado describiremos cómo funciona la aplicación desarrollada y sus posibles utilidades. Cabe destacar que, como la mayoría de los trabajos de fin de estudios, el enfoque está más centrado en la parte didáctica que en la aplicación final, ya que para desarrollar una aplicación de campo se necesita acceso a las máquinas industriales concretas.

En nuestro caso las funcionalidades implementadas son las siguientes:

- Controlar los dos variadores mediante las entradas del autómatas, MODO BOTONERA.
 - A una velocidad fija, la velocidad máxima.
 - A una velocidad variable, en función del voltaje recibido por las entradas analógicas.
- Controlar los variadores mediante la pantalla HMI, MODO PANTALLA.

- Controlar los dos mediante la pantalla, marcha/paro, a velocidad máxima, o a la velocidad introducida por pantalla.
- Cambiar la configuración de los dos variadores, en concreto, modificar las rampas de aceleración y deceleración.
- Hacer un posicionamiento simple con el variador de OMRON, ya que sólo su motor asociado está provisto de encoder.

4.2.1 Modo Botonera.

Las entradas del autómatas utilizadas para implementar este modo se detallan en la tabla 3:

Tabla 3. Utilización de las entradas del autómatas.

Entrada	Uso
I02	Inicio de la aplicación, solo se activa en el primer ciclo de autómatas.
I03	Seleccionar, MODO BOTONERA.
I04	Seleccionar, MODO PANTALLA.
I05	Salir del MODO, si se desea seleccionar otro modo de funcionamiento.
I06	Marcha/Paro motor 1 (ATV320).
I07	Seleccionar velocidad máxima para los dos motores.
I08	Cambiar la velocidad de los motores.
I09	Seleccionar velocidad variable, para los dos motores.
I10	Parada de emergencia.
I11	Restablecer la aplicación, reinicia el puerto de comunicaciones.
I12	Marcha/Paro motor 2 (Omron).
I13	Invertir el giro motor 2 (Omron).

El funcionamiento de esta parte de la aplicación es el siguiente:

- En el primer arranque del autómatas, para poder utilizar la aplicación, hay que activar la entrada I03, quedando iniciada la aplicación. En la pantalla tendremos información de diferentes parámetros de los dos motores: tensión (V), intensidad (A), frecuencia (Hz) y velocidad (rpm).

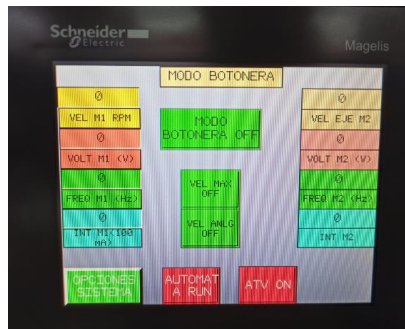


Figura 13. Pantalla de información del Modo Botonera, sin tener el modo seleccionado.

La pantalla de inicio tiene varios indicadores (Figura 13):

- Un indicador que avisa de la existencia de comunicación entre el autómat y la pantalla. Si el autómat no está funcionando, se muestra de color verde. La captura muestra un correcto funcionamiento, indicador de color rojo, y aparece el mensaje **AUTOMATA_RUN** (Figura 13).
 - Un indicador que informa del funcionamiento del variador ATV320. Si se muestra de color rojo, su funcionamiento es correcto. Sin embargo, si se muestra de color verde, hay un problema de comunicación entre el autómat y el variador (Figura 13). En la captura anterior el funcionamiento es el correcto, indicador de color rojo, y mostrando el mensaje **ATV_ON**.
 - Indicador de selección del **MODO BOTONERA**.
 - Información sobre los motores: tensión, frecuencia, intensidad y velocidad.
 - Un pulsador para acceder a las opciones del sistema, **OPCIONES SISTEMA**.
- En el segundo paso, hay activar la entrada I04, y seleccionar el **MODO BOTONERA** (Figura 14).



Figura 14. Pantalla informativa del Modo Botonera, con ese ya seleccionado.

La Figura 14 muestra la pantalla que informa de que ya estamos en el **MODO BOTONERA**. El indicador con el mismo nombre está mostrándose de color rojo, **MODO_BOTONERA_ON**.

- El tercer paso consiste en seleccionar el tipo de velocidad, máxima o variable (en función de las entradas analógicas). Si se activa la entrada I06, se selecciona la velocidad máxima.



Figura 15. Pantalla Modo Botonera, modo y velocidad máxima seleccionados.

Seleccionada la velocidad máxima, los dos variadores van a funcionar a su máxima velocidad. Si se desea cambiar de velocidad, hay que activar la entrada I08 (Figura 15).

- Después de haber activado la entrada I08, ya se puede seleccionar otra velocidad. Si activamos la I09, la velocidad va a ser variable, va a depender del voltaje que reciben las entradas analógicas del autómat (Figura 16).



Figura 16. Pantalla Modo Botonera con el modo y velocidad analógica seleccionados.

Seleccionada la velocidad variable, su correspondiente indicador (**VEL_ANALOGICA**) va a cambiar del color verde a rojo.

Una vez seleccionada la velocidad variable, ésta va a depender del voltaje recibido del autómat mediante sus dos entradas analógicas. Este va a ser el encargado de transformar ese voltaje en velocidad, mediante su programación (Figura 16).



Figura 17. Mini fuente de voltaje variable, basada en el LM317.

La Figura 17 muestra una mini fuente de voltaje regulable basada en un regulador de voltaje LM317. El voltaje de salida está entre 1,2 V y 10,7 V. Las mini fuentes regulables estarán

conectadas a una fuente externa de 12 V. La programación se detallará en los siguientes capítulos.

- El cuarto paso consiste en poner en marcha los motores: el motor 1 se pone en marcha si se activa la entrada I07, y el motor 2 se activa con la entrada I12 para sentido directo, y con la entrada I13 para el cambio de sentido.

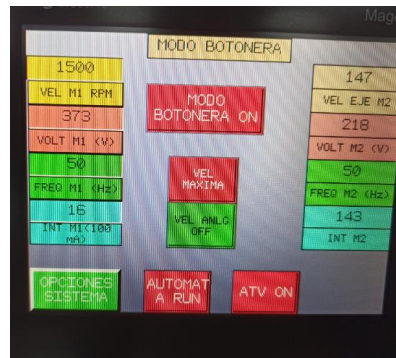


Figura 18. Pantalla Modo Botonera, los dos motores funcionando a su máxima velocidad.

La Figura 18 presenta una pantalla informativa con los dos motores en marcha y la velocidad máxima seleccionada. La información mostrada es la siguiente:

- Para el motor 1 (ATV320): la velocidad del mismo (rpm), la tensión (V), la frecuencia (Hz) y la corriente (x100mA) (Figura 18).
- Para el motor 2 (OMRON): la velocidad del eje (rpm), ya que lleva una reductora, la tensión (V), la frecuencia (Hz) y la corriente (x10mA) (Figura 18).

La Figura 19 muestra el motor 2 funcionando con la velocidad variable seleccionada, se muestra el voltaje de la mini fuente y la frecuencia del variador.

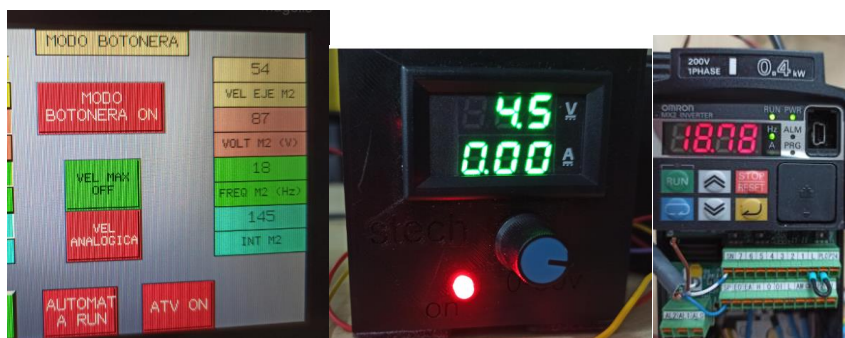


Figura 19. Motor 2 funcionando con velocidad analógica.

- Si se desea cambiar la velocidad, hay que activar la entrada I08, parar los motores, y, una vez que los dos motores estén completamente parados, se cambiará de velocidad.
- Si se desea salir del modo, hay que proceder de la siguiente manera: si hay alguna velocidad seleccionada, primero, hay que activar la entrada I08, y a continuación la entrada I05. Si no hay ninguna velocidad seleccionada, solamente hay que activar la entrada I05.

La aplicación real de esta parte puede ser que en un momento dado se necesite controlar los motores manualmente. Pensando en la empresa colaboradora, esta parte le permitiría al usuario controlar los motores de forma manual en todo momento. Por ejemplo, una de las posibles aplicaciones dentro de la empresa es, el control del funcionamiento de una máquina de corte. Uno de los motores controlaría el

desplazamiento y el otro la sierra. El usuario tendría control sobre los motores y dependiendo de la carga del carro y la dureza de la madera, podría controlarlos de forma manual.

4.2.2 Modo Pantalla.

En este modo de funcionamiento se pueden realizar las siguientes tareas, configurar parámetros de los variadores, accionar los mismos y hacer un posicionamiento del segundo motor (Omron MX2).

El posicionamiento puede ser introduciendo las medidas por pantalla o elegir entre medidas preestablecidas. Esta última opción es la más automatizada, ya que permite la introducción de varias medidas, funcionando de forma autónoma.

Los pasos para seguir para movernos por esta parte de la aplicación son:

- Paso 1, selección del modo: activamos la entrada I04 para seleccionar el modo pantalla, nos llevará a la pantalla principal del modo (Figura 20).

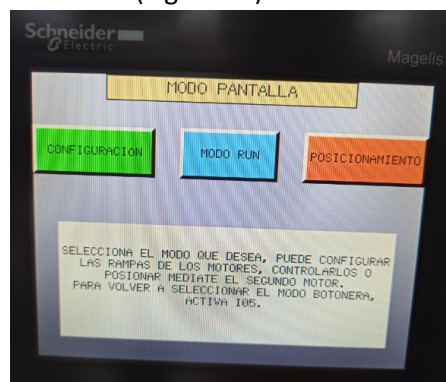


Figura 20. Pantalla principal del Modo Pantalla.

La Figura 20 muestra la pantalla principal de este modo. Hay que elegir una opción o, si se desea volver atrás, hay que activar la entrada I05, se vuelve a la pantalla MODO BOTONERA (Figura 13).

- Paso 2, **CONFIGURACION**: una vez seleccionado el **MODO PANTALLA** (Figura 20), se podrán cambiar parámetros de los dos variadores. En este caso se pueden modificar las 2 rampas: la de aceleración y la de deceleración (Figura 21).

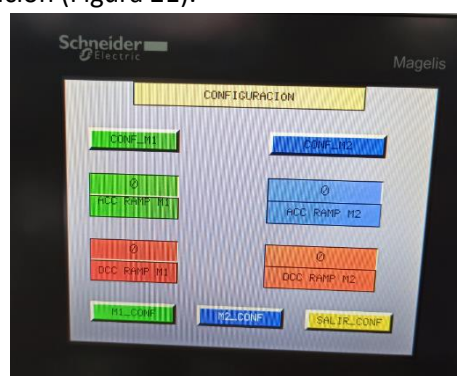


Figura 21. Pantalla Configuración, dentro del Modo Pantalla.

Hay que seleccionar el motor que se desea configurar, se introducen los valores, se valida y, por último, se sale de esta pantalla. En este momento, se volverá a la pantalla principal del modo, la anterior (Figura 21).

- Paso 3, **MODO RUN**: va a permitir controlar los dos motores, tanto a velocidad máxima como a la velocidad introducida por pantalla.

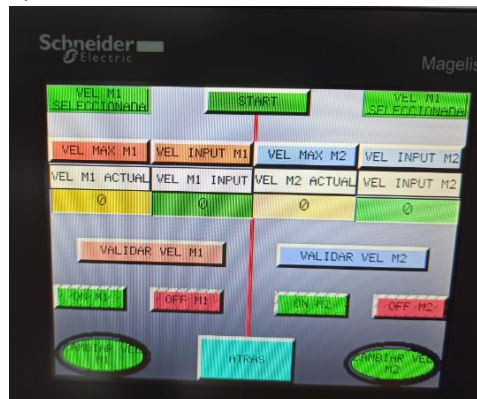


Figura 22. Pantalla accionamiento motores desde la pantalla, dentro del Modo Pantalla.

Para empezar a utilizar este modo, primero hay que presionar **START**, una vez que lo hagamos ya estaremos dentro, los dos indicadores de las esquinas superiores cambiarán de color, **VEL_M_SELECCIONADA** (Figura 22).

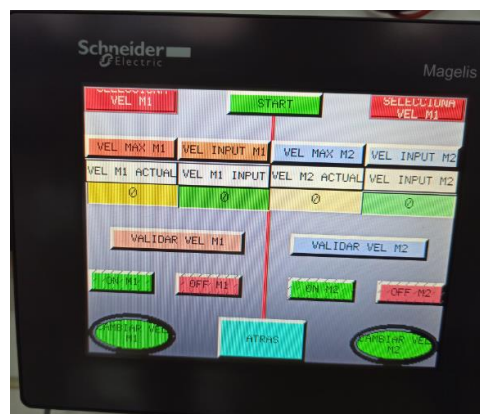


Figura 23. Pantalla accionamiento motores después de pulsar START, dentro del Modo Pantalla.

Acto seguido, hay que seleccionar cuál va a ser la velocidad, la máxima o la introducida por pantalla, pulsadores **VEL_INPUT_M**. En la Figura 24 se muestra el caso en el que la velocidad va a ser la introducida por pantalla. En el ejemplo de la Figura 24 el motor 1, tiene seleccionada una velocidad negativa (rpm), por lo que va a girar en sentido inverso; siendo éste diferente al del motor 2, que no admite velocidades negativas.

El motor 2 es ligeramente diferente, no hay que escribirle directamente las rpm, hay que indicarle la frecuencia a la que se desea girar, la precisión que se puede alcanzar es de 0.01 Hz y no admite frecuencias negativas. Si se desea invertir el giro hay que activar la I13(Figura 24).



Figura 24. Pantalla de accionamiento de motores con las velocidades introducidas, falta validar.

Por último, falta validar la velocidad, **VALIDAR_VEL_M**. Una vez efectuada esta acción, los dos botones para accionar los motores cambiarán de aspecto, **ON_M/OFF_M**. Hasta que no se complete este último paso, estos botones no estarán operativos (Figura 25).

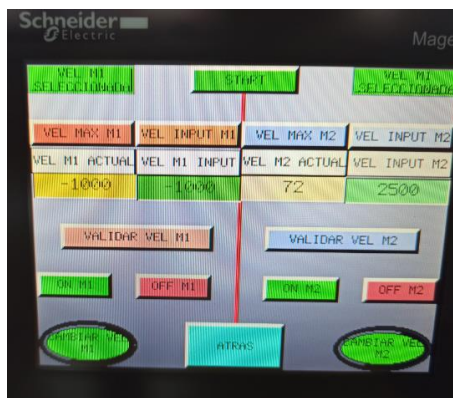


Figura 25. Pantalla de accionamiento con los dos motores funcionando.

En la Figura 25 se muestran los dos motores funcionando. Al introducir la velocidad mediante la pantalla, esta se puede modificar en cualquier momento. Si se desea cambiar de forma de introducción de la velocidad, pasar a velocidad máxima, se deben de activar los pulsadores de cambiar velocidad, **CAMBIAR_VEL_M**. Hasta que los motores no estén completamente parados no se efectúa el cambio. Si se desea salir se acciona el botón **ATRAS**, que llevará a la pantalla principal del modo pantalla (Figura 20). La velocidad mostrada para el motor 1 tiene un valor bajo debido a la reductora que lleva incorporada. Si se activa la parada de emergencia, se paran los motores y se vuelve a la pantalla principal del modo (Figura 20).

- Paso 4, **Posicionamiento**: hay dos maneras de posicionar, mediante la introducción de la medida por pantalla, o la otra opción es elegir una o varias medidas preestablecidas.



Figura 26. Pantalla para elegir el tipo de posicionamiento, dentro del Modo Pantalla.

La Figura 26 muestra la pantalla para seleccionar la opción deseada. Si se acciona **ATRÁS_A_PANTALLA** se vuelve a la pantalla principal del modo, **MODO PANTALLA** (Figura 20). Si se pulsa **INTRODUCIR_MEDIDA** se selecciona posicionar mediante la introducción de las medidas a través de la pantalla (Figura 27).



Figura 27. Pantalla de posicionamiento mediante introducción de la medida por pantalla, dentro del Modo Pantalla.

En el campo **DESTINO** se introduce la medida deseada (cm), teniendo en cuenta que se va realizar un posicionamiento absoluto. Una vez introducido el destino se valida con el pulsador **VALIDAR_MEDIDA**, el posicionamiento comenzará (Figura 27).

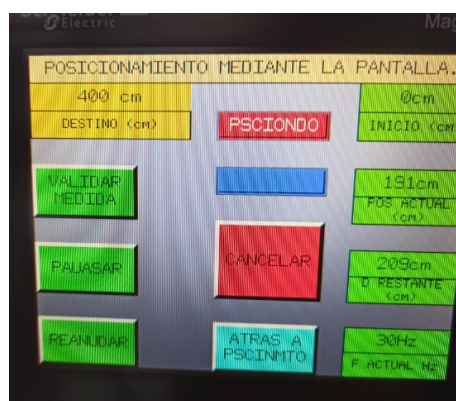


Figura 28. Captura de pantalla con el motor 2 posicionando mediante la introducción de medidas.

Una vez que está posicionando se puede (Figura 28):

- Pausar mediante el pulsador **PAUSAR** y volver a reanudar con el pulsador **REANUDAR**.

- Cancelar mediante el pulsador **CANCELAR**, habrá que volver a introducir la medida.
- Si se activa la parada de emergencia, se para y se vuelve a la pantalla principal, pantalla del **MODO PANTALLA** (Figura 20). De esta forma se consigue una parada en un estado seguro.

Hay dos indicadores: uno indica si se está posicionando y el otro si ya se ha terminado (Figura 28).

Una vez que se llega a la posición deseada, se acciona el motor 1. En una aplicación real, el accionamiento de este podría ser otra tarea (la sierra que realiza el corte). Si se desea salir hay que presionar el botón **ATRÁS_A_PSCINMTO** y volveremos a la pantalla de elección de posicionamiento (Figura 26).

La otra manera de posicionar es mediante medidas prefijadas, se puede elegir entre 8 medidas diferentes. Las medidas se almacenarán por orden de introducción en un registro, con una capacidad de almacenaje de hasta 16 medidas. El orden de ejecución de las misma será el mismos que el de introducción, la primera en ejecutarse es la primera en introducirse. Estando en la pantalla principal del posicionamiento (Figura 26), se selecciona **MEDIDAS PREFIJADAS**, se abrirá la pantalla correspondiente (Figura 29).

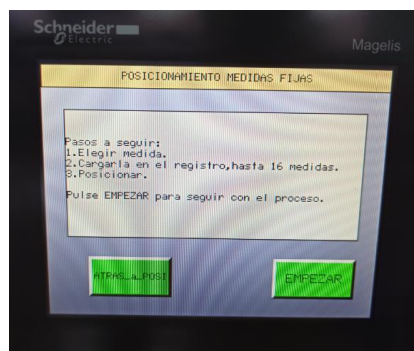


Figura 29. Pantalla de información del posicionamiento mediante medidas prefijadas, dentro del Modo Pantalla.

Una vez dentro (Figura 29) se puede empezar con el proceso o se puede desistir pulsando **ATRÁS_A_POSI**. Si se pulsa **EMPEZAR** se empieza con el proceso (Figura 30). Si se pulsa **ATRÁS_A_POSI** se vuelve a la pantalla de elección del posicionamiento (Figura 26).

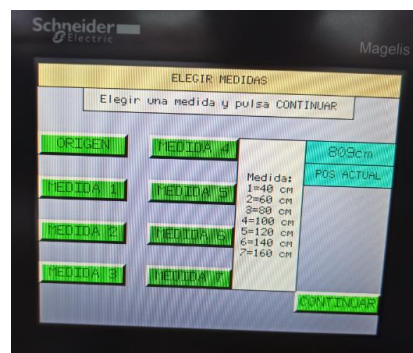


Figura 30. Pantalla de elección de medidas para posicionar, dentro del Modo Pantalla.

Se elige una medida de las 8 existentes y seguido se pulsa **CONTINUAR**, la aplicación nos llevara a la siguiente pantalla (Figura 31)

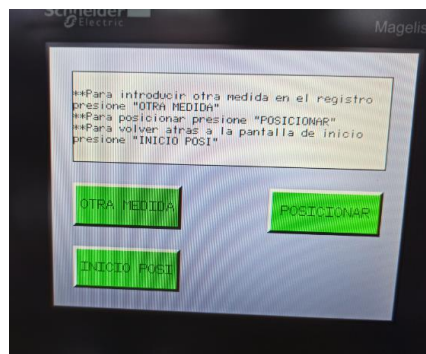


Figura 31. Pantalla de elección entre posicionar y almacenar otra medida.

Estando en la pantalla de la Figura 31 tenemos tres opciones, elegir otra medida, posicionar volver a la pantalla de inicio del posicionamiento. Si se presiona **OTRA_MEDIDA** se podrá almacenar en el registro otra medida (Figura 30). Si se presiona **INICIO_POSI** se vuelve a la pantalla de información de esta parte de la aplicación (Figura 29). Por ultimo si se pulsa **POSICIONAR**, se inicia el posicionamiento (Figura 32).

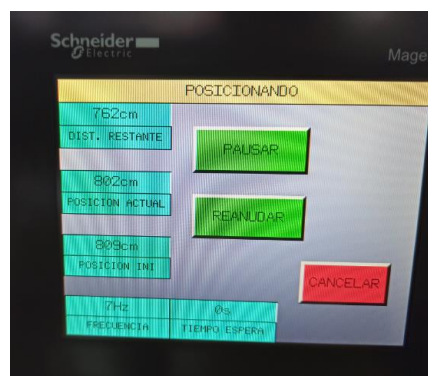


Figura 32. Posicionamiento iniciado.

Una vez que empiece el primer posicionamiento, va a posicionar hasta que termine con todas las medidas introducidas. Después de cada posicionamiento hay un tiempo de espera de 5 s, para poder distinguir entre un posicionamiento y otro.

Estando en este estado se puede (Figura 32):

- Pausar y volver a reanudar, para pausar se pulsa **PAUSAR**, para reanudar se pulsa **REANUDAR**.
- Cancelar, pulsando **CANCELAR** se vuelve a la pantalla de información del posicionamiento mediante medidas prefijadas (Figura 29).
- O si se activa la parada de emergencia se vuelve a la pantalla principal del modo, **MODO PANTALLA** (Figura 20).

Esta parte es la más automatizada, ya que se pueden elegir entre 8 medidas diferentes y ejecutar hasta 16 posicionamientos diferentes, y cargar hasta 16 diferentes. Una vez iniciado el proceso, este se ejecuta de forma autónoma hasta todos los posicionamientos.

En la vida real, en el caso de la empresa colaboradora, el posicionamiento serviría para colocar un tronco en la máquina de corte, y realizarle diferentes cortes. El operario sólo tendría que introducir las medidas, y una vez introducidas, iniciar la aplicación.

5 Desarrollo de la aplicación.

En este apartado se va explicar con detalle el desarrollo de la aplicación implementada que fue presentada en el apartado anterior. En concreto, se va abordar cómo se ha cableado el sistema (sección 3.1), cómo se comunican los dispositivos entre ellos (sección 3.2) y la programación de todos los elementos (sección 3.3).

Se va a empezar por el cableado, se seguirá por explicar las comunicaciones, y por último la programación de los diferentes elementos.

5.1 Cableado.

El cableado desarrollado se puede dividir en dos partes: el cableado de la parte de potencia (conexión de los variadores con los motores) y el cableado del autómatas y comunicaciones.

5.1.1 Parte de potencia: cableado de los motores y los variadores a la red.

En primer lugar, daremos unas pinceladas sobre las medidas de seguridad adoptadas al realizar el cableado de este proyecto. Es necesario tomar ciertas medidas de seguridad, ya que se trabaja con tensiones de red (220 V y 380 V), lo cual entraña un peligro de electrocución:

- Antes de manipular cualquier conexión de los motores hay que desconectar los cables de la red, el variador ATV320 se alimenta a 380 V y el variador de Omron a 220 V.
- Es necesario consultar detenidamente las indicaciones de los fabricantes.
- Una vez realizadas las conexiones, repasar muy bien antes de conectar a la red, evitar cortocircuitos, y, lo más importante, no tocar ninguna parte de las conexiones, como pueden ser tornillos descubiertos.
- Hay conectar el cable de tierra tanto en los motores como en los variadores.
- Una vez que se desconectan los variadores de la red, no se pueden tocar las conexiones de los motores hasta pasados 15 minutos, ya que estos almacenan grandes cantidades de energía.
- No hay manipular las conexiones con los aparatos en tensión.

5.1.1.1 Conexión del variador ATV320 y el motor 1 a la red.

Una vez adoptadas las medidas de seguridad anteriormente mencionadas, ya se puede proceder a la conexión del variador con el motor y posteriormente a la red. No entraña ninguna dificultad ya que el fabricante indica de forma muy clara en uno de los manuales cómo realizar este paso. Simplemente hay que conectar en la entrada del variador la alimentación de la red y, en la salida, se conecta la alimentación del motor (Figura 34).

Cabe destacar que el motor 1 va a estar conectado en estrella (Figura 33).

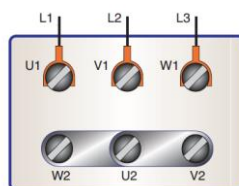


Figura 33. Conexión estrella del motor 1 (Martín and García 2009).

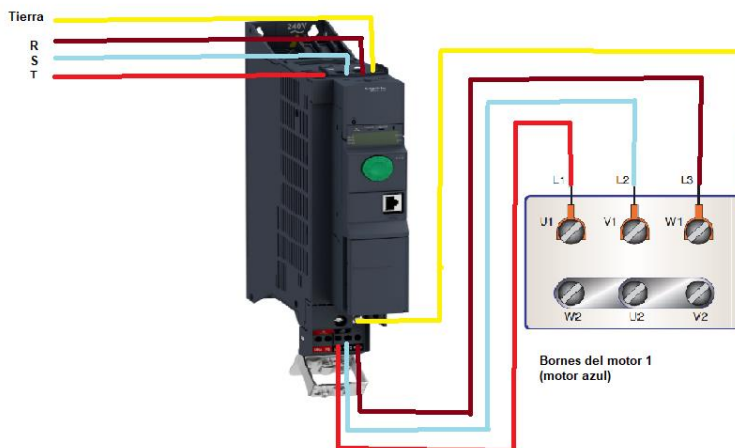


Figura 34. Conexión del variador ATV320 y el motor 1.

En el caso de esta configuración tendremos una tensión de fase de 230 V y una tensión de línea de 380 V, pero las corrientes de línea y de fase son la misma, factor que hay que tener en cuenta dependiendo de la aplicación.

5.1.1.2 Conexión del variador Omron y el motor 2 a la red.

Las conexiones en este caso son diferentes ya que este variador no necesita una alimentación trifásica, basta con una alimentación monofásica (Figura 36). El variador internamente convertirá esta alimentación monofásica para proporcionar una salida trifásica. Dependiendo de la aplicación puede ser un punto a favor ya que se elimina la limitación de la alimentación trifásica.

A su vez, el motor 2 va a estar conectado en triángulo (Figura 35).

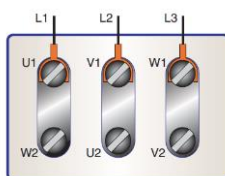


Figura 35. Conexión triángulo del motor 2 (Martín and García 2009).

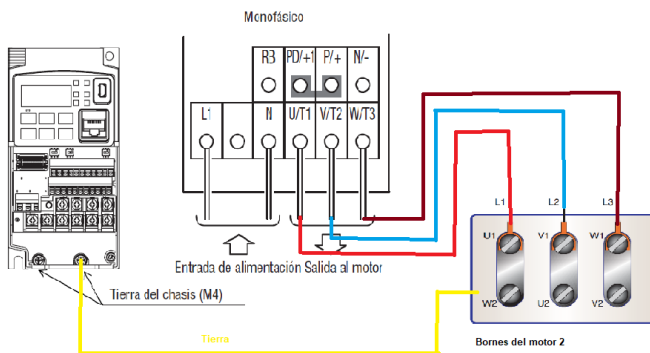


Figura 36. Conexión del variador Omron MX2 y el motor 2.

En este caso, las tensiones de línea y de fase son las mismas (220 V), lo que va a cambiar van a ser las corrientes de línea y de fase. La corriente de línea va ser raíz de tres mayor que las de fase. Como ya hemos mencionado anteriormente, dependiendo de la aplicación, habrá que decantarse por una opción u otra.

5.1.2 Cableado de las entradas del autómatas y comunicaciones.

5.1.2.1 Cableado de las entradas.

Para cablear las entradas del autómatas hay dos opciones: lógica positiva o lógica negativa. En este caso se ha optado por la lógica positiva. La elección de la lógica está fuertemente ligada al tipo de sensores que tiene el resto de la aplicación. En nuestro caso, después de haber optado por la lógica positiva, llego uno de los primeros problemas de este tipo. El encoder que había inicialmente era de tipo NPN en colector abierto, con lo cual necesitaba de lógica negativa para su funcionamiento. Este problema se podría solucionar de dos maneras, cambiando toda la lógica de las entradas, o buscando alguna alternativa sin tener que cambiar la lógica.

Se optó por buscar otra alternativa, ya que cambiar la lógica significaba no poder utilizar la botonera que simula las entradas, ABE7-TES160 (Figura 38), y además habría que cambiar el programa. Una vez solucionado el problema, se decidió cambiar el encoder, cambiando el que había por uno de tipo PNP, el más adecuado para la lógica positiva.

De aquí la importancia de una visión global de la aplicación, siendo lo más importante la planificación de los elementos que se van a utilizar y la clara definición de la aplicación.

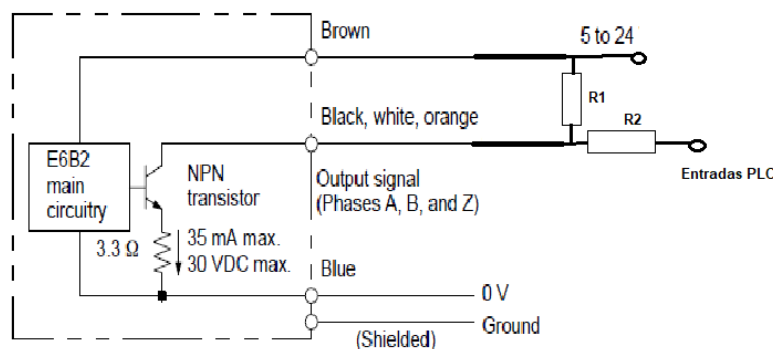


Figura 37. Solución a la incompatibilidad del encoder E6B2-CWZ5C, tipo NPN, con la lógica del autómatas (OMRON 2021).

La solución al problema arriba mencionado ha sido la utilización de dos resistencias, R1 de 700 Ω y R2 de 100 Ω , siendo el funcionamiento es el siguiente (Figura 37):

- Si el transistor interno del encoder está abierto, la corriente se va a tierra mediante la entrada del autómatas, teniendo 24 V en esta misma.
- Pero si el transistor se cierra, la corriente se va a ir a tierra mediante el transistor. De esta manera en la entrada del autómatas habrá 0 V, consiguiéndose el flanco negativo deseado, dando lugar a los pulsos necesarios.

La elección de las resistencias se ha hecho de tal manera que, mientras el transistor este cerrado no circule una corriente muy alta por este, de aquí la elección de R1, con la que la corriente va a ser de 35

mA aproximadamente. A su vez, R2 tiene que ser mucho mayor que la resistencia interna asociada al transistor. Hay que remarcar que, en el caso de una aplicación real, podría haber problemas con la resistencia adicional debida a la longitud de los cables, siendo un factor a tener en cuenta. Este fue uno de los motivos por el que se decidió cambiar de encoder, por el de tipo PNP (Figura 39).



Figura 38. Módulo de simulación, ABE-TES160 (RS-ONLINE 2021).

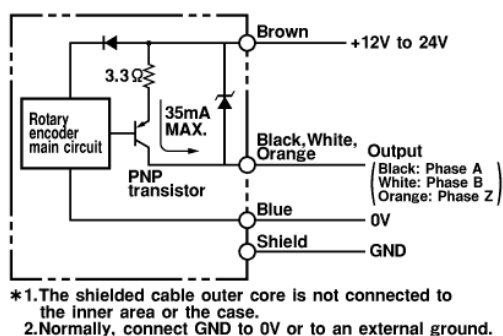


Figura 39. Circuito simplificado del encoder E6B2-CWZ5B, tipo PNP (OMRON INDUSTRIAL 2021b).

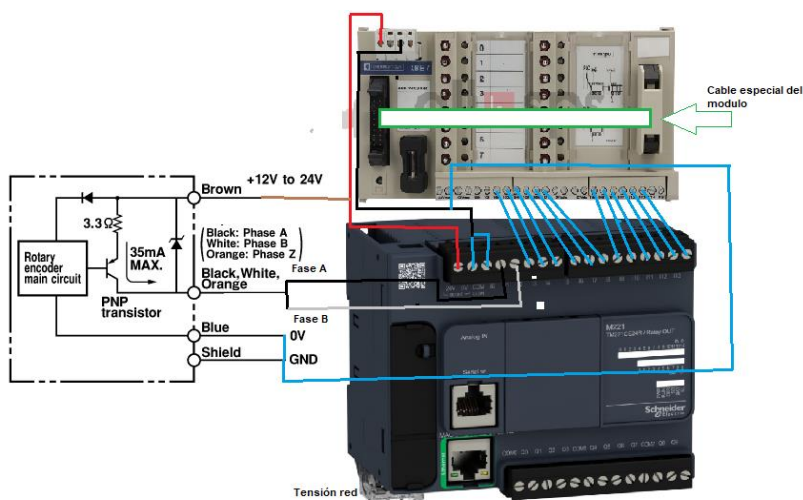


Figura 40. Cableado de las entradas del autómeta.

En cuanto al autómeta, la manera de cablear sus entradas es la siguiente (Figura 40):

- Alimentamos el módulo de simulación y el encoder directamente desde el autómata. Al alimentar de esta manera ya tenemos la misma referencia de tensión en todos los elementos.
- Se conecta cada salida del módulo de simulación con su correspondiente entrada del autómata. Previamente hay que unir los dos terminales del módulo de simulación con su correspondiente cable.
- Se conecta la fase A, cable negro, a la entrada 0 del PLC.
- Se conecta la fase B, cable blanco, a la entrada 1 del PLC.

5.1.2.2 Cableado de las comunicaciones.

Para cablear la comunicación hay que tener los conocimientos necesarios, de cómo debe ser una red Modbus. Esto se va a explicar detenidamente en el capítulo dedicado a las comunicaciones (sección 3.2). En este apartado sólo se va a detallar cómo hay que hacer las conexiones.

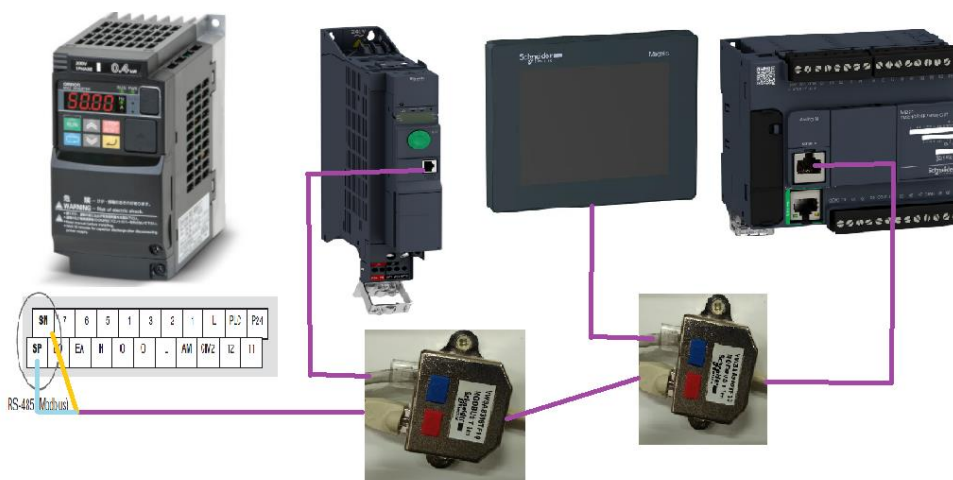


Figura 41. Conexión de las comunicaciones entre dispositivos.

Las conexiones se realizan como en la figura superior, y en cada uno de los dispositivos hay que utilizar los siguientes puertos (Figura 41):

- En el autómata hay que utilizar el puerto COM, conector RJ45, y no el puerto Ethernet.
- En el caso de la pantalla, el mismo puerto COM, conector RJ45, y no el puerto Ethernet.
- Para el variador ATV320, el puerto COM, conector RJ45, el único que tiene en su versión estándar.
- Para el variador Omron MX2, no hay que utilizar ningún puerto, hay que conectar los dos terminales, el positivo y el negativo directamente a sus terminales. Hay que conectar sólo 2 pines de los 8 que tiene el conector RJ45, en nuestro caso el pin 4 y 5. Se detallará en el siguiente capítulo.

El cable que se va a utilizar es un cable normal de red, tipo UTP. En un entorno industrial con grandes distancias entre los dispositivos, este tipo de cable no es adecuado. Se necesitaría un cable trenzado de tres hilos y apantallado, ya que son entornos con grandes interferencias electromagnéticas.

5.2 Comunicaciones.

Como ya se ha mencionado en capítulos anteriores, el protocolo de comunicación entre los dispositivos utilizados es el Modbus/RTU, siendo éste el protocolo soportado por el autómata utilizado.

Este protocolo nace de la mano del equipo liderado por Dick Morley, que fue el creador del primer PLC, el modelo MODICON 084, en pocas palabras, lo podemos considerar como el padre de los PLC.

En 1979 debido a la necesidad de comunicar estos dispositivos, nace Modbus, Modicon Bus, siendo en ese momento propiedad de la marca Modicon.

Modbus hasta 2004 era un protocolo cerrado, pero a partir de ese año paso a ser abierto. Hoy en día pertenece a Modbus Organización (Modbus Organización 2021)

5.2.1 Protocolo Modbus/RTU.

¿Qué es Modbus?

Es un protocolo de comunicaciones industriales ubicado en las capas 1,2 y 7 del modelo OSI, basado en la arquitectura maestro/esclavo o cliente/servidor. Cabe destacar que hay muchas variantes de este protocolo, como, Modbus Plus, Modbus TCP/IP, Modbus ASCII y Modbus RTU.

Otra cosa importante es que no son compatibles entre ellos, solo son compatibles los del mismo tipo. En nuestro caso utilizaremos el Modbus/RTU (Unidad Terminal Remota).

¿Cómo funciona el Modbus/RTU?

Esta variante, se basa en la arquitectura maestro/esclavo, quedándose en las primeras dos capas OSI, y basado en la redundancia cíclica, es decir, se comprueba continuamente la exactitud del mensaje. En este caso, la capa física es la capa serie RS485.

Con ello se forma una red constituida por un maestro y varios esclavos, hasta 247:

- Maestro es el dispositivo que controla el intercambio de datos dentro de la red, como ya he mencionado anteriormente, solo puede haber uno, es el que manda a los esclavos, en nuestro caso el autómatas.
- Esclavos son los dispositivos que realizan las tareas encomendadas por el maestro, puede haber hasta 247, cada uno con una dirección única.

Su funcionamiento a grandes rasgos es el siguiente: el maestro manda un mensaje dentro de la red que contiene lo siguiente:

- Primero la dirección del esclavo, al que va dirigido el mensaje, siendo esta única para cada esclavo de la red.
- En segundo lugar, función a realizar por el esclavo, puede ser activar alguna salida de este, leer entradas, leer algún registro, escribir algún registro, etc.
- En tercer lugar, el dato, lo que tiene que realizar el esclavo.
- Y, por último, un código de seguridad para comprobar que el mensaje es correcto.

Sólo el maestro es el que lanza mensajes dentro de la red, los esclavos están continuamente supervisando la misma para ver si el mensaje que hay es para ellos. En el momento en el que algún esclavo detecta que el mensaje va dirigido a él, contestará al maestro con otro mensaje indicando que ya ha emprendido la acción, incluirá un paquete de datos y un código de error para saber que el mensaje es correcto. Si se produce algún error, ya sea porque no ha podido realizar la operación o por un error en la recepción del mensaje, este enviará un mensaje de error a su remitente.

Estructura del mensaje.

En la siguiente tabla se muestra la estructura del mensaje (Tabla 4).



Tabla 4. Estructura de un mensaje Modbus/RTU (Modicon 1996).

Comienzo	Dirección esclavo	Código de funciones	Datos	Código CRC, comprobación	Final
T1+T2+T3+T4	8 bits	8 bits	n x 8 bits	16 bits	T1+T2+T3+T4



Comienzo y final

Hay que dejar un silencio entre los mensajes. La duración de este está ligada a la velocidad de transmisión y a la estructura interna de los mensajes, ya que se tiene 1 bit antes del carácter, 1 bit de paridad y un bit de parada después del carácter (Tabla 5). Si no se añade el bit de paridad, en su lugar va ser 1 vacío (Tabla 6). En nuestro caso la estructura interna del mensaje contiene el bit de paridad y el bit de parada (Tabla 5) (Modicon 1996).

Tabla 5. Estructura interna del mensaje, secuencia bit a bit, con bit de paridad (Modicon 1996).

Start	1	2	3	4	5	6	7	8	Bit de Paridad	Stop
-------	---	---	---	---	---	---	---	---	----------------	------

Tabla 6. Estructura interna del mensaje, secuencia bit a bit, sin bit de paridad (Modicon 1996).

Start	1	2	3	4	5	6	7	8	Stop	Stop
-------	---	---	---	---	---	---	---	---	------	------

Sabiendo la distribución y la velocidad de transmisión, 19200 baudios, se puede calcular el intervalo de espera entre mensajes (Modicon 1996).

$$T = 4 * \left(\frac{11 \text{ bits}}{19200 \frac{\text{bits}}{\text{s}}} \right) = 2.29 \text{ ms}$$

Dirección del esclavo.

Tiene la longitud de un byte y puede tomar valores de 1 hasta 255, pero como ya hemos mencionado anteriormente sólo se puede tener 247 direcciones (Modicon 1996).

Código de función.

Tiene una longitud de un byte y sus principales códigos están representados en la siguiente tabla (Tabla 7). Toma valores de 1 hasta 255 (Modicon 1996).

Tabla 7. Principales códigos de función (Modicon 1996).

Función	Código de la función en hexadecimal
Leer varios bits	0x01
Escribir un solo bit	0x05
Escribir varios bits	0x0F
Escribir un solo registro	0x06
Escribir varios registros	0x04
Leer varios registros	0x03
Leer/escribir varios registros	0x17

Datos.

Esta parte del mensaje puede tener una longitud de hasta 252 bytes. Los primeros dos bytes representan la dirección de memoria en la que se tiene que empezar. Los dos siguientes representan cuántas direcciones de memoria se van a escribir o leer. Por ejemplo, si se quiere leer dos registros de memoria, en los primeros dos bytes hay que indicarle al esclavo cuál es la primera dirección y en los dos siguientes que se va a leer 2 direcciones de memoria (Modicon 1996).

Código de error.

Es el esclavo el encargado de calcular este código, y mandárselo al maestro. De esta manera se asegura la correcta transmisión del mensaje. No se va entrar en describir cómo se calcula (Modicon 1996).

5.2.2 Cableado de la red Modbus/RTU.

Es muy importante el correcto cableado de la red, ya que su funcionamiento depende de ello. La red va a tener una distribución serie, del maestro se pasa al primer esclavo, de este al siguiente esclavo y así sucesivamente (Figura 42).

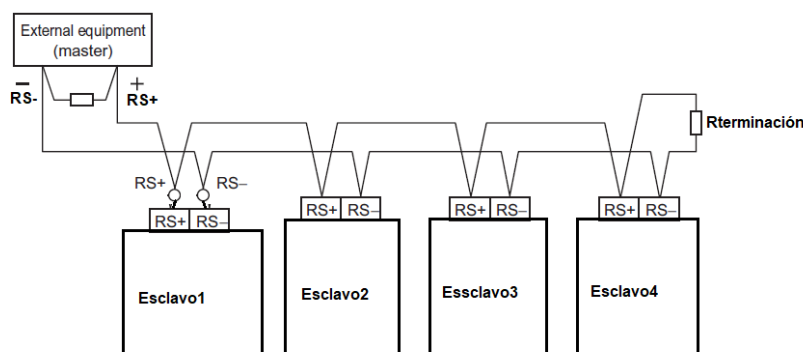


Figura 42. Ejemplo de cableado de una red Modbus/RTU.

Hay varias reglas importantes de una red de este tipo:

- Distancia máxima entre esclavos de 15 m.
- Hay que añadir una resistencia de terminación, 120 Ω, al final de la red (para redes grandes).
- El cable para utilizar tiene que ser trenzado y apantallado (para nuestro proyecto da igual, ya que hay poca distancia y no estamos en un entorno de trabajo real).

Por último, falta detallar qué pines vamos a utilizar, ya que solo se necesitan 3 de los 8 de los que dispone el conector RJ45. Para ello consultaremos el manual del autómatas y habrá que saber cuál es la disposición de los cables en un conector RJ45 (Figura 43).

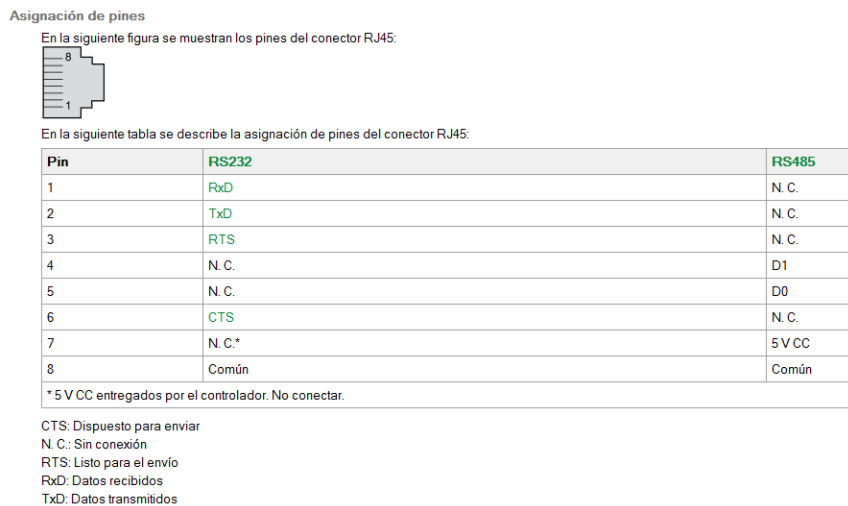


Figura 43. Pines necesarios para la comunicación Modbus/RTU (SchneiderElectric 2019).

Sabiendo que son los pines 4, 5 y 8, falta averiguar el color de los cables que corresponde a esos pines (Figura 44). Se necesita saber este dato para la conexión del variador Omron MX2, ya que, en este caso, la conexión se realiza mediante el terminal de entradas y no a través de un puerto RJ45. En el caso de los demás dispositivos basta con conectarlos a sus respectivos puertos, y a las derivaciones Modbus, tal como se puede apreciar en la Figura 41.

Cabe destacar que hay que conectar también el pin 8 que va a ser el común, pero en el caso del variador Omron MX2 no hace falta. El fabricante no lo especifica. En nuestro caso no se ha conectado y funciona correctamente.

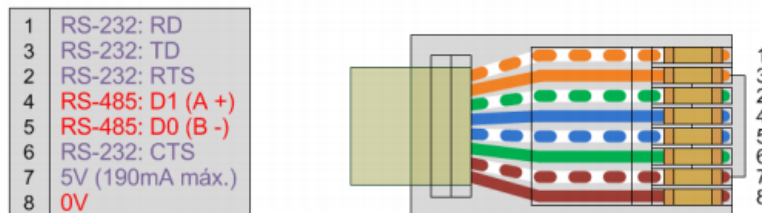


Figura 44. Distribución de los cables, por color, en un conector RJ45.

Vista la Figura 44, el cable azul corresponderá al terminal RS+ y el cable blanco/azul al terminal RS-.

Por último, definiremos las direcciones de los dispositivos en la red. Sólo se necesita definir una dirección para los dispositivos esclavos (Tabla 8):

Tabla 8. Lista de direcciones dentro de la red Modbus.

Dispositivo	Dirección
Pantalla HMI	1
Variador ATV320	2
Variador Omron MX2	3

5.3 Programación.

En este apartado detallaremos la programación y la configuración de los dispositivos utilizados:

- Configuración y programación de la pantalla HMI. La descripción detallada se llevará a cabo en el ANEXO 2.
- Configuración de los variadores.
- Configuración y programación del autómatas programable. Se detallará la programación básica necesaria para poder entender el funcionamiento del programa. La descripción detallada se llevará a cabo en el ANEXO 1.

5.3.1 Programación de la pantalla HMI.

Esta parte del trabajo es una de las más importantes dado que el sistema entero depende del correcto funcionamiento de la pantalla. Como punto de partida se configuró e hizo funcionar la pantalla en conjunto con el autómatas.

La comunicación entre la pantalla y el autómatas fue uno de los primeros obstáculos, debido a que no se conseguía la comunicación entre los dos dispositivos.

En un principio se había optado por el protocolo de comunicación Modbus/TCP/IP, protocolo basado en la relación cliente/servidor, pero al no conseguir que los dispositivos se comunicaran se optó por cambiar de protocolo, se pasó al Modbus Slave (RTU).

Este protocolo es el mismo que el que utilizan los demás dispositivos. Se basa en la relación maestro/esclavo, siendo la pantalla HMI un esclavo más dentro de la red Modbus/RTU.

En esta parte del trabajo se han realizado las siguientes tareas:

- Documentarse y entender el entorno de desarrollo de la pantalla HMI, incluyendo el software Vijeo Designer.
- Crear un nuevo proyecto.
- Configurar correctamente el controlador del proyecto, sobre todo los parámetros de comunicaciones. Configurar el tipo de comunicación (Modbus Slave/RTU), dirección del dispositivo (1), velocidad de transmisión (19200 baudios), los bits de parada y paridad.
- Programar 10 paneles diferentes.
- Definir las variables necesarias.
- Programar 48 interruptores (pulsadores). Estos elementos cambian el valor a variables booleanas (bobinas).

- Programar 22 pilotos (indicadores). Estos elementos evolucionan en función de variables booleanas (bobinas).
- Crear 22 indicadores numéricos. Se emplean para mostrar valores por pantalla o introducir valores a través de esta. Estos elementos tienen asociados variables de tipo entero (palabras).
- Programar 10 acciones diferentes. Sirven para cambiar de un panel a otro en función de una variable booleana (bobinas).

5.3.2 Programación de los variadores.

La configuración de los dos variadores es el primer paso antes de poner en marcha cualquiera de ellos. Hay que configurar en los dos variadores los parámetros de los motores y las opciones de control de los mismos. Como ya se ha mencionado, los variadores serán controlados por comunicación Modbus/RTU, siendo necesario configurar los parámetros asociados y conocer el mapa de los registros internos de cada dispositivo. Para realizar las configuraciones hay que recurrir a sus respectivos manuales de referencia.

5.3.2.1 Configuración del variador ATV 320.

La configuración de los parámetros del variador ATV320 se lleva a cabo mediante el dial que tiene en la frontal y el pulsador **ESC** (Figura 45).

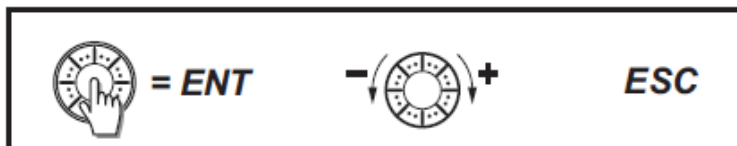


Figura 45. Interfaz de configuración del ATV30 (Schneider Electric 2020a) .

Para llevar a cabo la configuración de cualquier parámetro hay que presionar sobre el dial, cada pulsación nos lleva a un menú. Una vez que estamos en el menú deseado se gira el dial hasta llegar al parámetro deseado. A continuación, se cambia el parámetro, se presiona el dial y para volver atrás se presiona **ESC** (Figura 45).

La organización de los menús de este dispositivo es un tanto engorrosa, ya que está distribuida en varios niveles de menús; de cada menú principal dependen otros submenús. Por ejemplo, en la imagen posterior, el submenú **FULL** está dentro del menú **CONF**, y el submenú **SIM** está dentro del submenú **FULL** (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

A continuación, se detallarán los pasos a seguir para la configuración de uno de los parámetros, la frecuencia estándar del motor. El procedimiento es el mismo para cualquier parámetro:

- Presionamos una vez el dial hasta que nos aparezca en pantalla **CONF**, menú de configuración.
- Giramos el dial hasta que nos aparezca **FULL**, submenú que contiene la mayoría de los parámetros que nos interesan, pulsamos el dial, **ENTER**.
- Giramos el dial hasta que aparezca **SIM** y presionamos el dial.
- Volvemos a girar el dial hasta llegar al parámetro deseado, **BFR**, presionamos el dial, el valor que aparece en pantalla parpadea, giramos el dial hasta el valor deseado y se vuelve a validar presionando el dial.
- Para volver atrás presionamos **ESC**.

En figura inferior se muestran los pasos para llevar a cabo la configuración (Figura 46).

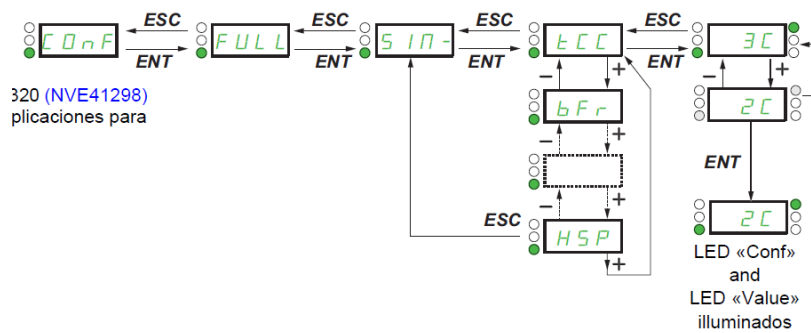


Figura 46. Pasos a seguir para la configuración de parámetros (Schneider Electric 2020a).

En la siguiente tabla se muestran los parámetros configurados (Tabla 9).

Tabla 9. Listado de parámetros configurados en el variador ATV320 (Schneider Electric 2020b).

Parámetro a configurar	Menú	Submenú 1	Submenú 2	Parámetro	Valor
Tensión	CONF	FULL	SIM	UNS	380 (V)
Intensidad nominal	CONF	FULL	SIM	NCR	2 (A)
Frecuencia	CONF	FULL	SIM	BFR	50 (Hz)
Control	CONF	FULL	CTL	FR1	MBD
Dirección Modbus	CONF	FULL	CON	ADD	2
Velocidad de transmisión	CONF	FULL	CON	TBR	19200 (baudios)

NOTA: si el variador ha sido empleado en otras aplicaciones hay que restaurar a los ajustes de fábrica, borrando todos los ajustes existentes.

5.3.2.2 Configuración del variador Omron MX2

En comparación con el variador anterior hay grandes diferencias, tanto a nivel de organización de parámetros, como de la manera en la que se realiza la configuración. Los parámetros están agrupados en bloques, y la configuración se lleva a cabo mediante el teclado que lleva integrado (Figura 47).

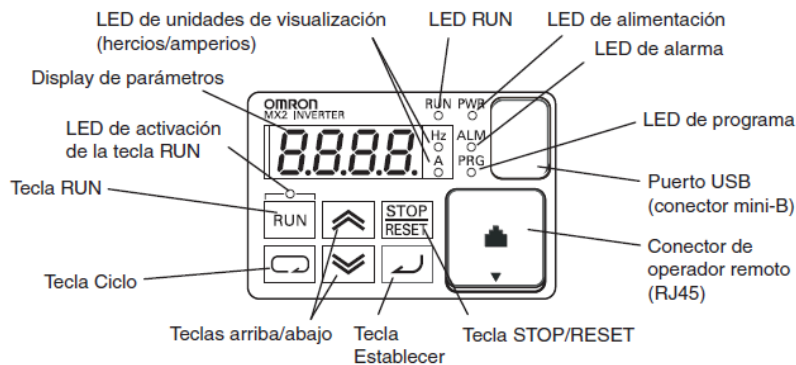


Figura 47. interfaz de control del variador Omron MX2(Omron 2009).

Para configurar cualquier parámetro:

- Se presiona la **Tecla Ciclo**, hasta que aparece en pantalla el bloque de parámetros deseado.
- Una vez seleccionado el bloque de parámetros a configurar, mediante las **Teclas arriba/abajo** se busca el parámetro.
- Llegados al parámetro mediante las **Teclas arriba/abajo** se selecciona el valor deseado.
- Por último, se presiona la **Tecla Establecer**.

Dado que este variador se ha empleado en otras aplicaciones, primero hay que restablecer los valores de fábrica y para ello hay que actuar sobre varios parámetros, en el orden en que se describe en la tabla siguiente (Tabla 10).

Tabla 10. Pasos y parámetros a configurar para restablecer el variador Omron MX2 a valores de fábrica(Omron 2009).

Bloque	Parámetro	Valor	Descripción
Funciones de ajuste-B	B084	04	Borra fallos, programación y parámetros anteriores.
Funciones de ajuste-B	B085	01	Región, Europa.
Funciones de ajuste-B	B094	00	Inicializar todos los parámetros
Funciones de ajuste-B	B180	01	Inicializar borrado.

El siguiente paso consiste en introducir los parámetros del motor, para ello le programaremos un auto ajuste. Este implica que va ser el variador el encargado de comprobar y configurar dichos parámetros (Tabla 11).

Tabla 11. Configuración para realizar el autoajuste del motor 2, variador Omron MX2 (Omron 2009).

Bloque	Parámetro	Valor	Descripción
Constantes del motor-H	H001	01	Realiza un auto ajuste, calculando los parámetros del motor.

Una vez se tiene el parámetro seleccionado, se presiona la tecla **RUN**. Se espera a que termine.

Hay que configurar el control y cuál va ser su referencia para la frecuencia. Evidentemente los dos serán a través de Modbus/RTU (Tabla 12).

Tabla 12. Configuración del control y la referencia de frecuencia del variador Omron MX2 (Omron 2009).

Bloque	Parámetro	Valor	Descripción
Funciones estándar-A	A001	02	Control RUN mediante Modbus
Funciones estándar-A	A002	02	Referencia de frecuencia mediante Modbus

Por ultimo falta configurar los parámetros de comunicación (Tabla 13).

Tabla 13. Configuración de los parámetros de comunicación del variador Omron MX2 (Omron 2009).

Bloque	Parámetro	Valor	Descripción
Funciones del terminal inteligente-C	C071	06	Velocidad de trasmisión, 19200 baudios.
Funciones del terminal inteligente-C	C072	3	Dirección Modbus, numero 3 dentro de la red.
Funciones del terminal inteligente-C	C074	01	Paridad de comunicaciones, par.
Funciones del terminal inteligente-C	C075	01	Bit de parada, 1 bit.
Funciones del terminal inteligente-C	C078	3	Tiempo de espera entre los mensajes, 3 ms.

5.3.3 Configuración y programación de PLC.

En este apartado se va a detallar la programación y configuración del autómatas programable. Se detallará la configuración necesaria para el funcionamiento de la aplicación, centrándonos especialmente en la

parte de comunicaciones y programación. Debido a la gran extensión que ocupa detallar la programación, los detalles han sido incluidos en un anexo dedicado (ANEXO 1).

5.3.3.1 Configuración previa.

Iniciamos el entorno de desarrollo del PLC, ECOSTRUCTURE MACHINE BASIC. Una vez iniciado, la primera pantalla es la de **Propiedades**. Dentro de la misma se va cumplimentar toda la información descriptiva de la aplicación: nombre, autor, información y la protección. La protección tiene una gran importancia ya que va proteger a la aplicación frente a la escritura o lectura. Se debe prestar especial atención a esta parte ya que si se activa la protección y se pierde la contraseña hay que volver a instalar el firmware del PLC, dando lugar a la pérdida total de la aplicación. En este caso concreto se ha optado por no activar la protección.

Hay que seguir a la siguiente pestaña, **Configuración**. Se añade el equipo, se configuran las comunicaciones y se configurara el encoder (Figura 48).

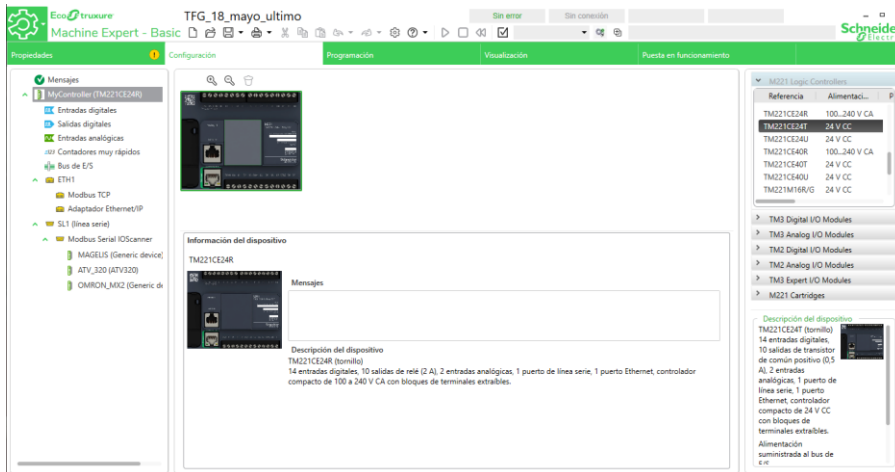


Figura 48. Pantalla de configuración del autómat M221.

Los pasos a seguir para llevar a cabo la configuración son:

- Elegir el equipo deseado de la lista situada en la parte izquierda de la pantalla. Es una lista con todos los equipos disponibles y módulos de ampliación. Nuestro equipo es el TM221CE24. Se selecciona y se arrastra al espacio de trabajo, que es la parte central de la pantalla (Figura 48).
- Configurar los **Contadores muy rápidos**, que es una configuración necesaria para que el PLC reconozca al encoder. Para ello se va a la parte izquierda de la pantalla, se hace doble clic izquierdo y se abrirá un cuadro de configuración (Figura 49).

Contadores de alta velocidad					
Configurado	Dirección	Símbolo	Tipo	Configuración	Comentario
<input checked="" type="checkbox"/>	%HSC0		Fase dual - Grande libre - Cuadratura	...	
<input type="checkbox"/>	%HSC1		Sin configurar	...	
<input type="checkbox"/>	%HSC2		Sin configurar	...	
<input type="checkbox"/>	%HSC3		Sin configurar	...	

Figura 49. Pantalla configuración de contadores rápidos (encoder), autómat M221.

Se selecciona el **%HSC0**. A continuación, se pincha sobre configuración y se abre una ventana de configuración (Figura 50).

Parámetros a configurar:

- **Tipo de HSC, Fase dual:** es un encoder con dos salidas, conteo y dirección.

- **Modalidad de entrada, Cuadratura X1:** cada pulso va contar 1 o descontar 1 en función de la dirección de giro.
- **Palabra doble,** seleccionada: es la palabra donde se almacenan los pulsos (es una palabra doble sin signo).
- **Preajuste:** valor que adquiere el contador al restablecer el contador.
- **Entradas:** las entradas del autómatas que tiene preestablecidas para cablear el encoder.
- Los otros parámetros son: **Desencadenador,** son eventos que se pueden programar y los **Umrales,** se pueden programar para activar salidas si se llega a su valor configurado.

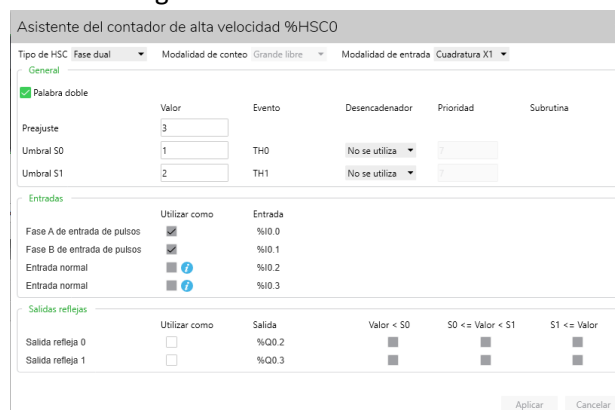


Figura 50. Pantalla de configuración del encoder.

Todos los cambios hay que aplicarlos antes de salir. El mismo programa va a advertir.

- Para configurar las comunicaciones, los pasos a seguir son:
 - Primer paso:** hay que hacer clic izquierdo sobre **SL1 (línea serie)**, parte izquierda de la pantalla (Figura 48). Se abrirá una nueva ventana de configuración, se configuran los parámetros como en la figura y, por último, se aplican los cambios, pulsando sobre **Aplicar** (Figura 51).

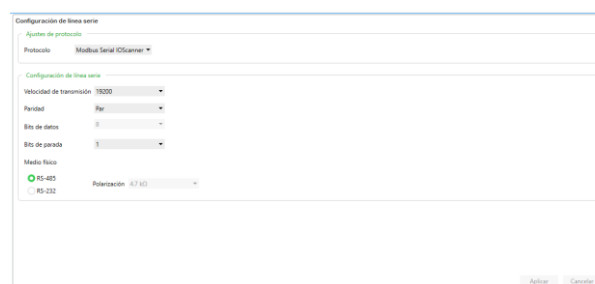


Figura 51. Pantalla de configuración del puerto serie, SL1.

Segundo paso: se añaden los dispositivos existentes en la red Modbus/RTU. Para ello se presiona **Modbus Serial I/O Scanner**, parte izquierda de la pantalla, y se abrirá una ventana de configuración (Figura 52).



Figura 52. Pantalla para añadir los dispositivos que componen la red Modbus: esclavos.

Para añadir los dispositivos hay dos opciones: bien desde la lista de dispositivos que ofrece el fabricante (mayoritariamente variadores de la marca) o como uno genérico (Figura 52). El variador ATV320 es uno de los dispositivos que, si están en la lista, hay que seleccionarlo y pulsar **Añadir**. Por el contrario, la pantalla HMI y el variador Omron MX2 se añaden como dispositivos genéricos. Para ello hay que seleccionar **Otros** y pulsar **Añadir** (Figura 52).

Una vez realizada la configuración anterior, hay que configurar los **canales de comunicación** de cada dispositivo. Cabe destacar que las comunicaciones tienen su propio módulo, independiente de la CPU (Figura 53). La comunicación se realiza de forma periódica.

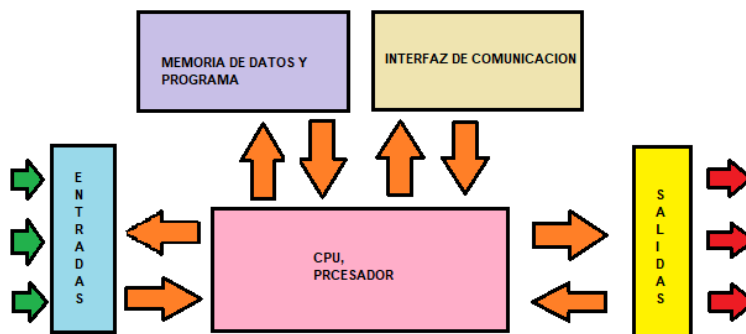


Figura 53. Esquema básico de la arquitectura interna de un autómata programable.

Es importante entender lo que es un canal de comunicación. Un canal de comunicación es el medio por el cual el maestro intercambia información con los esclavos. La información que intercambian puede ser bobinas (bits) o registros (palabras).

A continuación, se va explicar el funcionamiento de los canales de comunicación. Pueden ser de lectura o de escritura, se leen y escriben bobinas o registros. En esta parte hay que tener muy claro el mapa de memoria de los dispositivos: direcciones de memoria de los registros Modbus. En el caso de la pantalla, no hay problema ya que somos nosotros los que definimos la posición de cada variable. En el caso de los variadores, hay que conocer las direcciones que tienen asignadas las variables. Para ello hay que consultar los manuales de referencia de estos.

En la siguiente figura se mostrará gráficamente un canal de escritura de un registro cualquiera (Figura 54).

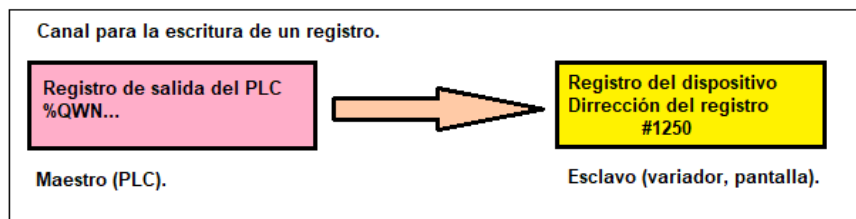


Figura 54. Canal de comunicación para la escritura de registros.

El funcionamiento del canal mostrado se explica a continuación. El autómatas escribe en el registro de salida. Este registro está enlazado con el registro a escribir en el dispositivo. El valor que hay en el registro de salida del PLC es el valor que se escribirá en el registro del dispositivo, en el ejemplo anterior, en la posición de memoria 1250. Esta operación se puede realizar con un solo registro o con varios registros. Si se va a realizar la escritura de varios registros es importante que las posiciones de memoria de estos sean consecutivas, de lo contrario no es posible.

En la siguiente figura se mostrará gráficamente un canal de lectura de un registro cualquiera (Figura 55).

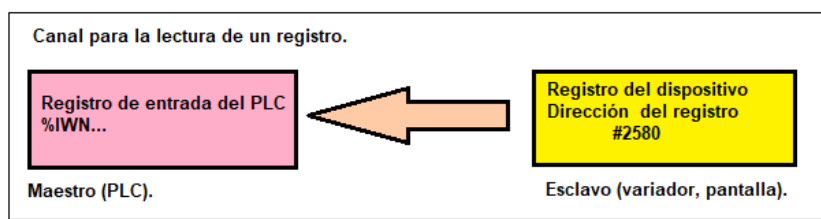


Figura 55. Canal de comunicación para la lectura de registros.

El funcionamiento es muy parecido al caso de la escritura. El registro de entrada del autómatas está enlazado con el registro del dispositivo: en este caso la posición de memoria 2580. El valor de este registro lo lee el autómatas y escribe en su registro de entrada. Cada vez que el autómatas necesite, dentro de su programa maestro, este valor, le basta con leer el registro de entrada y en base a ello tomar decisiones.

La información intercambiada en la lectura y escritura de registros son variables de tipo entero (palabras de 16 bits).

Para las bobinas el funcionamiento es el mismo que para los registros, con la salvedad de que la información intercambiada son variables booleanas.

A continuación, se detallará como se crea un canal de comunicación.

Con la pantalla de configuración de **Modbus Serial IOScanner** abierta (Figura 52), se va al dispositivo deseado y se pulsa sobre la pestaña que hay debajo de **Canales**. Esto dará lugar a la apertura de otra pantalla de configuración (Figura 56).

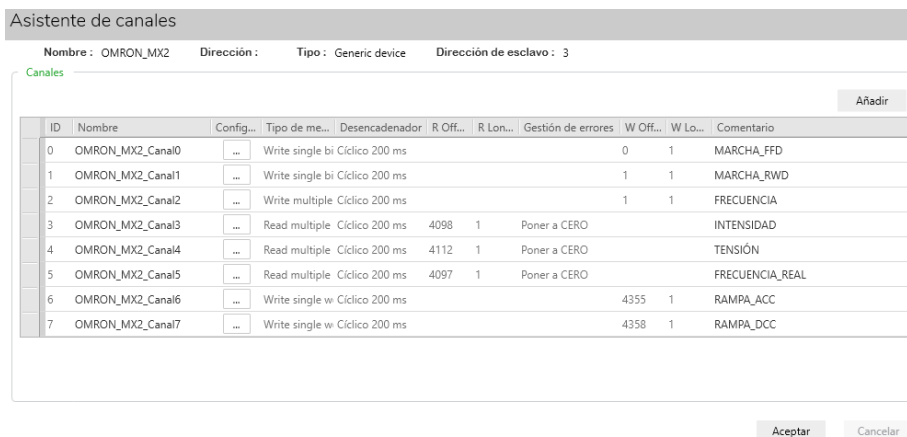


Figura 56. Pantalla para añadir canales de comunicación.

En la figura mostrada (Figura 56), por ejemplo, el canal 3 realiza la lectura de varios registros del variador Omron MX2. La primera dirección de memoria que va a leer va a ser la 4098. Solo va a leer un registro, pero podrían ser más. En este registro está el valor de la intensidad del motor 2. Además, para añadir otro canal desde esta pantalla hay que pulsar **Añadir**. Con esto, se añadirá un nuevo canal al final de la lista, que habrá que configurar. Para ello habrá que pulsar la pestaña que hay debajo de **Configuración**. Esto dará lugar a la apertura de otra pantalla, **Asistente de canales** (Figura 57).

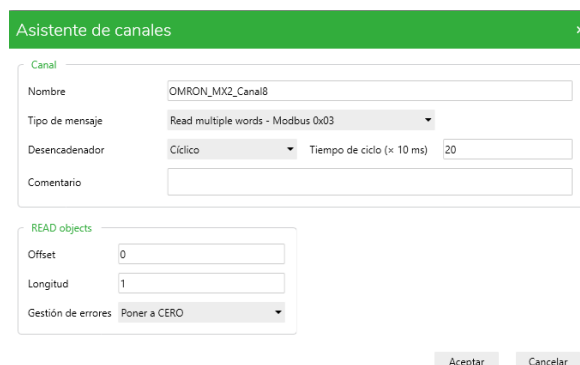


Figura 57. Pantalla de configuración de los canales de configuración.

Para finalizar, solo falta configurar los parámetros, el tipo de mensaje (**Tipo de mensaje**), cuál va a ser la primera dirección que se va a leer/escribir (**Offset**) y cuántas direcciones se van a leer/escribir (**Longitud**).

5.3.3.2 Programación del PLC.

Para llevar a cabo la programación se han empleado dos paradigmas de programación: GRAFCET SFC (redes de Petri) y LADDER (contactos). Las redes de Petri están compuestas por lugares (estados), transiciones (condiciones para pasar de un estado a otro) y arcos (la unión entre lugares y transiciones).

El programa principal está programado mediante GRAFCET SFC. El resto de las partes del programa, como el POST o las transiciones de los GRAFCET, están programadas mediante LADDER (contactos). La programación está organizada en diferentes GRAFCET SFC: uno para cada parte de la aplicación. De esta forma se consigue una mejor estructura de la programación de la aplicación.

En la Figura 58 se muestra una visión global de la aplicación: cada bloque es una parte de la aplicación y tiene su propio GRAFCET SFC, de tal modo que dependen uno de otro de forma jerárquica como se puede apreciar en la figura (Figura 58).

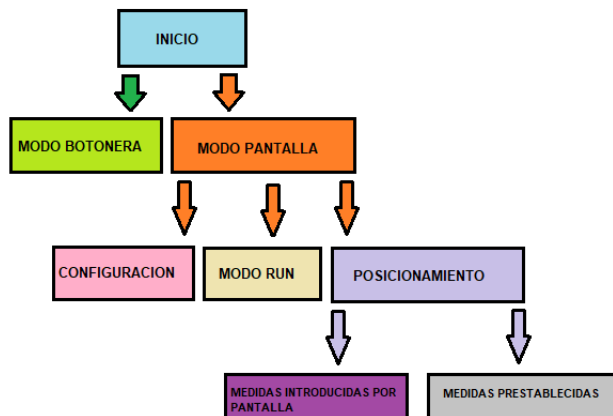


Figura 58. Diagramas de bloques de la aplicación.

Estando en el **GRAF CET PRINCIPAL** hay dos opciones, dependiendo la que se elija activará su grafcet correspondiente. Las opciones son:

1. **MODO BOTONERA:** si se elige esta opción se activa su correspondiente grafcet, que permite controlar los motores mediante las entradas del autómeta.
2. **MODO PANTALLA:** si se elige esta opción, se activa su grafcet correspondiente. El control de los motores se lleva a cabo desde la pantalla HMI. Se nos abren otras tres posibilidades de funcionamiento, cada una con su grafcet:
 - a. **CONFIGURACION:** se pueden configurar parámetros de los variadores.
 - b. **MODO RUN:** se accionan los motores mediante la pantalla.
 - c. **POSICIONAMIENTO:** se puede hacer de dos formas; mediante la introducción de las medidas por pantalla o mediante la elección de medidas prestablecidas.

En la siguiente figura se muestra el **GRAF CET PRINCIPAL** (Figura 59).

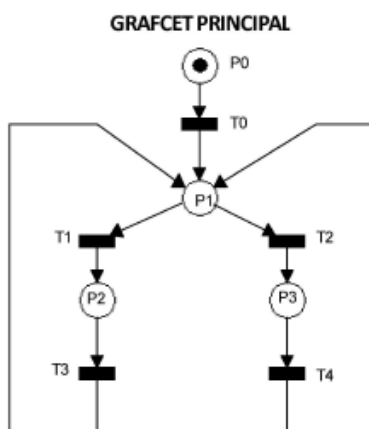


Figura 59. GRAFCET PRINCIPAL.

Lugares del GRAFCET PRINCIPAL:

- P0, posición inicial: va estar activo en el primer arranque del autómeta.
- P1, la aplicación ya se ha iniciado: se espera la siguiente elección.
- P2, MODO BOTONERA elegido.
- P3, MODO PANTALLA elegido.

Transiciones del GRAFCET PRINCIPAL:

- T0, condición para iniciar por primera vez la aplicación.
- T1, condición para elegir el MODO BOTONERA: se activa la entrada I03.
- T2, condición para elegir el MODO PANTALLA: se activa la entrada I04.
- T3, condición para salir del MODO BOTONERA: al activarse el lugar P22 (Figura 60).
- T4, condición para salir del MODO PANTALLA: al activarse P29 (Figura 62).

En la figura siguiente se muestra el **GRAFCET MODO BOTONERA**, es el que controla los dos motores mediante las entradas del autómeta (Figura 60).

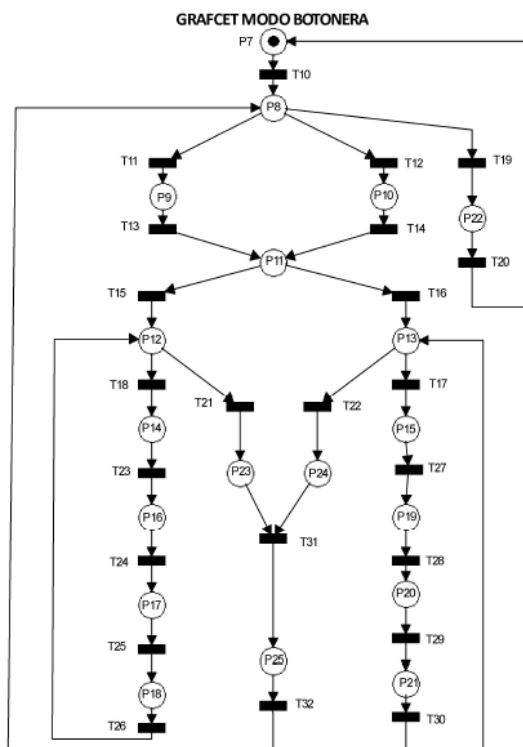


Figura 60. GRAFCET MODO BOTONERA.

Los lugares del grafcet **MODO BOTONERA** son:

- P7, posición inicial del grafcet.
- P8, se espera la elección de la referencia de velocidad, velocidad máxima o velocidad variable (en función del voltaje de las entradas analógicas).
- P9, se elige como referencia la velocidad máxima: los motores van a funcionar a su máximo de velocidad.

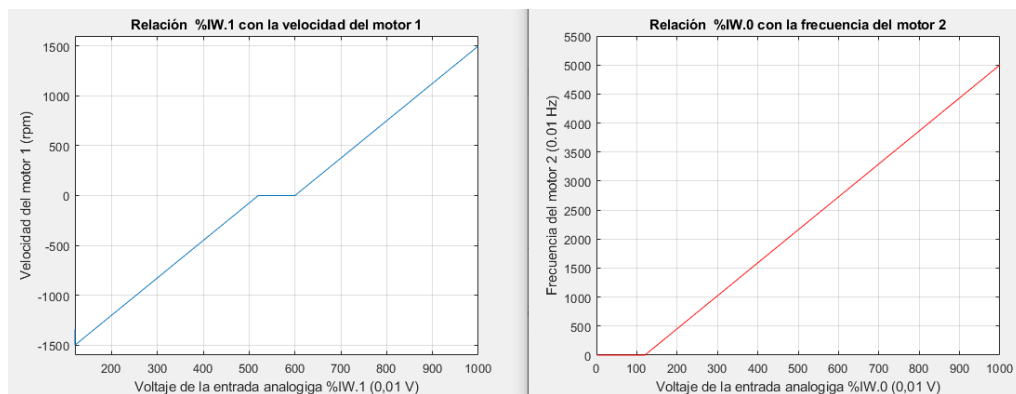


Figura 61. Relación voltaje/velocidad para los dos motores.

- P10: se elige la velocidad variable: una relación entre el voltaje de las entradas analógicas del autómeta y la velocidad o la frecuencia de los motores. En el caso del motor 1, es una relación voltaje/velocidad, pero, en el caso del otro motor, es una relación voltaje/frecuencia. Se hace el cálculo de la velocidad según la figura (Figura 61) y el valor se escribe en los registros correspondientes de los variadores.
- P12 y P13: el motor 1 y el motor 2 están esperando el comando de arranque.
- P14 y P15: el motor 1 y el motor 2 ya están en funcionamiento.
- P23 y P24: se desea elegir otra velocidad, salir o se ha activado la parada de emergencia.
- P16 y P19: los dos motores están parando.
- P17 y P20: los motores están completamente parados.
- P18, P21 y P25: sólo son pasos intermedios.
- P22: se va salir de este modo de funcionamiento.

Las transiciones del **MODO BOTONERA** son:

- T10, condición para iniciar el modo: al activarse P2 (Figura 59).
- T11, condición para elegir la velocidad máxima como referencia: activar la entrada I07.
- T12, condición para elegir la velocidad variable como referencia: activar la entrada I09.
- T13, T14, T15, T16, son transiciones entremedias: son verdaderas siempre.
- T18 y T17, condiciones para el arranque de los motores: entrada I06 para el motor 1 y I12 para el motor 2.
- T23 y T27, el paro de los motores: si se desactivan las dos entradas mencionadas anteriormente se procede al paro de los motores.
- T24 y T28, condición de que los dos motores están parados: se activa una marca al detectar la velocidad nula de los motores.
- T25, T29, T26, T30, T32: condiciones siempre verdaderas.
- T19, condición para salir del modo: se desea salir o se activado la parada de emergencia.

En la siguiente figura se muestra el **GRAFSET MODO PANTALLA** (Figura 62).

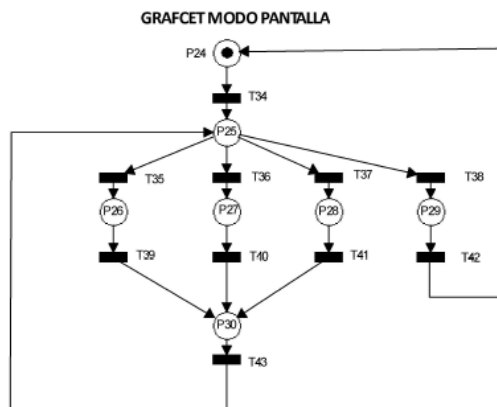


Figura 62. GRAFCET MODO PANTALLA.

Los lugares grafcet **MODO PANTALLA** son:

- P24, paso inicial.
- P25, espera una elección.
- P26, seleccionada CONFIGURACION: configurar las rampas de los variadores.
- P27, seleccionado MODO RUN: se controlan los motores mediante la pantalla.
- P28, seleccionado POSICIONAMIENTO: se posiciona a través del motor 2.
- P29, se sale de este modo de funcionamiento.

Las transiciones grafcet **MODO PANTALLA** son:

- T34, condición para el inicio de este modo de funcionamiento: al activarse P3 (Figura 59).
- T35, condición para pasar a CONFIGURACION: pulsador **CONFIGURACION** (Figura 20).
- T36, condición para pasar a MODO RUN: pulsador **MODO RUN** (Figura 20).
- T37, condición para pasar a POSICIONAMIENTO: pulsador **POSICIONAMIENTO** (Figura 20).
- T38, condición para salir de este modo: al activar la entrada I05.
- T39, condición para salir de CONFIGURACION: se activa P39 (Figura 63).
- T40, condición para salir de MODO RUN: se activa P67 (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).
- T41, condición para salir de POSICIONAMIENTO: se activa P90 (Figura 64).
- T43, T43: siempre verdaderas.

En la siguiente figura (Figura 63) se muestra el **GRAFCET CONFIGURACION**.

Los lugares del grafcet **CONFIGURACION** son:

- P32: paso inicial.
- P33: espera la elección del motor que va a ser configurado.
- P34, P35: configurando rampas del motor y el motor 2.
- P36, P37: rampas configuradas.
- P38: paso intermedio.
- P39: salir de la configuración.

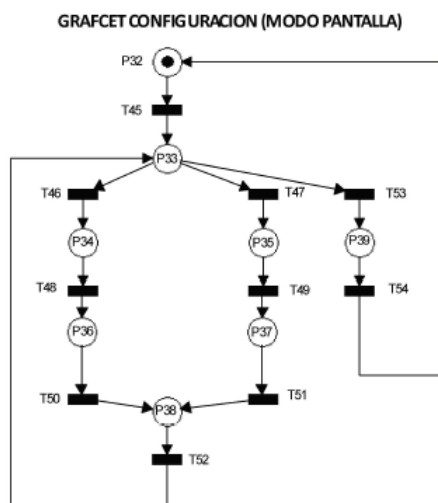


Figura 63. GRAFCET CONFIGURACION (MODO PANTALLA).

Las transiciones del grafcet **CONFIGURACION** son:

- T45, condición para iniciar la configuración: al activarse P26 (Figura 62).
- T46, T47, condición para elegir el motor 1 o el motor 2: pulsadores **CONF_M1** y **CONF_M2** (Figura 21).
- T48, T49, configuración realizada: pulsadores **M1_CONF** y **M2_CONF** (Figura 21).
- T50, T51, T52: condiciones siempre verdaderas.
- T53, condición para salir de este modo: pulsador **SALIR_CONF** (Figura 21).

MODO RUN, mediante la pantalla.

Debido a que el funcionamiento de este modo es muy parecido al MODO BOTONERA, su programación se detallara en el ANEXO 1. Las diferencias con el MODO BOTONERA son: los motores se activan mediante la pantalla y la referencia de velocidad se elige a través de la misma.

En la siguiente figura (Figura 64) se muestra el **GRAFCET POSICIONAMIENTO**.

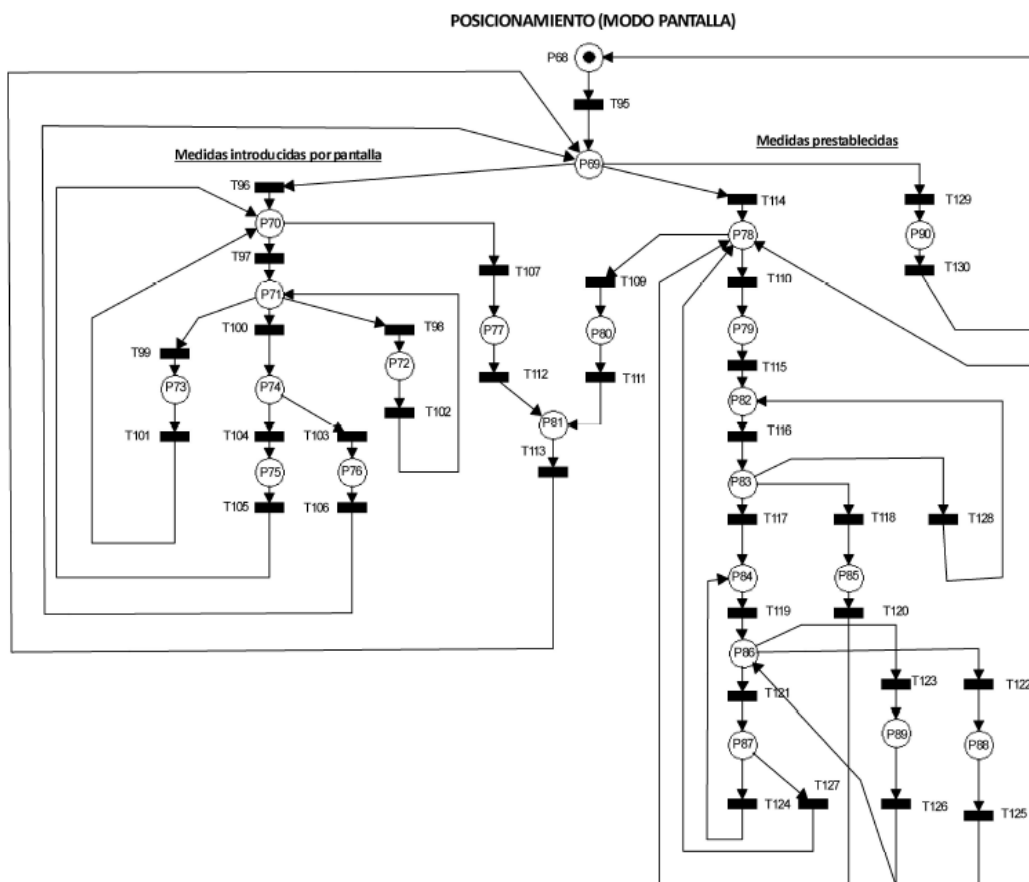


Figura 64. GRAFCET POSICIONAMIENTO (MODO PANTALLA).

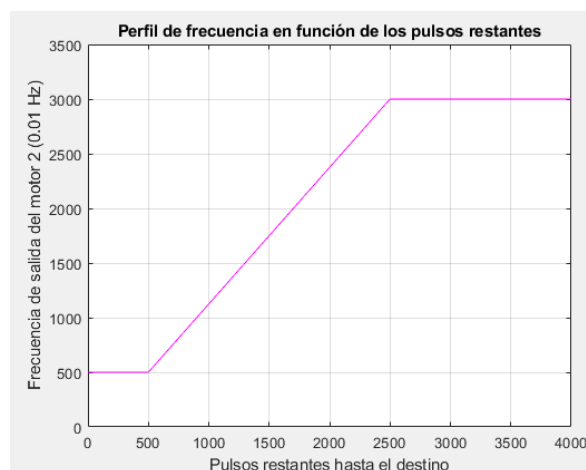


Figura 65. Perfil de la frecuencia de salida en el modo POSICIONAMIENTO (variador OMRON).

Aparte del funcionamiento explicado a continuación, se van anular las dos rampas del variador OMRON MX2, la rampa de aceleración y deceleración. El autómatas va a ser el encargado de controlar las dos rampas. Se define un perfil de frecuencia que depende de los pulsos restantes hasta el destino. El autómatas comprueba constantemente si la frecuencia del variador es la del perfil, en caso contrario aumenta esta un salto (valor predeterminado). Si la suma de la frecuencia actual y el salto es mayor que

la del perfil, la frecuencia de salida del variador pasa a ser la del perfil. En caso contrario se sumará un salto a la frecuencia actual. (Figura 65).

Los lugares del graficet **POSICIONAMIENTO** (Figura 64) son:

- P66: posición inicial.
- P69: espera una elección; medidas introducidas por pantalla o medidas preestablecidas (Figura 26).
- P70: espera la validación de la medida (Figura 27).
- P71: posicionamiento iniciado (Figura 28).
- P72: posicionamiento pausado (Figura 28).
- P73: posicionamiento cancelado (Figura 28).
- P74: fin del posicionamiento (Figura 28).
- P75: realizar la siguiente tarea, se activa el motor 1.
- P76: parada de emergencia.
- P77, P80: volver a la pantalla anterior, de elección (Figura 26).
- P78, P79: medidas preestablecidas seleccionadas (Figura 29).
- P82: se eligen las medidas entre las existentes (Figura 30).
- P83: se decide entre elegir otra medida, posicionar o volver un paso atrás (Figura 31).
- P85: se vuelve un paso atrás, pantalla de posicionamiento mediante medidas preestablecidas (Figura 29).
- P84: se saca una medida del registro, la que está en la primera posición; se iniciará el proceso de posicionar.
- P86: posicionando (Figura 32).
- P87: fin posicionamiento (Figura 32).
- P89: pausar el posicionamiento.
- P88: cancelar el posicionamiento.
- P90: volver atrás a la pantalla de elección entre el tipo de medidas (Figura 26).

Las transiciones del graficet **POSICIONAMIENTO** (Figura 64) son:

- T95, condición de disparo para iniciar el graficet: al activarse P28 (Figura 62).
- T96, conducción para la elección del posicionamiento mediante medidas introducidas: pulsador **INTRODUCIR_MEDIDA** (Figura 26).
- T97, condición para validar la medida introducida por pantalla: pulsador **VALIDAR** (Figura 27).
- T98, condición para pausar el posicionamiento: pulsador **PAUSAR** (Figura 28).
- T99, condición para cancelar el posicionamiento: pulsador **CANCELAR** (Figura 28).
- T101: siempre verdadera.
- T102, condición para volver a reanudar el posicionamiento pausado: pulsador **REANUDAR** (Figura 28).
- T104: condición de que se ha llegado a la medida deseada.
- T105: condición para parar el motor 2.
- T103: si se ha activado la parada de emergencia.
- T107: condición si se desea volver a la pantalla de elección de medidas (Figura 26), pulsador **ATRÁS_A_PSCINMTO** (Figura 28).
- T112, T111, T113: siempre verdaderas.

- T114, condición para el posicionamiento mediante medidas preestablecidas: pulsador **MEDIDAS_PRESTABLECIDAS** (Figura 26).
- T110, condición para empezar con este tipo de posicionamiento: pulsador **EMPEZAR** (Figura 27).
- T109, condición para volver atrás a la elección del tipo de posicionamiento (Figura 26): pulsador **ATRÁS_a_POSI** (Figura 27).
- T115: siempre verdadero.
- T116, condición para almacenar en el registro de medidas la elegida: pulsador **CONTINUAR** (Figura 30).
- T117, condición para empezar con el posicionamiento: pulsador **POSICIONAR** (Figura 31).
- T118, condición para volver atrás a la pantalla de posicionamiento mediante medidas prefijadas: pulsador **INICIO_POSI** (Figura 31) o si el registro de almacenamiento está lleno.
- T128, condición para volver a elegir otra medida: pulsador **OTRA_MEDIDA** (Figura 31).
- T119: siempre verdadero.
- T121, condición de fin del posicionamiento.
- T124, condición para realizar otro posicionamiento: si quedan medidas almacenadas en el registro.
- T127, condición para no realizar otro posicionamiento: no quedan medidas almacenadas en el registro.
- T123, condición para pausar el posicionamiento: pulsador **PAUSAR** (Figura 32).
- T126, condición para reanudar el posicionamiento pausado: pulsador **REANUDAR** (Figura 32).
- T122, condición para cancelar el posicionamiento: pulsador **CANCELAR** (Figura 32) o la activación de una parada de emergencia.

6 Conclusiones y trabajo futuro.

Este apartado está dedicado a las conclusiones sacadas de la realización de este trabajo y a posibles ideas de trabajo futuro.

6.1 Conclusiones.

Conclusiones generales.

Una de las primeras conclusiones es que hay que tener una visión global de la aplicación: hay que definir muy bien su funcionalidad, qué es lo que debe hacer y qué se le puede añadir en un futuro. También es importante prever las limitaciones físicas que puedan existir. Además, hay que establecer qué dispositivos se necesitan para la aplicación: autómatas, sensores, actuadores, etc. Si ya se dispone de componentes, hay que conocer sus especificaciones; de esta manera se puede determinar si son compatibles entre ellos. Si no se dispone de estos, hay que comparar alternativas en base a requerimientos técnicos, pero también económicos (factor muy importante). También hay que determinar cómo van a interactuar los dispositivos entre ellos: de manera directa o mediante algún protocolo de comunicación industrial. Si es a través de un protocolo de comunicación hay que tener en cuenta el retardo que existe en este tipo de protocolos, y determinar si son asumibles por la aplicación.

Dificultades encontradas a lo largo del trabajo.

Desde el inicio se intuía que iba a ser un trabajo lleno de dificultades, dado que no se había trabajado con dispositivos como los variadores o la pantalla HMI. Se tenía que programar la pantalla mediante su propio

entorno de desarrollo, Vijeo Designer. También se tenían que programar los variadores, con la dificultad añadida de tener dos variadores de distintos fabricantes (Schneider y Omron9). Además, no se conocía en profundidad el funcionamiento del protocolo de comunicación utilizado, Modbus/RTU.

Para ello el trabajo se dividió en partes, de esta manera se fueron sorteando las diferentes dificultades: había que trabajar con los dispositivos de forma individual y escalonada.

El inicio de todo fue comunicar la pantalla HMI con el autómatas. Se optó por el protocolo Modbus/TCP, pero después de una semana de intentos fallidos se cambió a Modbus Slave. Esta fue una de las principales dificultades superada.

El siguiente paso era hacer funcionar el conjunto autómatas, pantalla HMI y el variador Schneider ATV 320 con su respectivo motor (motor 1). Se fue desarrollando una aplicación simple en la que se perseguía: mover el motor 1, leer parámetros del variador ATV 320, mostrar por pantalla dichos parámetros y cambiar parámetros dentro del variador. Solo después de haber realizado todo lo anterior se pasó al desarrollo de la aplicación final, pero dejando todo preparado para la introducción del otro variador en la misma.

Una vez que se tenía el variador Schneider trabajando correctamente, se añadió el variador OMRON MX2 a la aplicación. Igual que en el caso anterior se desarrolló una aplicación aparte, sólo el autómatas y el variador OMRON MX2. Aquí apareció otro de los problemas, no se conseguía que se comunicaran entre ellos. Primero se habían configurado erróneamente los parámetros del protocolo de comunicación, se volvió a repasar y se solucionó. No obstante, seguía sin funcionar, debido a que a la hora de escribir en las direcciones del variador se hacía también de forma errónea. Se había pasado por alto el detalle que, a la hora de escribir en la memoria del variador se tenía que aplicar un offset de -1. Por ejemplo, si se quería escribir en la bobina 1 del variador, esta bobina era la bobina 0 en el autómatas. Solo después de solventar estos y otros problemas, se incorporó el variador OMRON MX2 a la aplicación.

Conocimientos empleados y adquiridos.

Una vez terminado el trabajo, y haciendo un balance de todos los conocimientos empleados se llega a comprender porque a lo largo de la carrera se estudian varias de las asignaturas. Por ejemplo, para esta simple aplicación se necesitan conocimientos de electrónica analógica y digital, programación, automatización industrial, electrotecnia, señales, ingeniería de control, dibujo técnico, etc. En aplicaciones reales, de una complejidad mayor, se necesitarán conocimientos de robótica, visión por computador y conocimientos de redes informáticas. Como conclusión de todo lo anterior, he podido constatar que la ingeniería es un universo infinito, donde los conocimientos se tienen que adquirir de forma continua; nunca se para de aprender. Un ingeniero más allá de sus conocimientos teóricos tiene que encontrar soluciones; la mayoría de las veces no hay una fórmula existente que, de la solución, hay que innovar para encontrarla.

Una de las cosas más importantes es que, a lo largo de la realización de este TFG, he seguido aprendiendo. En concreto, he aprendido a programar los variadores y a programar una pantalla HMI. También he profundizado en los protocolos de comunicación.

6.2 Trabajo futuro.

El trabajo futuro que se pueda llevar a cabo está estrechamente ligado al material disponible. Se podría diseñar una cinta o varias cintas transportadoras, con sus respectivos sensores, y de esta manera simular un proceso industrial real. Incluso se podrían utilizar los robots de la Escuela, enlazando estos con el autómatas.

Otra posibilidad sería conectar el autómatas con un microcontrolador (por ejemplo, del tipo Arduino) a la red y controlar los dos de forma remota. También se podría añadir una cámara al microcontrolador y detectar objetos sobre una cinta transportadora. He mencionado el microcontrolador Arduino ya que hay una librería para la comunicación Modbus; aparte de que es muy económico. Por supuesto, otros microcontroladores también podrían ser válidos.

Otro trabajo posible sería utilizar la regulación en bucle cerrado de los variadores para controlar la velocidad. Los dos variadores están provistos de un control PID (Proporcional Integral y Derivativo).

7 Listado bibliográfico.

- Martín, Juan Carlos, and María Pilar García. 2009. *Automatismos Industriales Electricidad y Electronica*. Editorial Editex, S.A.
- Modbus Organizacion. 2021. "Pagina Oficial Modbus." Retrieved May 26, 2021 (<https://www.modbus.org/>).
- Modicon, Inc. 1996. "Modicon Modbus Protocol Reference Guide Modicon Modbus Protocol Reference Guide."
- Mora, Fraile Jesus. 2008. *MÁQUINAS ELÉCTRICAS Sexta Edición*. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S.A.U.
- Omron. 2009. "Manual Del Variador MX2." 432.
- OMRON. 2021. "Pagina Oficial OMRON, Encoders." Retrieved May 14, 2021 (<https://industrial.omron.es/es/products/rotary-encoders>).
- OMRON INDUSTRIAL. 2021a. "Pagina Oficial OMRON, Variador MX2." 2021. Retrieved May 11, 2021 (<https://industrial.omron.es/es/products/mx2>).
- OMRON INDUSTRIAL. 2021b. "Pagina Web Encoder E6B2-CWZ5B." Retrieved May 24, 2021 (<https://www.ia.omron.com/product/item/2441/>).
- RS-ONLINE. 2021. "ABE-TES160." Retrieved June 2, 2021 (<https://es.rs-online.com/web/p/accesorios-para-controladores-y-automatas/6086117/>).
- Schneider Electric. 2020a. "INICIO RAPIDO ATV320."
- Schneider Electric. 2020b. "Manual Programación ATV320."
- Schneider Electric. 2021a. "Pagina Oficial Schneider, Modicon M221." Retrieved May 14, 2021 (<https://www.se.com/es/es/product/TM221CE24R/%22controlador-m221-c--ethernet-24-es-de-tipo-relé%22/?range=62128-modicon-m221&node=12692209051-controladores-lógicos&selected-node-id=12692210272&filter=business-1-automatización-y-control-industrial&parent-su>).
- Schneider Electric. 2021b. "Pagina Oficial Schneider,Pantalla HMI." Retrieved May 14, 2021 (<https://www.se.com/es/es/product/HMISTU855/%22terminal-hmi-5%2C7%27%27-modular-d22-color-ethernet%22/>).
- Schneider Electric. 2021c. "Pagina Oficial Schneider Electric, ALTIVAR ATV320." Retrieved May 10, 2021 (<https://www.se.com/es/es/product/ATV320U30N4B/%22variador-de-velocidad-atv320-3kw-380...500v-3-fase-tipo-libro%22/>).
- SchneiderElectric. 2019. "Modicon M221, Manual de Referencia." *Logic Controller Programming Guide*.

