



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

TRABAJO FIN DE GRADO

INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

PROYECTO DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL HÍBRIDO DE UN PROCESO INDUSTRIAL

AUTOR: DAVID ABAD RUBIO

TUTOR: VICENTE MASCAROS MATEO

FECHA: Julio de 2018

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor, Vicente, por la ayuda y la amabilidad que me ha prestado durante todo el tiempo que he estado trabajando en el proyecto.

A mis padres por todas las facilidades que me han dado para poder estar hoy presentando este proyecto, a mi pareja por el apoyo durante estos últimos meses de trabajo duros y a toda mi familia, ¡GRACIAS!

RESUMEN

El trabajo consiste en la automatización y el control híbrido de un proceso industrial. En el presente trabajo se desarrollan los programas necesarios para la automatización, mediante PLC, de un proceso industrial. Para ello se ha integrado en un PLC un control híbrido mediante herramientas de automatización de sistemas de eventos discretos y de un control PID de sistemas continuos.

Para la supervisión del proceso se han desarrollado una pantalla de operador.

Para la realización del proyecto se ha utilizado el equipo didáctico FischerTechnik , un autómatas programable de la marca MODICON TSX-Premium Schneider con dos unidades descentralizadas mediante bus CAN, un motor de CC con entrada/salida analógica y los ordenadores disponibles en los laboratorios del departamento DISA de la UPV.

Palabras clave: control híbrido, grafcet, PLC, automatización, control PID.

RESUM

El treball consisteix en l'automatització i el control híbrid de un procés industrial.

En aquest treball es desenvolupen els programes necessaris per a l'automatització, per mitjà de PLC, d'un procés industrial. Per a això s'ha integrat a un PLC un control híbrid mitjançant eines d'automatització de sistemes de events discrets i d'un control PID de sistemes continus.

Per a la supervisió del procés s'ha desenvolupat una pantalla d'operador.

Per a la realització del projecte s'ha utilitzat l'equip didàctic FischerTechnik, un autòmat programable de la marca MODICON TSX-Premium Schneider amb dos unitats descentralitzades mitjançant bus CAN, un motor de CC amb entrada/eixida analògica i els ordinadors disponibles als laboratoris del departament DISA de la UPV.

Paraules claus: control híbrid, graficet, PLC, automatització, control PID.

Contenido

1. MEMORIA.....	12
1.1. Objeto.....	12
1.1.1. Especificaciones de partida.....	12
1.2. Estructura del TFG.....	14
1.3. Marco Teórico.....	15
1.3.1. Definición de automatización.....	15
1.3.2. Historia.....	15
1.3.3. Componentes generales de la automatización.....	17
1.3.4. Los autómatas.....	18
1.3.5. Mecanizado (Piezas).....	19
1.3.6. Tipos de mecanizado.....	19
1.3.7. Variables del mecanizado.....	21
1.3.8. Herramientas de corte.....	21
1.3.9. Fluidos (Refrigerantes).....	22
1.3.10. El mecanizado automático.....	22
1.4. Descripción de procesos.....	24
1.4.1. Maqueta del centro de mecanizado.....	24
1.4.2. Motor CC.....	30
1.4.3. Autómata Programable PLC (Programmable Logic Controller).....	31
1.4.4. UNITY PRO M (Software de programación).....	33
1.5. Aspectos técnicos.....	35
1.5.1. Automatización línea indexada de mecanizado.....	36
1.5.2. Control velocidad del motor del taladrado.....	40
1.5.3. Comunicación del proceso y el motor con el PLC.....	47
1.5.4. Monitorización y control del proceso.....	49
1.6. Conclusiones.....	52
1.7. Bibliografía.....	53
2. PRESUPUESTO.....	57
3. ANEXOS.....	66

MEMORIA DESCRIPTIVA

1. MEMORIA

1.1. Objeto

El presente proyecto es redactado con el objetivo de describir la automatización y el control híbrido de un proceso industrial.

1.1.1. Especificaciones de partida

La automatización de la línea de fabricación está formada por cuatro cintas transportadoras: cinta de alimentación, cinta de fresadora, cinta de taladradora y cinta de salida. A su vez, la maqueta FischerTechnik precisa de dos empujadores, una estación de mecanizado de fresadora y una estación de mecanizado de taladradora.

El funcionamiento de la automatización del proceso es el siguiente: la pieza entra por la cinta de alimentación, cuando llega al final, un empujador desplaza la pieza a la cinta de la fresadora, donde se debe detener, si se precisa, para la realización del proceso de fresado. Después continúa por la cinta de taladrado, donde vuelve a detenerse, en este caso, para la realización del proceso de taladrado y activar a su vez el control de velocidad PID del motor CC. Al llegar al final de la cinta, un último empujador desplaza la pieza hacia la cinta de salida.

Con el objeto de optimizar el sistema, en la línea de mecanizado deben poder coexistir varias piezas de manera simultánea, es decir, no se espera a que una pieza finalice el proceso completo de mecanizado para admitir nuevas piezas en la línea.

Durante el proceso descrito se especifica el tipo de operaciones a realizar en la pieza durante su mecanizado, es decir: taladrado, fresado, ambas o ninguna (decisión del usuario).

Como cualquier proceso industrial en el que pueda haber problemas, tanto de acabado como de seguridad personal y de la planta industrial, se dotará el sistema con una parada de emergencia debidamente implementada.

Para el gobierno de la planta se ha implantado una pantalla de operador que hará que el operario pueda interactuar en cualquier momento con el sistema. Esta pantalla incorpora los siguientes elementos:

- Esquema de la planta, donde se observa el estado de cada sensor y de cada actuador (cintas, empujadores y máquinas).
- Visualizador de la velocidad real del motor y la velocidad de referencia.
- Contador para visualizar cuántas piezas de cada tipo se han fabricado en cada uno de los centros de mecanizado y para la contabilidad del número de piezas totales que han pasado por la línea de mecanizado, con reset para inicializar en cualquier momento el conteo.
- Visualizador del estado de cada uno de los sensores y actuadores de la planta.

Durante el funcionamiento del control PID, la velocidad de referencia se puede ajustar desde la pantalla de operador. Por ejemplo:

- 1000 rpm durante 5 segundos.
- 1500 rpm durante 3 segundos.
- 1200 rpm durante 4 segundos.

Como todas las entradas y salidas del sistema son de tipo booleano se ha realizado la automatización mediante el empleo de un PLC (**MODICON TSX-Premium Schneider**). La utilización de este tipo de dispositivos hace que la comunicación con el proceso sea más sencilla y rápida que con cualquier otro sistema electrónico.

Dicho autómatas se ha implementado mediante la principal herramienta de automatización: el GRAFCET. Esta herramienta permite la activación y desactivación de los actuadores en función de la señal recibida a través del estado de los sensores del proceso. Está basado en un modelo de etapas que activan las acciones propias de cada una de ellas hasta que se cumpla la transición que separa una etapa de otra.

Los diferentes procesos han sido diseñados mediante el software de programación **Unity Pro M**. Mediante este programa de automatización se crean los Grafcets correspondientes programando las acciones y las señales de cada etapa o transición, añadir funciones que son útiles para la automatización del proceso y mediante el cuál también se crea la pantalla de visualización e interacción entre el usuario y el proceso, donde se incluyen todas las facilidades para el control del proceso, los diferentes botones de control, parada de emergencia, etc.

1.2. Estructura del TFG

Este punto del trabajo o proyecto complementa al índice, donde se hace una breve descripción de los diferentes apartados de los que está compuesto el trabajo o proyecto.

El presente trabajo consta de tres documentos principales que son: la memoria descriptiva, el presupuesto y los anexos. (No se incluyen planos, puesto que no son necesarios)

La **memoria descriptiva** trata los diferentes aspectos técnicos y teóricos necesarios para la implementación y comprensión correcta del proyecto. Dentro de la memoria se encuentran diferentes subapartados como son:

INTRODUCCIÓN: En este apartado se hace una pequeña explicación, muy breve, del trabajo o proyecto que se expone, realizando una declaración de intenciones de los resultados que se esperan obtener y argumentando la necesidad de la implementación y puesta en marcha del mismo.

ASPECTOS TÉCNICOS: En este documento se describe con precisión los diferentes pasos llevados a cabo para lograr el fin del proyecto o trabajo que ha sido planteado. Es el documento o la parte más importante del trabajo, donde se trata el problema desde un punto de vista más técnico y profesional.

Dentro de este punto se detalla la programación del automatismo que sirve como manual para el usuario que necesite controlar el proceso y la programación del controlador PID necesario para el control del motor CC.

CONCLUSIONES: En este apartado se hace una pequeña aclaración sobre el uso o las posibilidades que podría tener el proyecto dentro de su ámbito de trabajo y las alternativas que se le podrían dar en un futuro.

BIBLIOGRAFÍA: Documento en el que se incluyen las fuentes de información utilizadas para la realización del trabajo.

Otro de los documentos es **el presupuesto**, donde se detalla el desglose del coste de cada una de las partes que componen el proyecto, incluidos materiales, mano de obra, etc.

Por último, no por ello menos importante, **los anexos**, en los cuales se detallan los Graficets utilizados para la programación de cada uno de los procesos llevados a cabo en el proyecto y otros aspectos importantes de la programación como contadores, temporizadores, etc.

1.3. Marco Teórico

Antes de entrar de lleno en la programación del proceso, se hará una introducción teórica donde se repasa la funcionalidad y la progresiva necesidad de automatizar los procesos industriales, se explicarán los valores que tiene el uso de la automática en una cadena de producción de un centro de mecanizado de piezas, con sus respectivos avances a través de la historia.

1.3.1. Definición de automatización

¿Qué es la automatización? La Automatización Industrial es la aplicación de diferentes tecnologías para controlar y monitorear un proceso, maquina, aparato o dispositivo que por lo regular cumple funciones o tareas repetitivas, haciendo que opere automáticamente, reduciendo al mínimo la intervención humana.

Lo que se busca con la Automatización industrial es generar la mayor cantidad de producto, en el menor tiempo de operación posible, con el fin de reducir los costes y garantizar una uniformidad en la calidad de los productos del proceso, dando una mayor fiabilidad para la empresa en la que se implementa y reduciendo de forma considerable los fallos y defectos en las piezas o partes involucradas en el proceso.

1.3.2. Historia

De la misma manera que la mayoría de la tecnología moderna, la automatización es fruto de la revolución industrial.

La palabra autómatas, se aplica desde tiempos muy antiguos a la clase de máquinas en las que una fuente de energía acciona un mecanismo que permite imitar los movimientos de cualquier ser animado: animal, persona, etc.

Uno de los primeros “inventos” que se pueden considerar autómatas son las estatuas animadas del templo de Dédalo. En la antigua Grecia, y más tarde los romanos, ya conocían varios tipos de juguetes mecánicos. Algunos famosos autómatas fueron construidos en la edad media por Alberto Magno o Regiomontano.

Evidentemente, los autómatas han ido evolucionando a lo largo de la historia, donde se destaca:

1750: Comienza la revolución industrial. Surgen las primeras máquinas de tejido controladas por tarjetas perforadas.



Figura 1

1850: Primera máquina siderúrgica para corte de metales.

1863: Primer piano automático, creado por M. Fourneaux.

1870: Se diseña el primer torno automático a manos de Christopher Spencer.

1940: Aparecen los primeros controles neumáticos, hidráulicos y electrónicos en máquinas de corte.

1947: La idea original: los físicos británicos John Bardeen, Walter Brattain y William Shokkley desarrollan el primer transistor en los laboratorios de Bell. Heinrich Grünebaum desarrolló el motor Alquist, que se convirtió en el padrino de los motores controlados. Revolucionó los procesos de rebobinado en muchos años (60) de tecnología de automatización.

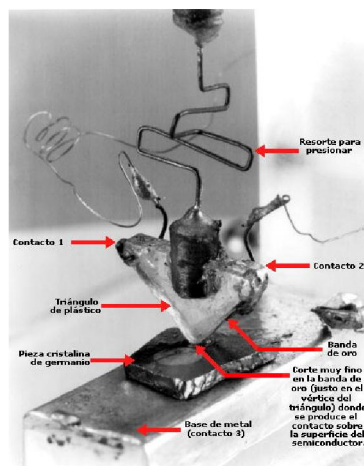


Figura 2

1959: Primera herramienta de maquinado controlada por computador. El primer controlador Simatic en un torno *capstan* fue presentado en la sexta versión de la feria EMO de París. La lógica todavía era por cableado.

1967: Antes de la electrónica de potencia: Antes de que los diodos, tiristores y los IGBT's estuvieran disponibles, las corrientes eran rectificadas con rectificadores de selenio, o con rectificadores de arco de mercurio gigantes emitiendo luz azul misterioso.

Las unidades electrónicas. En 1967 AMK presentó el primer motor de corriente de jaula de ardilla de tres fases infinitamente variable de producción masiva. Ocho años después otra innovación de AMK permitió que varios motores de tres fases fueran operados con sincronismos angulares por primera vez.

1968: PLC: La exitosa historia del PLC empezó con el Control Industrial Modular de Dick Morley.

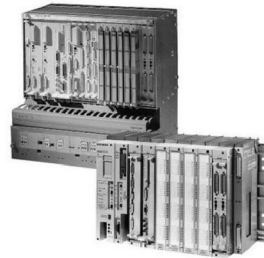


Figura 3

1978: A nivel de máquinas: dispositivos de programación de la era pre-PC eran muy grandes y pesados. La programación CNC a nivel de máquinas – una vez más introducido por AMK – representó un proceso notable.

1987: Comienza la era de los PC en la industria de la automatización.

1997: Empuje de integración: la tecnología de automatización consiste cada vez más en un control descentralizado e inteligente y con componentes de control que se puedan comunicar con otros mediante Ethernet industrial.

2004: La funcionalidad del PLC fue descubierta en un chip.



Figura 4

1.3.3. Componentes generales de la automatización

Para el correcto funcionamiento de una instalación de automatización industrial son necesarios una serie de componentes que están interrelacionados unos con otros:

- Máquinas o mecanismos: elementos mecánicos que son los encargados de llevar a cabo el proceso al que es sometido el producto.
- Accionadores o actuadores: son los elementos finales de control que actúan sobre la variable o elemento final del proceso en respuesta a la señal que recibe. Son los

encargados de participar en la realización física de la tarea que realicen. Los hay de varios grupos:

- Hidráulicos: Son los movidos por un fluido incomprensible. Mayor capacidad de esfuerzos y fácil regulación.
 - Neumáticos: Son los accionados por aire comprimido previamente en un compresor y enviado a los pistones o cilindros.
 - Eléctricos: Son actualmente los más utilizados debido a que la energía que consumen se obtiene de forma sencilla y económica, presentan buenas prestaciones de par y de velocidad y son pequeños y fáciles de regular.
- Preaccionadores: son elementos que permiten la amplificación y/o conversión de la señal de control proporcionada por el controlador para el gobierno de la instalación. Por ejemplo: contactores, variadores de velocidad, switches, transistores, etc.
 - Captadores: son las partes del proceso que obtienen la información del estado del proceso mediante sensores y transmisores.
 - Interfaz usuario-proceso: elementos del proceso para la comunicación entre el hombre y la máquina. Pulsadores, teclados, pantallas de usuario, etc.
 - Unidad de control: Es el elemento considerado como el más importante del proceso, puesto que en ella se encuentra el microcontrolador que lee y ejecuta el programa de usuario, además de realizar la gestión de toda la comunicación entre los componentes que conforman el PLC. Tienen dos partes:
 - Mando: es la estación central de control, el autómeta. Se encarga de la supervisión, manejo, comunicación... etc.
 - Parte operativa: Se encarga de actuar sobre la máquina.

1.3.4. Los autómetas

A lo largo de la historia se han creado diferentes máquinas que se pueden llamar autómetas, puesto que eran máquinas que imitaban la figura y los movimientos de un ser animado, ya sea animal o persona.

Un autómeta es una máquina automática programable capaz de realizar determinadas operaciones de manera autónoma, es decir, sin ayuda del ser humano, sustituyendo así a los seres humanos en algunas tareas, en especial las tareas que pueden ser pesadas o incluso peligrosas, repetitivas, etc. Son máquinas normalmente dotadas de sensores y actuadores que le permiten estar en contacto constante entre el trabajo a realizar y el ordenador que lo gobierna.

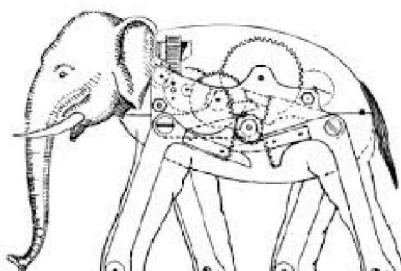


Figura 5



Figura 6

1.3.5. Mecanizado (Piezas)

El mecanizado de piezas se define como el conjunto de operaciones necesarias para modificar las características de la materia prima, ya sea la forma, la estética o el tamaño principalmente.

Los procesos de mecanizado pueden ser de dos tipos, por arranque de viruta o por abrasión. En nuestro caso se va a utilizar del tipo de arranque de viruta, siendo los más usados:

- **Fresado**
- **Taladrado**
- Cepillado
- Torneado
- Aserrado
- Esmerilado
- Serrado
- Limado
- Roscado
- Brochado

En el presente trabajo se utilizan los métodos de fresado y el taladrado, elementos que están incluidos en la maqueta de FischerTechnik.

1.3.6. Tipos de mecanizado

El mecanizado de una pieza puede clasificarse de dos formas distintas: según la forma de eliminación del material (por arranque de viruta o por abrasión) y según el método empleado para la eliminación del material (con máquina herramienta o manual).

- Clasificación según la forma de eliminar el material:

Por arranque de viruta: En este proceso, la herramienta de corte penetra en la pieza, realizando un movimiento relativo entre la pieza a mecanizar y la herramienta. Para la correcta realización, el material de la herramienta tiene que ser de mayor dureza que el de la pieza a mecanizar.

El arranque de viruta se produce debido a que el filo de la herramienta produce una deformación elástica en el material, lo que provoca grandes tensiones en la parte del mismo que se convertirá en viruta.

Los principales movimientos que se realizan en el mecanizado por arranque de viruta son:

- Corte: causante de producir la viruta.
- Avance: se desplaza el punto de aplicación del corte.
- Alimentación: es el parámetro de profundidad de pasada, el encargado de cortar un espesor específico del material.

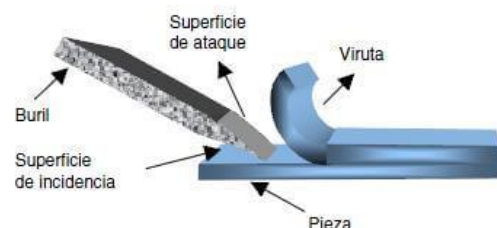


Figura 7

Por abrasión: El mecanizado por abrasión consiste en la remoción de material, desgastando la pieza en cantidades mínimas (del orden de 10^{-6} m) desprendiendo partículas de material, en muchos casos ese material es incandescente.

En este proceso se utilizan herramientas como la muela abrasiva y una herramienta llamada esmeril.

Esta herramienta está constituida por partículas de un material abrasivo muy duro unido por aglutinantes.



Figura 8

➤ Clasificación según los elementos empleados para la eliminación de material:

Mecanizado manual: En este procedimiento es una persona quien con destreza, su fuerza y una herramienta mecaniza una pieza en concreto.

Las herramientas más comunes en este tipo de mecanizado son el cincel o buril, la sega, la lima, lijas, etc.



Figura 9

Mecanizado con máquina herramienta: En este caso la herramienta utilizada para el mecanizado está incluida en una máquina semiautomática o automática, operadas manualmente o mediante control automático. Su característica principal es la falta de movilidad, ya que suelen ser máquinas estacionarias. Éstas pueden eliminar parte del material por arranque de viruta, por estampado, corte o electroerosión.

El desarrollo del proyecto se llevará a cabo con este tipo de mecanizado.

Como máquinas-herramienta a destacar están:

- **Taladro** (Utilizado en el TFG)
- **Fresadora** (Utilizado en el TFG)
- **Torno**
- **Limadora**
- **Rectificadora**

- **Mortajadora**
- **Mandrinadora**
- **Brochadora**
- ... etc

1.3.7. Variables del mecanizado

En un proceso de mecanizado intervienen diferentes variables a tener en cuenta para llevar a cabo un proceso correctamente. Entre las más importantes destacan:

- **Velocidad de corte:** Velocidad relativa instantánea con la que una herramienta se enfrenta al material para ser eliminado, es decir, la velocidad del movimiento de corte. Se expresa en m/min.
Esta velocidad depende principalmente del material a mecanizar, el material empleado en la herramienta y las características de la máquina a utilizar.
- **Avance:** Es la velocidad relativa entre la pieza a mecanizar y la herramienta, sin considerar la velocidad de corte. Se expresa principalmente en mm/min.
- **Profundidad de corte:** profundidad de la capa arrancada de la superficie de una pieza en una pasada de la herramienta. Se mide en mm en sentido perpendicular.

1.3.8. Herramientas de corte

Las herramientas de corte son los elementos que se utilizan para extraer material de una pieza cuando se lleva a cabo el proceso de mecanizado. Éstas pueden formar parte de la máquina herramienta o pueden ser de carácter manual.

Hay diferentes tipos de herramientas en función de su uso, es decir, cada herramienta se utiliza únicamente para la realización de un tipo de mecanizado y a su vez, cada una de ellas es de un material específico que debe ser elegido de manera adecuada para cada proceso.

Las herramientas de corte más utilizadas son:

- Broca
- Fresa
- Sierra
- Cuchilla
- Lima
- Escariadores
- Herramientas de torneó
- Machos de enroscar
- ... etc



Figura 10

1.3.9. Fluidos (Refrigerantes)

El suministro de refrigerante es muy importante para obtener un buen rendimiento en operaciones de taladrado, fresado, tornos automáticos, roscadores, etc , no pudiendo dejar al lado el calor que se genera al cortar el material, evitando así que se eleve la temperatura a fin de facilitar la operación de mecanizado.

Los fluidos de corte son líquidos especiales que se emplean proyectándose o aplicándose por medio de mangueras directamente al punto de contacto entre la herramienta de corte y el material.



Figura 11

1.3.10. El mecanizado automático

El mecanizado y la automatización van de la mano, juntos tienen un papel en la industria de hoy en día muy importante.

En un mundo tan acelerado como el de hoy en día, es importante para las empresas ofrecer a los clientes unos resultados óptimos y en el tiempo adecuado, por lo que todas las empresas se esfuerzan por ser más productivas y reducir costes. La solución es la **automatización de los procesos de mecanizado**.

La máquina herramientas más conocida es la **Máquina CNC**, que son herramientas capaces de realizar múltiples operaciones sobre una pieza, utilizando herramientas de múltiples filos de corte y con la mínima intervención del ser humano durante el proceso de mecanizado de la pieza, aumentando así la producción, flexibilidad, y precisión y seguridad para el trabajador.



Figura 12

Entre el elevado número de ventajas que tiene la automatización de un proceso de mecanizado se pueden resaltar los siguientes:

- **MEJORA DE LA PRECISIÓN**

Puesto que las máquinas automatizadas de mecanizado funcionan a partir de programas de ordenador, ofrecen una mayor precisión comparándolas con las máquinas de mecanizado convencionales. Además, los procesos se terminan antes y disminuye considerablemente el número de errores, dando lugar a una mejora global de la producción.

- **SEGURIDAD**

Al ejecutarse las órdenes a través de un software, los trabajadores no están en contacto directo ni expuestos a las herramientas de corte, lo que hace que estén exentos de peligro y seguros en su área de trabajo.

- **ALTA PRECISIÓN DEL PROCESO**

El software de una máquina automatizada de mecanizado incorpora CAD (Computer Aided Design) y las operaciones CAM (Computer Aided Manufacturing), capaces de realizar el mismo proceso una y otra vez obteniendo siempre el mismo nivel de perfección.

- **REDUCCIÓN DE RESIDUOS**

Este tipo de máquinas están diseñadas con un sistema de gestión de virutas y residuos procedentes de la mecanización de la pieza. La retirada automática de estos residuos produce un espacio de trabajo limpio y seguro.

- **REDUCCIÓN DE LA IMPLICACIÓN DEL OPERARIO**

Con la incorporación de estas máquinas se pueden realizar las operaciones más complejas en poco tiempo sin la intervención de un operario de la máquina o un ingeniero.

Esto reduce considerablemente los costes de incorporación y formación de operarios y también reduce el número de errores o fallos humanos y, por supuesto, accidentes que podrían ocurrir en un proceso tradicional.

Una sola persona es capaz de desarrollar, programar y supervisar varias máquinas automáticas a la vez.

- **EJECUCIÓN DE PROCESOS COMPLEJOS**

Las máquinas automatizadas pueden ejecutar procesos muy complejos que requerirían un gran esfuerzo y mucho tiempo en el caso de hacerse de la manera tradicional.

1.4. Descripción de procesos

A la hora de describir la automatización de un proceso se tienen en cuenta dos elementos fundamentales: los elementos electromecánicos que actúan sobre las piezas o productos a automatizar y el sistema computarizado programado que gobierna el proceso.

Para la automatización de un proceso es necesario definir una serie de acciones que la máquina deberá realizar, este tipo de acciones son las salidas del proceso, las cuales serán gobernadas por una serie de cambios que se efectuarán en el proceso y dependerán del estado en que se encuentre su entorno. Estos cambios de estado son las entradas.

Para poder adquirir información sobre estos cambios de estado se necesitan una serie de elementos que recojan en todo momento datos que puedan ser interpretados por el programa del computador, estos elementos son los sensores.

Para la realización del presente proyecto se ha utilizado una maqueta del proceso, en la cual se encuentran integrados tanto los sensores como los actuadores anteriormente nombrados para llevar a cabo el control del proceso.

La maqueta que se utiliza es de la marca **FISCHERTECHNIK**, una marca que se dedica a la producción de juegos de construcción enfocados a la educación y desarrollo de soportes con mecanismos automatizados, como es nuestro caso.

Las maquetas de esta marca tratan de un sistema constructivo y modular formado por una serie de elementos que simulan los elementos de máquinas lo más aproximado posible a la realidad. La maqueta es un centro de mecanizado en el que se introduce una pieza en la estación de alimentación y posteriormente es desplazada mediante una serie de cintas transportadoras, pasando por dos tipos de mecanizado, fresado y taladrado, para una posterior expulsión de la pieza al final del proceso.

Además de la maqueta, se ha utilizado un motor de CC con entrada/salida analógica que se controlará mediante un control PID; este motor simulará la velocidad del taladro elegida por el usuario mediante la pantalla de operador.

1.4.1. Maqueta del centro de mecanizado

La maqueta es la parte principal del proceso que se desarrolla en este proyecto, ya que todo el proyecto se basa en la implementación del control híbrido de “una línea indexada con dos unidades de mecanizado FischerTechnik” y el control PID del motor que simula la operación de taladrado.

La maqueta desplaza las piezas que van a ser mecanizadas a través de cuatro cintas transportadoras y deteniéndose o no en los centros de mecanizado (fresado y taladrado) según desee el usuario que en ese momento esté utilizando la máquina.

La primera cinta es la estación de alimentación, cuya función es la de transportar la pieza a que el usuario ha depositado en el inicio del proceso hacia la segunda y tercera cinta donde se encuentran los centros de mecanizado. El fresado se encuentra a la mitad de la segunda cinta, y solo entrará la pieza a ser fresada en el caso de que sea habilitado para ello. El centro de taladrado se encuentra en la tercera cinta, donde al igual que el centro de mecanizado anterior, se podrá elegir si se quiere taladrar o no la pieza, pero además se ha realizado un control PID para un motor que simula la velocidad con la que se desea taladrar la pieza.

Por último, se encuentra la cuarta cinta que es la encargada de transportar la pieza acabada desde la tercera cinta hasta el final del proceso.

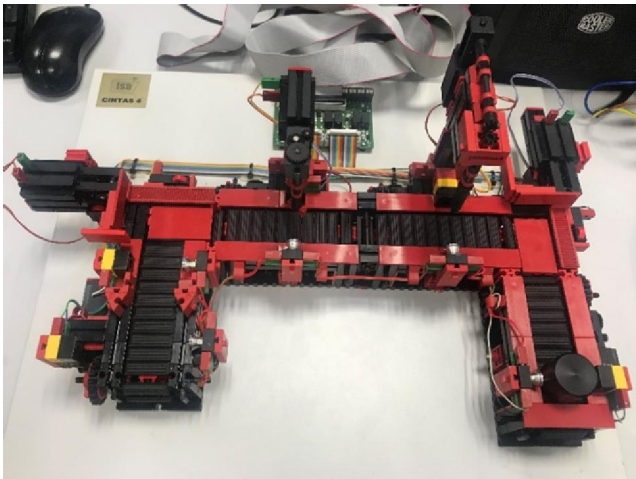


Figura 13

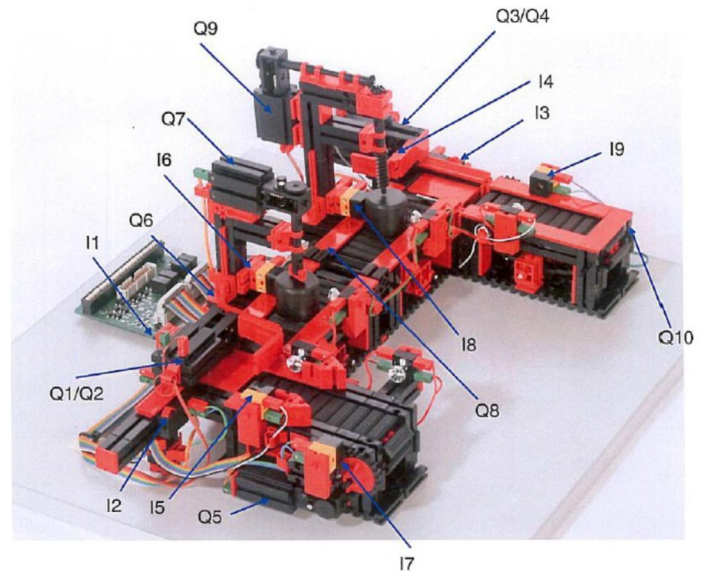


Figura 14

Entrada	Descripción	Dirección M241	Dirección CJ2M	Dirección TSX	Dirección S7-1200
I1	Final de carrera frontal del empujador 1	%IX0.0	000.0	%MW0.0	%I0.0
I2	Final de carrera trasera del empujador 1	%IX0.1	000.1	%MW0.1	%I0.1
I3	Final de carrera frontal del empujador 2	%IX0.2	000.2	%MW0.2	%I0.2
I4	Final de carrera trasera del empujador 2	%IX0.3	000.3	%MW0.3	%I0.3
I5	Fototransistor empujador 1	%IX0.4	000.4	%MW0.4	%I0.4
I6	Fototransistor fresadora	%IX0.5	000.5	%MW0.5	%I0.5
I7	Fototransistor estación de carga	%IX0.6	000.6	%MW0.6	%I0.6
I8	Fototransistor taladradora	%IX0.7	000.7	%MW0.7	%I0.7
I9	Fototransistor cinta transportadora salida	%IX1.0	000.8	%MW3.0	%I1.0

Salida	Descripción	Dirección M241	Dirección CJ2M	Dirección TSX	Dirección S7-1200
Q1	Motor empujador 1 hacia adelante	%QX0.4	001.0	%MW4.2	%Q0.0
Q2	Motor empujador 1 hacia atrás	%QX0.5	001.1	%MW4.3	%Q0.1
Q3	Motor empujador 2 hacia adelante	%QX0.6	001.2	%MW4.4	%Q0.2
Q4	Motor empujador 2 hacia atrás	%QX0.7	001.3	%MW4.5	%Q0.3
Q5	Motor cinta transportadora de alimentación	%QX1.0	001.4	%MW4.6	%Q0.4
Q6	Motor cinta transportadora fresadora	%QX1.1	001.5	%MW4.7	%Q0.5
Q7	Motor fresadora	%QX1.2	001.6	%MW6.2	%Q0.6
Q8	Motor cinta transportadora taladradora	%QX1.3	001.7	%MW6.3	%Q0.7
Q9	Motor taladradora	%QX1.4	001.8	%MW6.4	%Q1.0
Q10	Motor cinta transportadora salida	%QX1.5	001.9	%MW6.5	%Q1.1
Q11	Habilitar sensores y empujadores	%QX1.6	001.10	%MW6.6	Cable3→24v

A continuación, se describe el proceso más detalladamente:

La maqueta dispone de 11 salidas digitales (Q) de corriente continua y 9 entradas digitales (I).

El sistema trabaja con un lenguaje binario, es decir, todo o nada, por lo que tanto las salidas como las entradas son elementos binarios que podrán estar activos o no.

Las salidas se corresponden con 6 motores de sentido único que son los encargados de mover las cuatro cintas transportadoras y los 2 restantes que accionan las herramientas de mecanizado: la fresadora y el taladro. Por otro lado, tenemos 4 motores que permiten el accionamiento de los empujadores en una única dirección, pero de doble sentido. Por último, hay una señal que habilita los sensores de la maqueta para poder iniciar y llevar a cabo el proceso.

Las entradas se corresponden con 5 sensores fototransistores colocados en las cintas y 4 sensores final de carrera para los empujadores de doble sentido.

Definición de cada uno de los elementos de los que consta la maqueta:

- **Sensores fototransistores**

Son sensores sensibles a la luz. Se utilizan encapsulados conjuntamente con un emisor de luz (en nuestro caso una bombilla de pequeño tamaño y baja intensidad), formando un interruptor óptico, que detecta la interrupción del haz de luz por el objeto o la pieza. Cuando la luz incide sobre el sensor genera una señal eléctrica.

Cuando el fototransistor detecta luz, es decir, no hay objeto entre la luz y el sensor, se detectará un 1 lógico, mientras que si hay objeto obstaculizando la luz que incide en el sensor se tendrá un 0 lógico. Este tipo de funcionamiento se denomina lógica negada.

En la maqueta hay 5 sensores fototransistores dispuestos a lo largo de todo el recorrido de la pieza para conocer en cada momento la posición de la o las piezas en nuestro proceso. Están dispuestas en las cintas transportadoras, al inicio de la primera y al final de la cuarta cinta para saber si hay pieza, antes de los fototransistores y justo delante de los elementos de mecanizado.

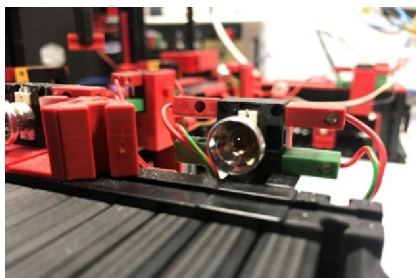


Figura 15

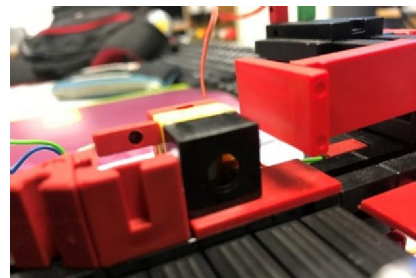


Figura 16

- **Empujadores**

Son los elementos mecánicos encargados de desplazar una pieza de una cinta a otra mediante dos motores de sentidos de avance y retroceso. Estos empujadores funcionan transformando el movimiento circular del motor en movimiento lineal mediante engranajes y una cremallera.

En la maqueta tenemos dos empujadores, uno entre la cinta 1-2 y otro entre las cintas 3-4, ambos debido a que entre sí forman un ángulo de 90 grados que sería imposible de realizar sin este tipo de elementos.

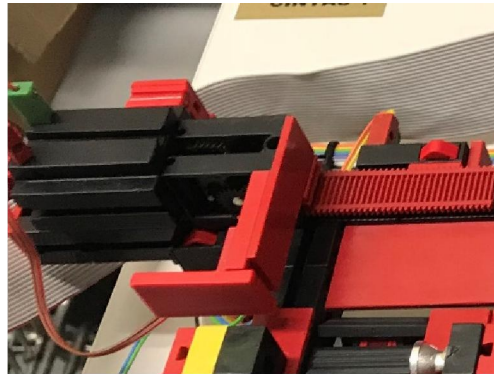


Figura 17

- **Sensores final de carrera**

Son sensores de contacto que están dispuestos al final y al inicio de los empujadores para conocer en cada momento si el empujador se encuentra en su posición final o han regresado a su posición inicial.

Estos sensores son unas pequeñas piezas de plástico que se desplazan hacia abajo cuando el empujador se posiciona encima del sensor, cuando esto ocurre, el sensor proporciona un 1 lógico al controlador.



Figura 18

- **Motor Cinta**

Para el movimiento de las cintas de la maqueta se utilizan motores eléctricos de un solo sentido. Este tipo de motores utiliza el movimiento giratorio del motor para aplicar una fuerza sobre la cremallera de la cinta transportadora.

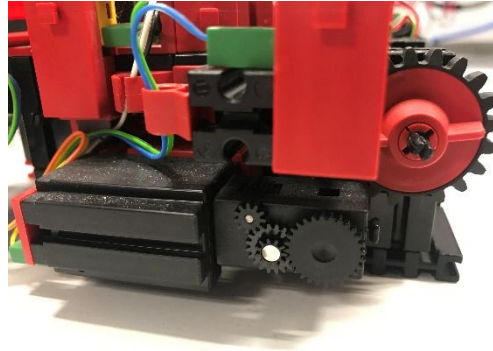


Figura 19

- **Cintas Transportadoras**

Las cintas son las encargadas del transporte de la pieza a lo largo de todo el proceso.

La maqueta consta de cuatro cintas, la primera traslada la pieza desde el inicio de la operación (estación de alimentación) hasta el primer empujador; la segunda recoge la pieza del primer empujador y la lleva hasta la tercera cinta pasando por la fresadora donde podrá ser mecanizada o no, la tercera que recoge la pieza de la segunda y la lleva hasta el segundo empujador pasando por el centro de taladrado. Por último se encuentra la cuarta cinta que recoge la pieza del segundo empujador y la lleva hasta el final del proceso hasta su expulsión.

- **Pieza (Simulada)**

No es más que una pieza de plástico que simula la pieza real del proceso.

La pieza tiene el tamaño y peso adecuado para poder ser detectada por los sensores y transportada a lo largo de todo el proceso sin que quede atascada o pueda dañar parte de la maqueta.

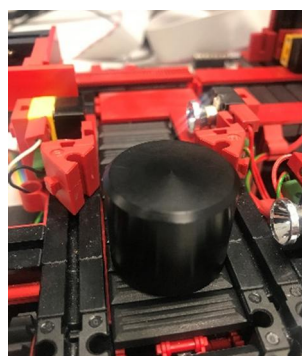


Figura 20

- **Motores Centro Mecanizado**

La maqueta dispone de dos estaciones que simulan dos tipos de mecanizado: fresado y taladrado. Como cualquier máquina de mecanizado necesita de motores para generar el movimiento sobre la pieza a tratar.

El motor del taladro funciona transmitiendo el movimiento de giro a unos engranajes de forma cónica que están conectados a la máquina herramienta. El modo empleado es tan complejo debido a los problemas de situación que se observan en la maqueta, estando el motor en la parte inferior de la maqueta mientras que el taladro se encuentra pendiente desde la parte superior de la maqueta.

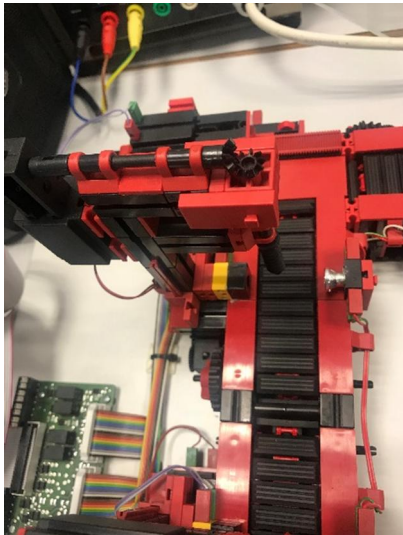


Figura 21

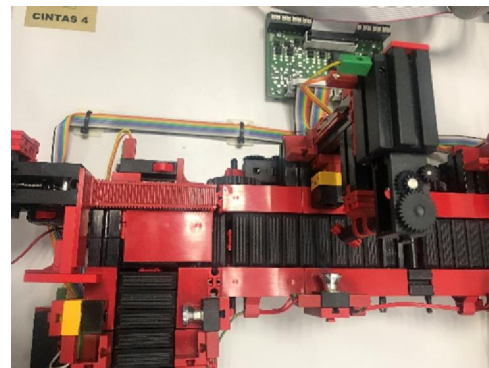


Figura 22

1.4.2. Motor CC

El elemento que se utiliza en el proyecto para simular la velocidad del taladrado es un motor de CC Artitecnic v2.0.



Figura 23

Se trata de un pequeño motor controlado mediante el PLC que gobierna todo el proceso de la automatización de la línea indexada de mecanizado.

El motor es el único elemento del proyecto que es de tipo analógico, lo que hace que su control se deba realizar mediante un control PID. Este control se lleva a cabo gracias a la conexión entre el PLC y el motor mediante una caja de conexiones analógicas del autómata.



Figura 24

1.4.3. Autómata Programable PLC (Programmable Logic Controller)

Un controlador lógico programable (Programmable logic Controller) es una computadora que se usa en la ingeniería automática o en la automatización industrial, para automatizar procesos tales como el control de una línea de mecanizado, como es nuestro caso.

Un PLC es un dispositivo electrónico programable capaz de accionar otros componentes de un proceso para que ejecuten acciones que podrían ser peligrosas o muy lentas haciéndolas manualmente.

El PLC nos permite procesar un gran número de señales de entrada y de salida que no se podría llevar a cabo con otro tipo de dispositivos, es el encargado de comunicar al ordenador con el proceso correspondiente a través de cables y buses de datos.

La arquitectura o constitución de un PLC son sistemas de microprocesadores que consisten de una CPU, un procesador, una memoria y la alimentación.

Las características mas importantes de este tipo de controladores son:

- Coste reducido
- Espacio necesario para su uso es pequeño
- Alta manejabilidad por el uso de lógica cableada
- Montaje muy sencillo (Bajo número de materiales y piezas empleadas)
- Versátil

Todo PLC debe tener una serie de características mínimas, en nuestro caso, el PLC MODICON TSX-Premium cumple las siguientes:

- Intercambio de datos con los elementos conectados.
- Procesa el programa que se vuelca sobre el PLC para su gobierno.
- Es capaz de recibir cualquier señal del proceso e interpretarla mediante diferentes algoritmos internos.

En el presente proyecto se utiliza el PLC **MODICON TSX-Premium** de Schneider Electric, con dos unidades descentralizadas mediante bus CAN, para controlar el proceso de mecanizado y la velocidad del motor que simula la operación de taladrado.

La programación de este autómata se ha realizado mediante el programa **UNITY PRO M** de Schneider Electric que más tarde explicaremos su funcionamiento.

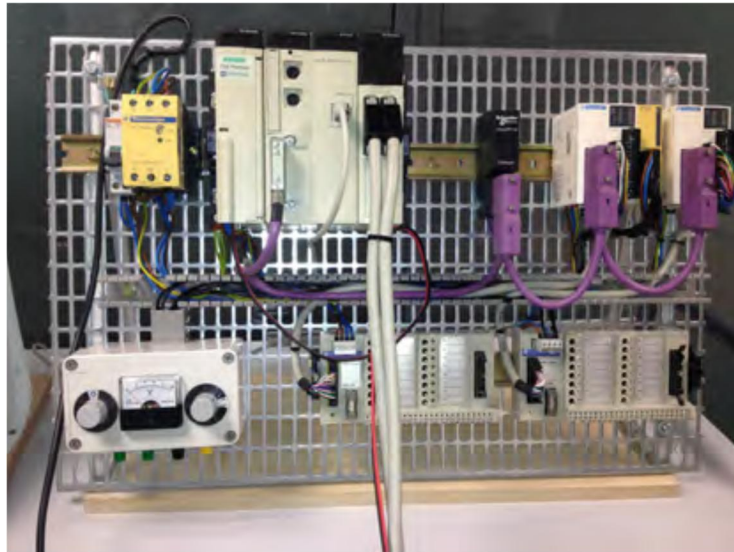


Figura 25

1.4.4. UNITY PRO M (Software de programación)

Unity Pro M es una herramienta que se puede usar para todas las fases de un proyecto de automatización. Permite tanto programar como depurar una aplicación completa.

En la fase de diseño permite vistas funcionales, bibliotecas de funciones, datos estructurados, multitareas y 5 lenguajes de programación:

- LD (LaDder)
- FBD (Function Block Diagram)
- IL (Instruction List)
- ST (Structured Text)
- SFC (Sequential Function Chart o GRAFCET)

La programación de nuestro proceso de automatización se realiza mediante el lenguaje SFC o GRAFCET, aunque también se utiliza el lenguaje LD para programas internos dentro del GRAFCET.

Mediante este mismo programa, además de la llevar a cabo la programación del proceso, también se implementan las pantallas de operador para facilitar el manejo del proceso mediante símbolos gráficos y botoneras.

IMÁGENES DEL PROGRAMA UNITY PRO M

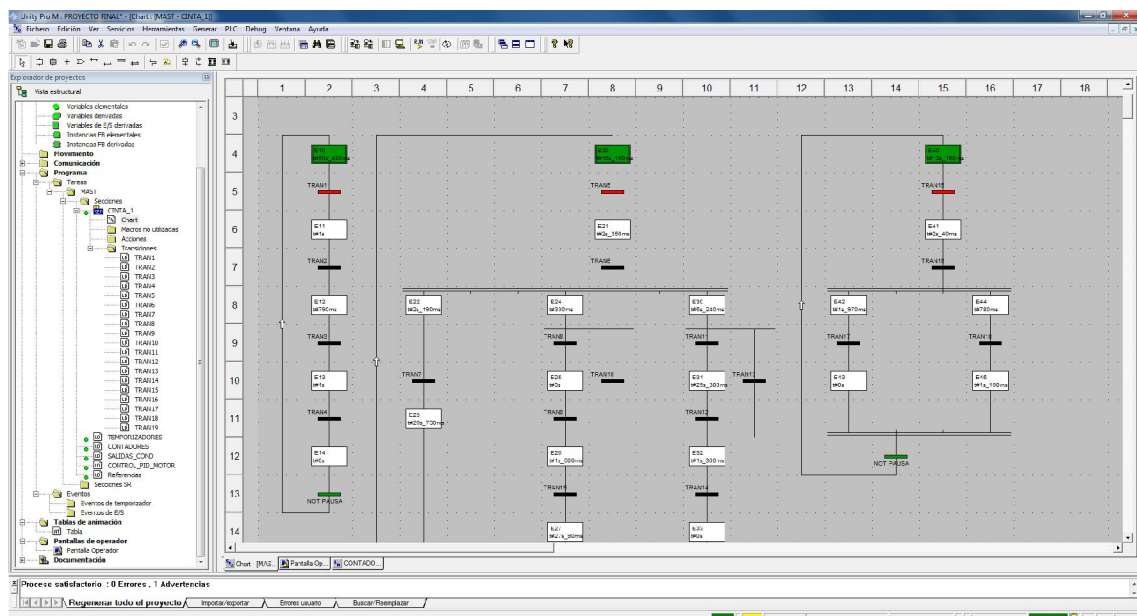


Figura 26

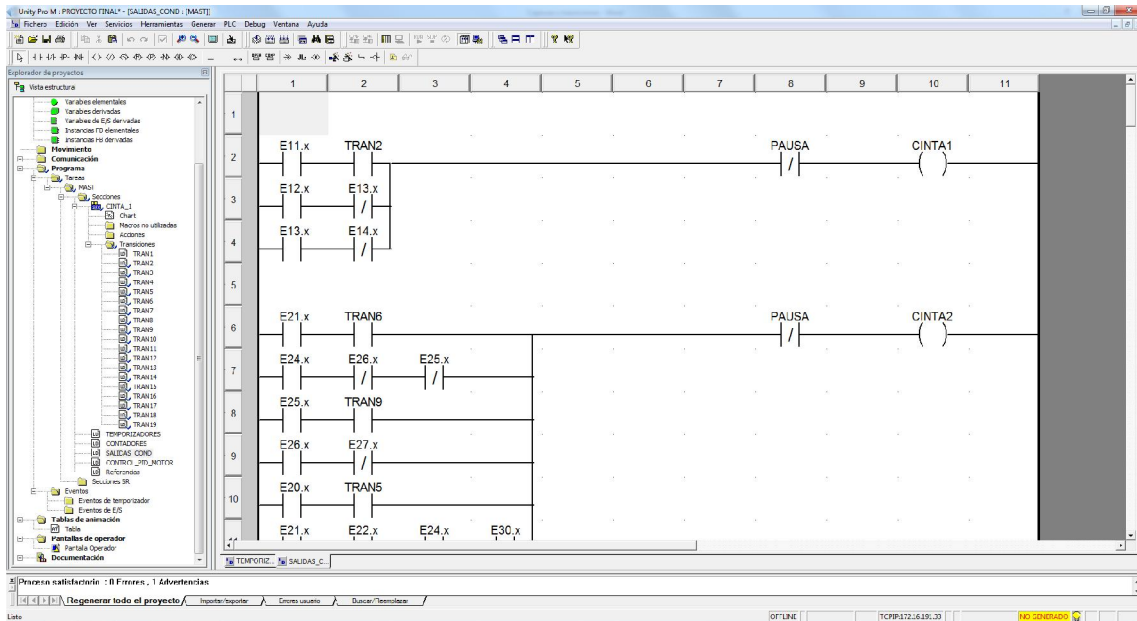


Figura 27

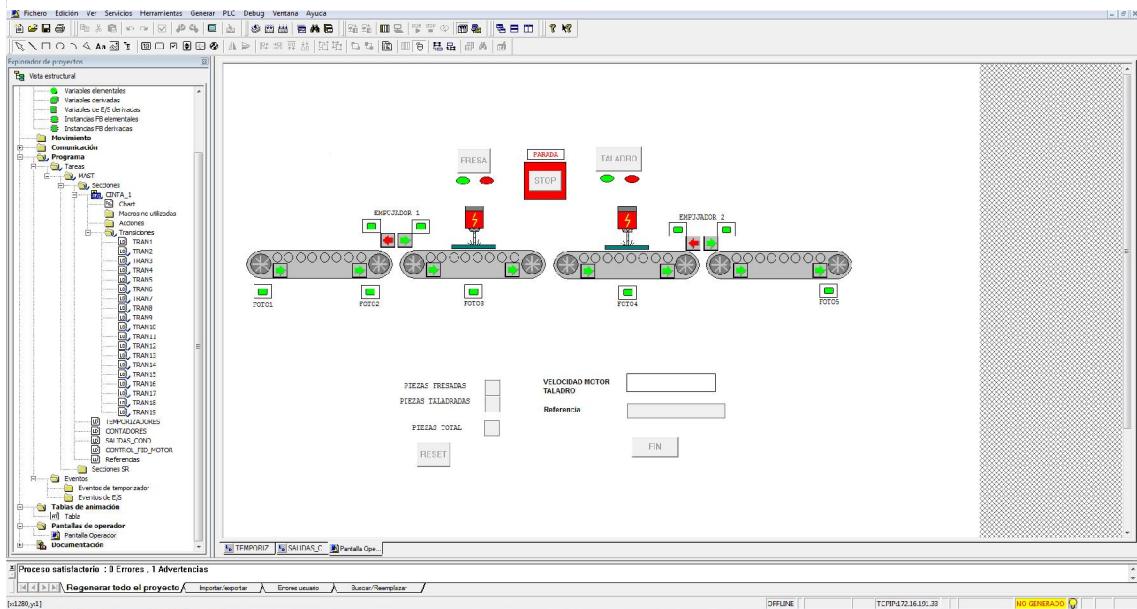


Figura 28

1.5. Aspectos técnicos

En esta parte del proyecto entraremos a detallar en profundidad la solución adoptada frente al problema que se nos plantea, la automatización de un proceso industrial.

La automatización de este proceso trata de encontrar la manera de realizar los procesos de mecanizado de fresado y taladrado de manera automatizada, no de forma manual como anteriormente se hacía.

En el proceso de la línea de mecanizado se encuentran varias fases: primero la introducción de la pieza simulando la introducción de la materia prima, después pasa por las dos etapas de mecanizado (fresado y taladrado), donde la pieza será tratada en cada una de las máquinas herramienta únicamente si el operario así lo desea, además del control de la velocidad del motor del centro de taladrado y por último la expulsión de la pieza ya terminada.

Dicho esto, el proyecto se centra principalmente en cuatro partes:

1. AUTOMATIZACIÓN DE LA LINEA INDEXADA DE MECANIZADO

Programación de las distintas partes del proceso para el correcto funcionamiento de la línea de mecanizado.

2. CONTROL DE LA VELOCIDAD DEL MOTOR DEL CENTRO DE TALADRADO

Se trata de controlar la velocidad a la que debe trabajar el taladro del centro de mecanizado. El control se realiza mediante un PID.

3. COMUNICACIÓN DEL CONTROL DEL MOTOR CON EL CENTRO DE MECANIZADO

Aunque realmente sean dos procesos por separado, deben de estar comunicados.

4. VISUALIZACIÓN Y CONTROL DEL PROCESO

Con el fin de facilitar al usuario el manejo de la línea de mecanizado, se crea una pantalla de operador para poder controlar y visualizar el proceso de forma automática en todo momento.

1.5.1. Automatización línea indexada de mecanizado

Para comenzar a describir la automatización del proceso se deben definir las variables que afectan al sistema. Estas variables son tanto las de entrada como las de salida, incluyendo algunas variables auxiliares necesarias para el que el centro de mecanizado opere correctamente. Se muestran las variables en las siguientes tablas, diferenciando entre variables de entrada y de salida:

ENTRADA		Símbolo del programa	Dirección TSX
I1	Final de carrera frontal del empujador 1	FINALFRONTAL1	%MW0.0
I2	Final de carrera trasera del empujador 1	FINALTRASERA1	%MW0.1
I3	Final de carrera frontal del empujador 2	FINALFRONTAL2	%MW0.2
I4	Final de carrera trasera del empujador 2	FINALTRASERA2	%MW0.3
I5	Fototransistor empujador 1	FOTO2	%MW0.4
I6	Fototransistor fresadora	FOTO3	%MW0.5
I7	Fototransistor estación carga	FOTO1	%MW0.6
I8	Fototransistor taladradora	FOTO4	%MW0.7
I9	Fototransistor cinta transportadora salida	FOTO5	%MW3.0

SALIDA		Símbolo del programa	Dirección TSX
Q1	Motor empujador 1 hacia adelante	EMPALANTE_1	%MW4.2
Q2	Motor empujador 1 hacia atrás	EMPATRAS_1	%MW4.3
Q3	Motor empujador 2 hacia adelante	EMPALANTE_2	%MW4.4
Q4	Motor empujador 2 hacia atrás	EMPATRAS_2	%MW4.5
Q5	Motor cinta transportadora de alimentación	CINTA1	%MW4.6
Q6	Motor cinta transportadora fresadora	CINTA2	%MW4.7
Q7	Motor fresadora	FRESA	%MW6.2
Q8	Motor cinta transportadora taladradora	CINTA3	%MW6.3
Q9	Motor taladradora	TALADRO	%MW6.4
Q10	Motor cinta transportadora salida	CINTA4	%MW6.5
Q11	Habilitar sensores y empujadores	HABSENSORES	%MW6.6

Las variables del sistema están definidas previamente por el fabricante de la maqueta.

Tanto las entradas como las salidas son de tipo booleano, es decir, toman valores de 1 o 0, estando así activadas o desactivadas. Para poder definir los tiempos de mecanizado, la entrada

a los modos de funcionamiento o elección del tipo de mecanizado correspondiente, las paradas de emergencia, el reseteo de contadores, los parámetros del PID necesarios para el bloque correspondiente, etc, se deben incluir en el proceso una serie de variables auxiliares que ya no son de tipo booleano, sino de tipo real.

VARIABLES AUXILIARES TIPO 1	Símbolo del programa	TIPO
Elección acción de fresado	MODOFRESA	Bool
Elección acción de taladrado	MODOTALADRO	Bool
Pulsador paro de emergencia	PAUSA	Bool
Reset de los contadores de piezas	RESET_CONT	Bool
Finalización control velocidad del motor CC	FINAL_TAL	Bool

VARIABLES AUXILIARES TIPO 2	Símbolo del programa	TIPO
Entrada analógica	entraanalog	real
Variable real con la referencia	ref	real
Salida analógica	saloutpi	real
Parámetros PID	paraPI	real

Además de las variables anteriores, hace falta definir una serie de contadores y temporizadores que forman parte del proceso y que son imprescindibles para el correcto funcionamiento del centro de mecanizado. Tanto los contadores como los temporizadores se verán detallados en el apartado ANEXOS.

Tras la declaración de las variables del proceso, se pasa a describir la automatización del proceso:

El proceso comienza con la introducción de la materia prima (pieza simulada) en la primera cinta transportadora, que es la estación de alimentación, donde se encuentra con el primer sensor fototransistor (FOTO1). Para evitar que el dejar la pieza y avanzar sea demasiado brusco se ha programado un temporizador de 1 seg (TEMP1) para que la pieza comience a moverse con ese retraso y evitar accidentes. En este primer sensor (foto1) hay un pequeño fallo de detección debido a la distancia a la que se encuentran el emisor y el receptor, lo que hace que haya que calibrarlo bien antes de comenzar el proceso.

Tras finalizar la temporización (TEMP1), la primera cinta comienza a moverse (CINTA1) con la pieza y continúa moviéndose hasta que llega al segundo fototransistor (FOTO2) que habilita la señal de otro temporizador (TEMP2) de 1 segundo para que la pieza no pare y pueda llegar al primer empujador que se encuentra separado una pequeña distancia del segundo sensor.

Esta parte que se ha explicado hasta ahora está todo programado en el mismo Grafcet. Se han programado tres Grafcets del proceso por separado, para que se puedan admitir varias piezas a la vez. El conjunto de los tres forman el Grafcet principal de la automatización de este proceso.

El Grafcet de esta primera parte es el encargado del control de la primera cinta y de habilitar los sensores y actuadores de todo el proceso. Este Grafcet se encuentra en el apartado ANEXOS.

Se pasa a describir el segundo Grafcet, que es el encargado del control de la segunda y la tercera cinta, el primer empujador y los modos de fresado y taladrado.

Una vez la pieza ha llegado al primer empujador, éste es el encargado de llevar la pieza hasta la segunda cinta (CINTA2). El segundo Grafcet comienza ya que la primera condición para que funcione es que la última etapa del Grafcet anterior haya sido activada. El empujador comienza a moverse hacia adelante (EMPALANTE_1) y a su vez la segunda cinta, hasta que llega al final de carrera (FINALFRONTAL1), tras esto, la pieza se encuentra situada encima de la segunda cinta y moviéndose mientras que el empujador regresa (EMPATRAS_1) a su posición inicial hasta que topa con otro final de carrera (FINALTRASERA1). La pieza se mueve por la segunda cinta hasta que es detectada por el tercer sensor fotoeléctrico (FOTO3). Cuando la pieza es detectada por este sensor, el programa mira si está activado el modo fresa o no (MODOFRESA) y, dependiendo de lo que el operario haya decidido con el pulsador que se encuentra en la pantalla de operador, se quedará parada la cinta para que la pieza sea fresada o seguirá sin pararse hasta la tercera cinta (CINTA3). Para el caso de que la pieza deba ser mecanizada, al llegar al sensor, el motor de la fresadora (FRESA) comienza a moverse simulando el mecanizado de la pieza durante un tiempo establecido (TEMPFRESADO) y tras cumplirse el tiempo continúa moviéndose hasta la tercera cinta pero también condicionada por un temporizador (TEMPCINTA2) para que el motor de la segunda cinta deje de funcionar y no esté funcionando junto con la tercera cinta que ha empezado a moverse a la vez.

En este mismo Grafcet se ha programado la tercera cinta y el modo taladrado. La tercera cinta comienza a moverse a la vez que la segunda ya que se han programado para que funcionen en paralelo.

Una vez la pieza ha llegado a la tercera cinta, ésta sigue moviéndose hasta que la pieza pasa por delante del cuarto sensor (FOTO4) que, al igual que el sensor anterior (FOTO3), se quedará parado o continuará dependiendo de la activación o no del modo taladrado (MODOTALADRO). En el caso de acceder a ser taladrado, el motor del taladro (TALADRO) de la maqueta se moverá simulando el mecanizado de la pieza. Además de todo lo anterior, aquí comienza el control del Motor CC (externo a la maqueta) que simula la velocidad elegida por el operario en cada momento. Esta parte se explicará con más claridad en el siguiente apartado.

Tras acabar el mecanizado (taladrado) la pieza continúa moviéndose por la cinta durante un tiempo establecido por el programador (TEMP3), en este caso se han elegido 1.3 segundos para garantizar que la pieza continúe hasta el segundo empujador.

El último Grafcet es el encargado de gobernar la cuarta cinta y el segundo empujador.

La pieza llega al segundo empujador y realiza el mismo movimiento que el primero; traslada la pieza hasta la cuarta cinta (EMPALANTE_2) hasta que llega al final de carrera (FINALFRONTAL2). Al llegar al final de carrera anterior, la cinta continúa moviéndose con la pieza hacia el final y el

empujador comienza a regresar (EMPATRAS_2) hasta llegar al final de carrea (FINALTRASERA2) donde quedará parado. La pieza, que continuaba por la cuarta y última cinta, llega hasta el último sensor fotoeléctrico (FOTO5) que para la cuarta cinta (CINTA4) y termina el proceso de mecanizado de la pieza.

Durante el movimiento de la pieza por la maqueta se van contando las piezas que han pasado por el proceso de fresado, las que han pasado por el proceso de taladrado y las piezas totales que han pasado por el centro de mecanizado. El contador de piezas fresadas efectúa el incremento cuando llega al tercer sensor (FOTO3) y ha sido activado el modo fresa (MODOFRESA), el contador de piezas taladradas al llegar al sensor (FOTO4) y estar activado el modo taladro, y por último, el contado de piezas totales se hará efectivo al llegar al sensor (FOTO5). Como se ha dicho anteriormente, los contadores se verán detallados en los ANEXOS.

1.5.2. Control velocidad del motor del taladrado

Para el cálculo de los parámetros necesarios para el control de velocidad del motor de CC se hace necesaria la realización de un ensayo, ante escalón de amplitud 5, con el motor CC, obteniéndose la siguiente gráfica:

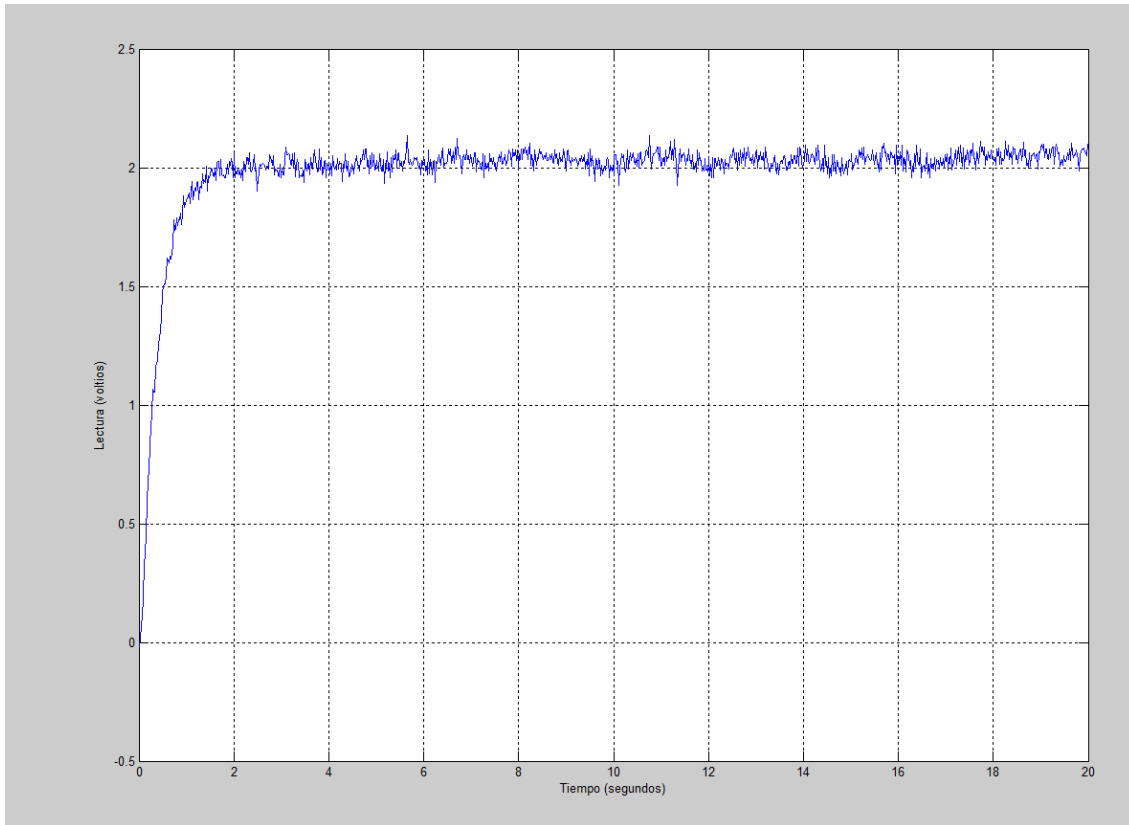


Figura 29

Ante escalón de entrada de un sistema de primer orden se cumple que el valor en $t = \infty$ de la salida coincide con:

$$y(\infty) = AK$$

Por su parte, el valor en $t = \tau$ es $y(\tau) = 0.63 y(\infty)$. Al buscar esas magnitudes en la gráfica de la respuesta anterior, vemos que $y(\infty) = 2$ y τ es aproximadamente 0.5.

Se conoce que la amplitud (A) es 5. Por tanto, solo haría falta calcular la ganancia (K) del sistema, que es:

$$K = \frac{y(\infty)}{A} = \frac{2}{5} = 0.4$$

Así, la función de transferencia aproximada del motor de CC utilizado en nuestro TFG será:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} = \frac{0.4}{0.5s + 1}$$

Se ha realizado una simulación de la función de transferencia, obtenida anteriormente, mediante la aplicación Simulink de MATLAB para comprobar los cálculos y se observa que se obtiene el mismo resultado (step amplitud 5):

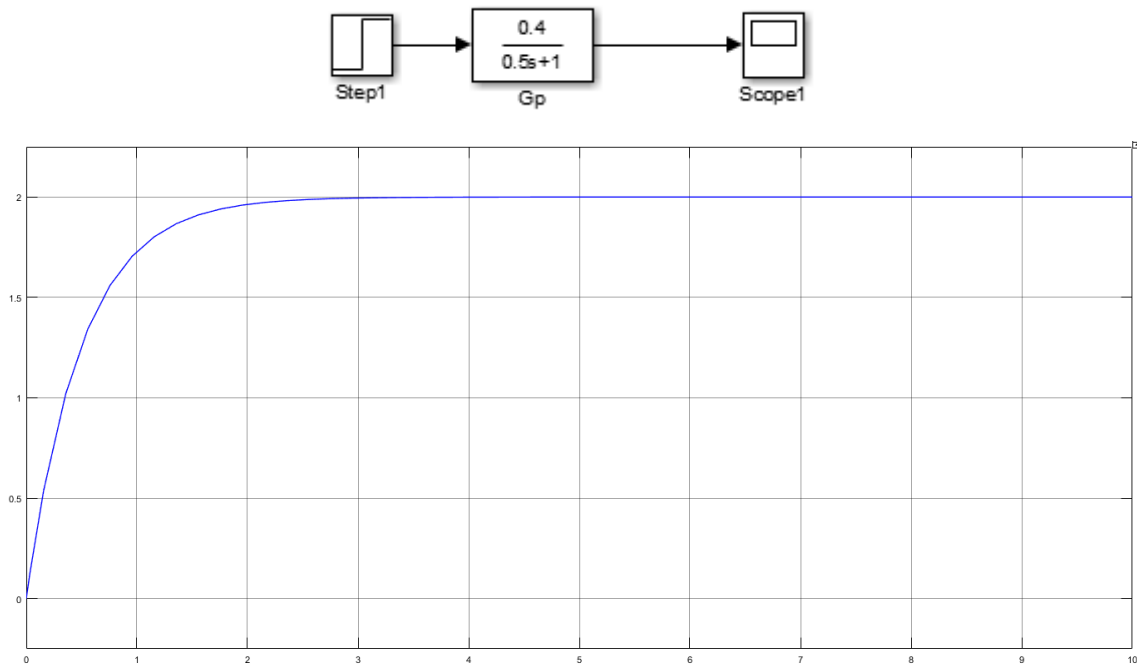


Figura 30

Se requiere un **control PID** del motor, en nuestro caso solo es necesario un **PI** puesto que es un sistema de primer orden simple.

El cálculo de los parámetros del controlador PI se expone a continuación.

Se procede a realizar el ajuste del controlador/regulador PI por cancelación. Este procedimiento de diseño emplea los ceros del regulador para cancelar la dinámica del proceso a controlar, es decir, los polos del modelo. Únicamente sirve para determinados tipos de procesos pero que es sencillo y rápido de aplicar.

El proceso, al ser de primer orden, se utilizará un regulador PI. El integrador aumenta el tipo del servosistema para anular el error de posición y el cero del integrador cancelará el polo de la planta.

Los resultados obtenidos son: la constante proporcional **Kp = 3** y el tiempo integral **Ti = 2 s**. Estos parámetros son los utilizados en el bloque PI_B del autómata. La función de transferencia del regulador calculado es:

$$G_{pi}(s) = \frac{3(s+2)}{s}$$

Mediante la aplicación Simulink de MATLAB se ha creado la siguiente simulación:

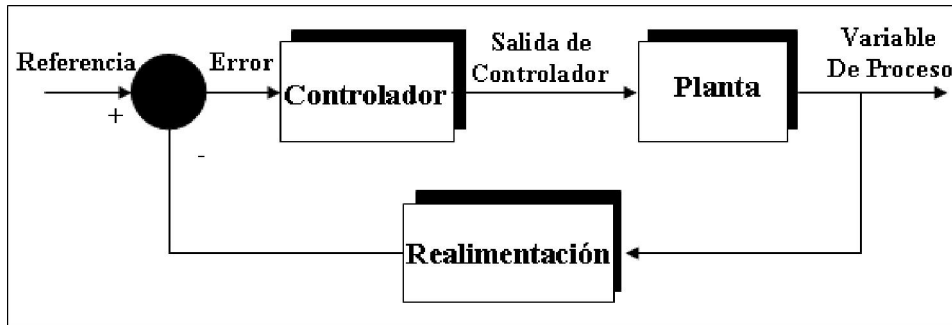
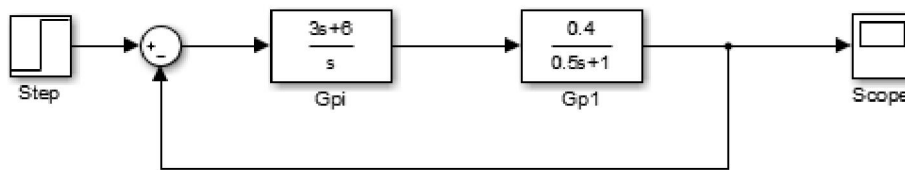


Figura 31



Obteniendo la siguiente gráfica que demuestra que el regulador sigue correctamente la referencia ante referencia escalón unitario:

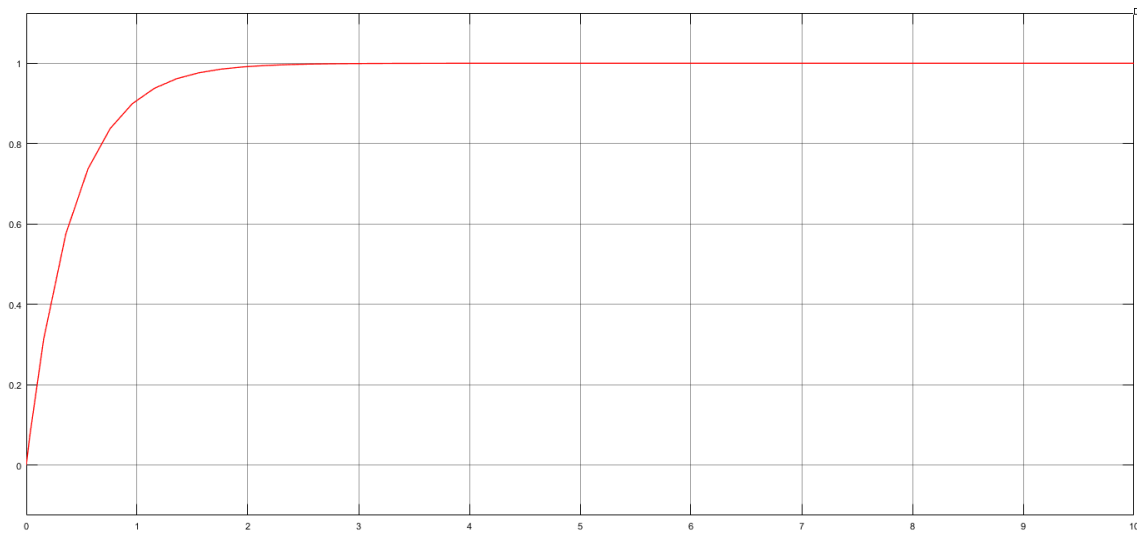


Figura 32

1.5.2.1. Programación del controlador PID

La programación de un PID en el autómata programable se realiza mediante la inclusión de un módulo PI_B, que se describe a continuación:

El bloque PI_B representa un algoritmo con estructura mixta (serie/paralelo). Permite ejecutar la mayoría de las aplicaciones clásicas de regulación. A continuación se describen las funcionalidades que presente este bloque:

- Cálculo de la componente proporcional e integral de forma incremental.
- Valor real, valor de referencia y valor de salida en unidades físicas.
- Acción directa o inversa.
- Posibilidad de conexión de una componente externa al bloque (entrada RCPY).
- Zona de inestabilidad en desviación.
- Salida de valor incremental y de valor absoluto.
- Límite superior e inferior de la señal de salida.
- Offset de salida.
- Selección de la modalidad de servicio Manual/Automático.
- Servicio Tracking.
- Límite superior e inferior del valor de referencia.

El bloque PI_B utilizado se muestra en la siguiente imagen:

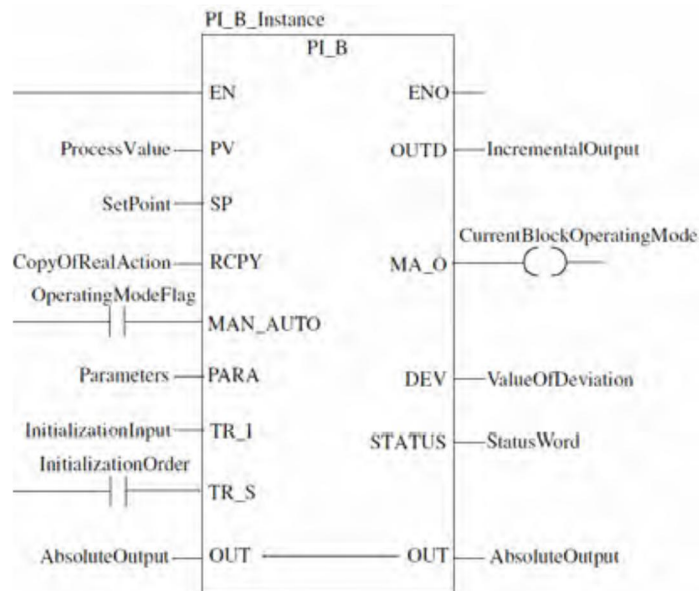


Figura 33

Los parámetros de la imagen anterior se pueden observar detallados en las tablas que se encuentran en el apartado de los ANEXOS.

La programación de este bloque será de la manera que se incluye en la siguiente figura. Tal y como se puede observar aparece la habilitación del módulo, la activación del modo automático, la variable real con la referencia (ref), la entrada y salida analógica (entraanalogue y saloutpi, respectivamente). La entrada o la salida ha de ser un valor real, por lo que se ha de convertir su valor desde entero (INT_TO_REAL) o a entero (REAL_TO_INT) desde el valor entero %MW1 para la entrada (al valor entero desde %MW5 para la salida).

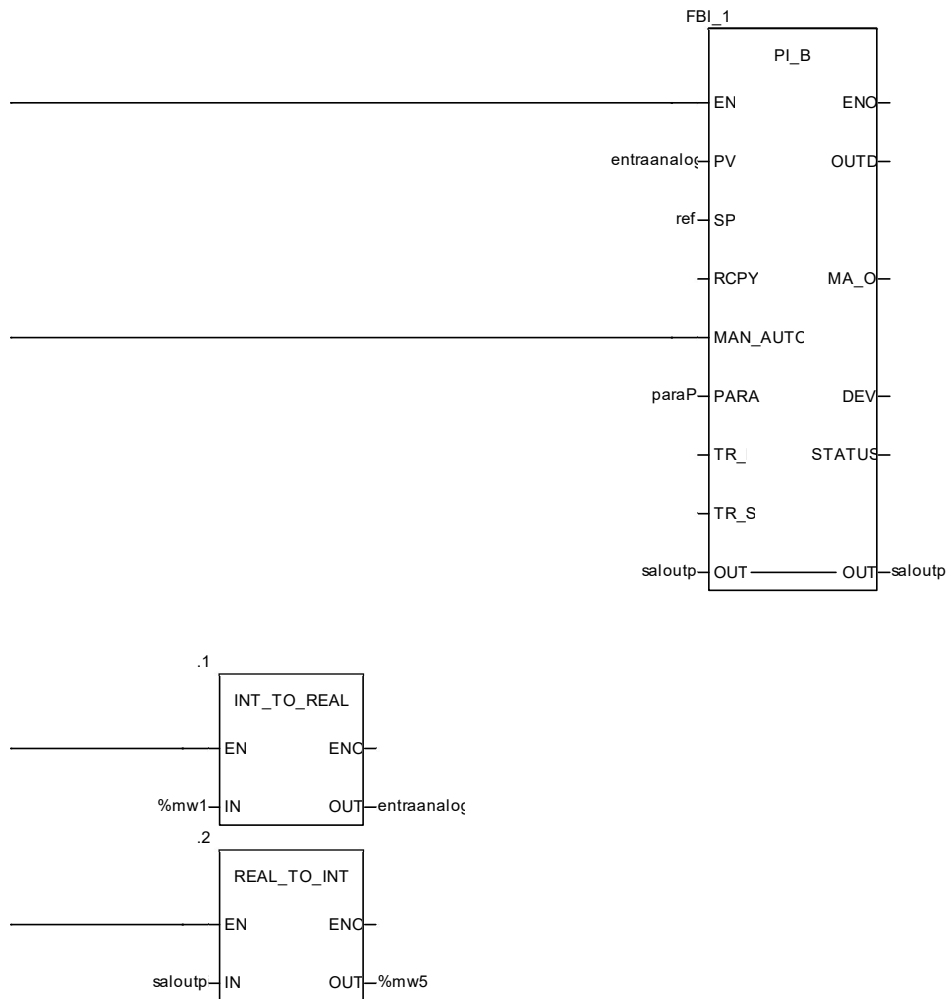


Figura 34

Para entender mejor como funciona el esquema anterior se adjunta el siguiente esquema donde se puede observar el funcionamiento del control PID con el autómata:

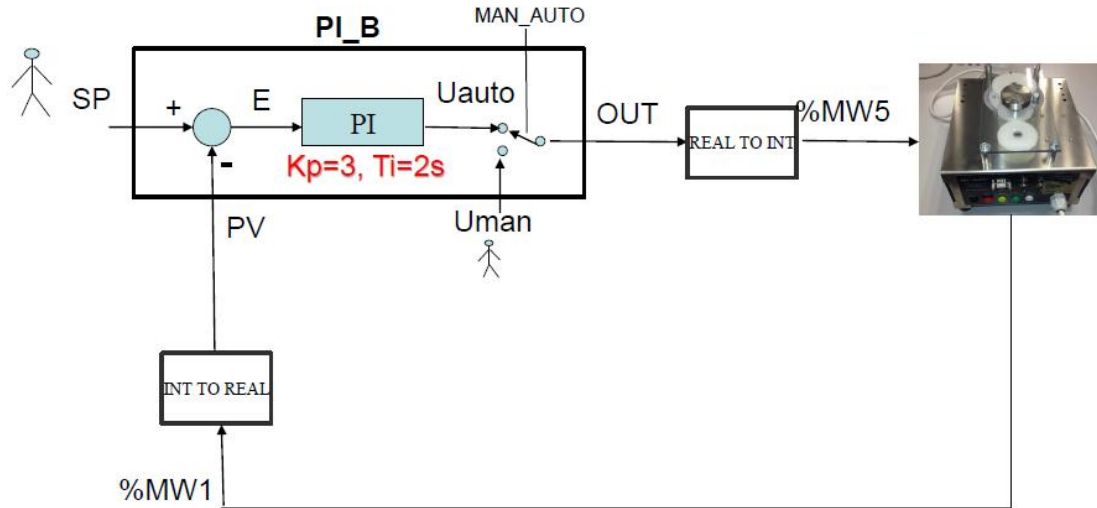


Figura 35

El sistema funciona como un bucle cerrado en la que el motor está generando una señal de tipo entero que es procesada en el bloque INT TO REAL, para que pueda ser insertada en el bloque PI_B del autómata. Tras ser procesado el dato, se manda por la salida un dato real que debe ser convertido a entero por el bloque REAL TO INT hasta que llega la señal de la velocidad requerida de nuevo al motor.

Los parámetros del PID se introducen con la inclusión de una variable de estructura tipo Para_PI_B, que hemos denominado **paraPi**, donde se introducen los parámetros de dicha variable que se encuentra en el apartado variables derivadas. En concreto, se han ajustado los valores que se muestran en la siguiente imagen, donde se observan los valores mínimos (0) y máximo (10000) para entrada y salida, así como los parámetros más importantes del regulador que son la constante proporcional ($K_p = 3$) y el tiempo integral ($T_i = 2s$).

paraPi	Para_PI_B		
id	UINT		
pv_inf	REAL		0.0
pv_sup	REAL		10000.0
out_inf	REAL		0.0
out_sup	REAL		10000.0
rev_dir	BOOL		
en_rcpy	BOOL		
kp	REAL		3.0
ti	TIME		t#2s
dband	REAL		
outbias	REAL		

Figura 36

La programación de este bloque (o bloques) se ha implementado creando una nueva sección LD en el programa principal.

1.5.3. Comunicación del proceso y el motor con el PLC

Al automatizar todo el proceso con el mismo autómatas, siendo dos máquinas diferentes, hace que la comunicación entre los dos procesos sea muy simple. En el siguiente esquema se puede observar la conexión entre el PC, el PLC, los nodos E/S, el motor CC y la maqueta (proceso):

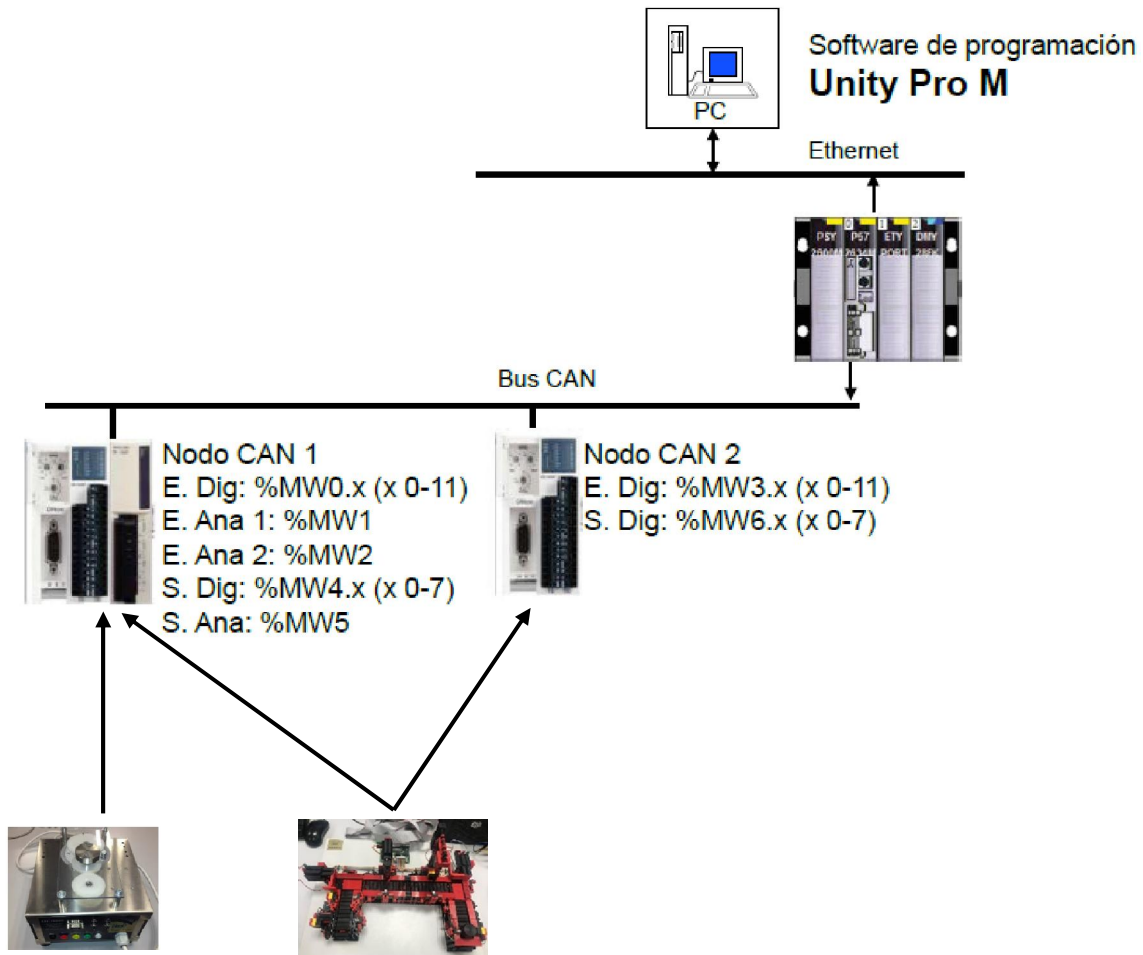


Figura 37

Como se ha explicado anteriormente, la acción de control híbrido del motor comienza al llegar la pieza al fototransistor (FOTO4), que se encuentra en la maqueta principal del centro de mecanizado.

La conexión de la maqueta con el autómatas se realiza mediante un bus de direcciones y la del control del motor se realiza mediante la inclusión de un sistema de entrada y salida analógica que se conecta al PLC (Caja de conexiones analógicas del autómatas). Las conexiones entre el motor y el autómatas se pueden observar en las siguientes imágenes:

- Verde izquierda: a Vout del tacómetro (motor)
- Verde derecha: no se conecta
- Negro: a Masa (motor)
- Amarillo: a Vin (motor)

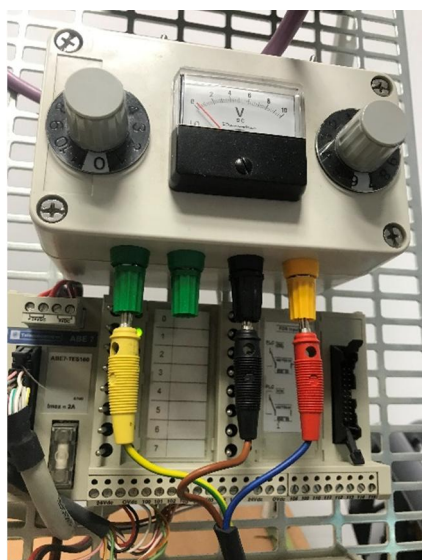


Figura 38



Figura 39

1.5.4. Monitorización y control del proceso

Tal y como se ha hablado anteriormente, el proyecto consta de una pantalla de operador desde la cuál se puede interactuar con el proceso y a su vez conocer el estado de cada uno de los componentes (entradas y salidas) mediante indicadores de estado.

Al igual que toda la programación de los Graficets y el control PID del motor, la pantalla de operador se ha creado en el mismo software, en UNITY PRO M de Schneider. Este programa permite definir interfaces con el usuario que representan de manera esquemática el proceso que se está controlando. Con estos interfaces es posible definir botones que controlan el funcionamiento del proceso así como disponer de gráficas donde se represente el comportamiento del proceso al que esté ligado.

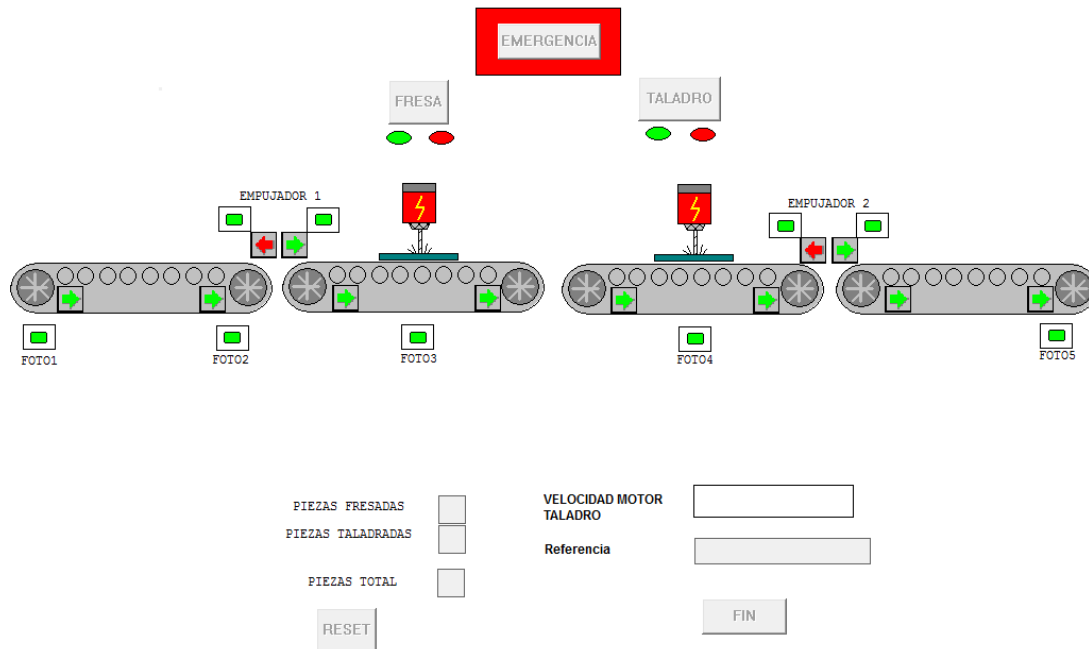


Figura 40

Dentro de la pantalla de operador, además de botoneras e indicadores de estado de cada uno de los elementos, se ha incluido un apartado que está dedicado exclusivamente al control de la velocidad del motor. Se ha dotado de una casilla donde se introduce la velocidad de referencia que queremos que siga el motor y una pantalla donde nos va a aparecer la velocidad del motor en cada instante de tiempo. La asignación del valor deseado a la variable **ref** se ha implementado con un módulo OPERATE. La asignación se hace como se muestra en la siguiente figura:

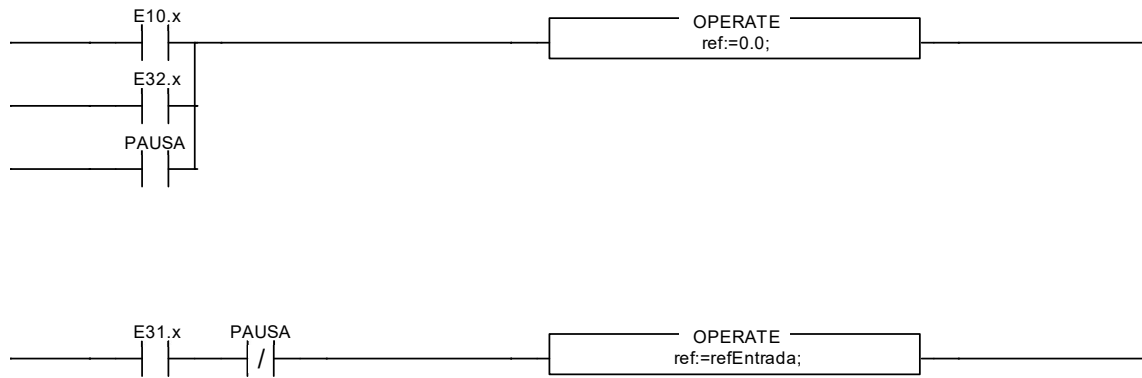


Figura 41

Como se puede observar, con las etapas E10 y E32, junto a la parada de emergencia, se asigna el valor cero a la velocidad de referencia del motor, mientras que si nos encontramos en la etapa E31 (etapa donde se activa el motor de taladro en la maqueta (TALADRO)) a la variable **ref** se le asigna la velocidad de referencia que el operario o el usuario ha introducido en el apartado REFERENCIA de la pantalla de operador.

1.5.4.1. GUÍA DE USUARIO

En este apartado se explica de manera más o menos detallada una guía para que cualquier persona que esté interesada pueda manejar con facilidad todo el proceso automatizado que se ha llevado a cabo en este proyecto.

La explicación del manejo de la planta de mecanizado es la siguiente:

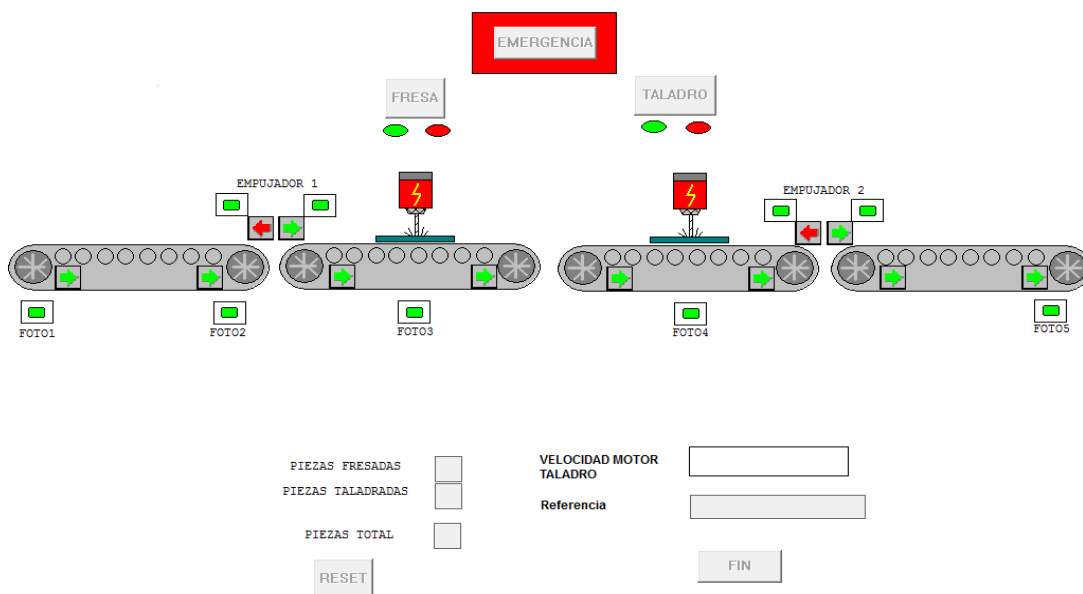


Figura 42

En la parte superior se encuentran 3 botones: 2 asociados a los modos de mecanizado (*FRESA* y *TALADRO*) y el botón central resaltado en rojo (*EMERGENCIA*) que será el asociado a la parada de emergencia o pausa del proceso. Tanto el botón *FRESA* como el de *TALADRO* son dos botones que van asociados a la elección del modo de mecanizado que se desea en cada momento, si están activados la pieza parará en la estación correspondiente y será mecanizada, encendiéndose a su vez el indicador verde que se encuentra debajo de los botones. Por el contrario, si el botón está desactivado, la pieza no entra a ser mecanizada en la estación de mecanizado correspondiente y un indicador rojo se encenderá.

El botón *EMERGENCIA* es el asociado a la parada de emergencia, en nuestro caso una pausa en el sistema que hará que el proceso pare pero no termina, sigue desde donde lo dejamos al desactivar el botón.

En la parte central de la pantalla se encuentra el esquema de la planta de la línea de mecanizado del proceso. Nos encontramos con las 4 cintas de las que consta la línea de mecanizado, los 2 empujadores, los centros de mecanizado (fresa y taladro) y los indicadores de estado de cada uno de los sensores y actuadores.

Las cintas llevan asociadas unos indicadores (flechas) que se verán iluminadas únicamente cuando la cinta esté en funcionamiento. Al ser de sentido único solo se moverán hacia delante.

Los empujadores son de doble sentido, es decir, empujan la pieza de una cinta a otra y posteriormente vuelve a su posición inicial. Tanto el movimiento de empuje como el de regreso tienen asociadas dos flechas (Verde para empuje y Roja para regreso a posición inicial). A su vez se encuentran dos indicadores Led que se encienden al estar asociados a los finales de carrera (*FINALFRONTALX* y *FINALTRASERAX*).

Los centros de mecanizado son dos imágenes que solo aparecen cuando se está mecanizando la pieza.

En la parte baja de las cintas transportadoras se encuentran los 5 indicadores de estado de los sensores fototransistores, apareciendo el Led verde cuando detectan la pieza.

Por último, en la parte inferior de la pantalla se encuentran los indicadores numéricos del conteo de piezas, tanto mecanizadas como totales, y los apartados donde se introduce la velocidad requerida para el motor que simula el taladrado.

En la parte de los contadores de piezas hay un botón *RESET* que pone a 0 los contadores de piezas.

En el recuadro de *VELOCIDAD MOTOR TALADRO* aparecerá en todo momento la velocidad real del motor de CC, mientras que el recuadro *Referencia* es el lugar donde el usuario introduce la velocidad a la que quiere realizar la fase de mecanizado del taladro. Esta parte consta también de un botón *FIN* que pondrá a 0 la velocidad de referencia y la pieza saldrá de la estación de taladro dirigiéndose hacia el segundo empujador.

1.6. Conclusiones

La realización del trabajo deja claro la importancia que tiene desarrollar cualquier proceso mediante maquetas, ya que es una buena forma de realizar diferentes ensayos o simulaciones sin ningún tipo de riesgo y con un coste muy reducido.

La utilización de los autómatas programables (PLC) para el gobierno de este tipo de procesos son todas ventajas: hace que sea una conexión sencilla, una forma fácil y rápida de programación, control preciso, rapidez de respuesta, la flexibilidad de control de procesos más complejos, seguridad en el proceso, posibilidad de controlar eventos continuos y discretos al mismo tiempo, etc. Debido a este gran número de ventajas, el uso de este tipo de equipos es el más adecuado para un proceso como el del presente proyecto.

Otro de los motivos por el cuál se debe usar un PLC para este tipo de procesos es porque es una herramienta que permite trabajar con eventos continuos (Control motor CC) y discretos (línea indexada de mecanizado) simultáneamente y de forma muy sencilla.

1.7. Bibliografía

- ✓ Sobre PLC
<https://davidrojasticsplc.wordpress.com/category/3-el-plc-en-la-automatizacion-industrial/>
- ✓ Información de FischerTechnik
<https://www.fischertechnik.de/en>
- ✓ InfoPLC.net
- ✓ Revista A&D
- ✓ "Automatización de procesos industriales" Emilio García Moreno
- ✓ "Control automático, tiempo continuo y tiempo discreto" Correcher Salvador, Antonio; Casanova Calvo, Vicente; Cuenca Lacruz, Angel; Salt Llobregat, Julián J.
- ✓ Apuntes de la asignatura Automatización Industrial
- ✓ Apuntes de la asignatura Técnicas de Control
- ✓ Wikipedia: mecanizado de piezas
- ✓ <https://www.schneider-electric.es/es/>
- ✓ *Automática industrial y control*. Editorial Universidad Politécnica de Valencia. Ángel M. Cuenca, Julián J. Salt.

PRESUPUESTO

2. PRESUPUESTO

CONTENIDO DEL PRESUPUESTO:

3.1 Cuadro de precios de servicio y material

3.2 Cuadro de precios descompuestos

3.3 Cuadro de precios unitarios

3.4 Presupuesto Final

En esta sección del proyecto, se pasa a describir detalladamente los costes que conlleva el presente TFG.

Ya es conocido que el TFG trata de la automatización y control híbrido de un proceso industrial, es decir, se centra en desarrollar el software de automatización y control del mismo, lo que hace que los costes asociados a la instalación de lo que simula la maqueta, la instalación de material como maquinarias, no se verán reflejados en el presupuesto.

2.1. CUADRO DE PRECIOS DE SERVICIO Y MATERIAL

Servicio de mano de obra	Precio (€/h)
Ingeniero Titulado en Electrónica Industrial y Automática	24
Técnico de laboratorio	15
Tutor o supervisor	20

Descripción del material	Precio (€/h)
Ordenador Laboratorio	2
Línea indexada de mecanizado (Maqueta FischerTechnik)	2.20
Motor CC	1.50
PLC MODICON TSX-Premium Schneider	4.30
Licencia programa UNITY PRO M	3.80

2.2. CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS

Unidad de Obra Nº 1

Unidad de obra	Unidad	Rendimiento	Precio (€/h)	Importe total (€)
Diseño de la programación del autómatas MODICON TSX-Premium a partir del software de programación UNITY PRO M (Incluye graficets, comunicación entre maqueta y motor CC y con el usuario)				
Ingeniero Titulado en Electrónica Industrial y Automática	h	120	24	2880
Técnico de laboratorio	h	2	15	30
Tutor o supervisor	h	10	20	200
Ordenador Laboratorio	h	120	2	240
Linea indexada de mecanizado	h	120	2.20	264
Motor CC	h	100	1.50	150
PLC MODICON TSX-Premium Schneider	h	120	4.30	516
Licencia programa UNITY PRO M	h	120	3.80	456
Costes directos				4736
Costes indirectos complementarios (2% directos)				94.72
Coste TOTAL				4830.72

Unidad de Obra Nº 2

Unidad de obra	Unidad	Rendimiento	Precio (€/h)	Importe total (€)
Puesta a punto de la línea indexada de mecanizado (se incluyen los ajustes convenientes de los elementos de la maqueta para asegurar un perfecto funcionamiento)				
Ingeniero Titulado en Electrónica Industrial y Automática	h	8	24	192
Técnico de laboratorio	h	1	15	15
Tutor o supervisor	h	1	20	20
Ordenador Laboratorio	h	8	2	16
Línea indexada de mecanizado	h	8	2.20	17.6
PLC MODICON TSX-Premium Schneider	h	8	4.30	34.4
Licencia programa UNITY PRO M	h	8	3.80	30.4
Costes directos				325.4
Costes indirectos complementarios (2% directos)				6.508
Coste TOTAL				331.91

Unidad de Obra Nº 3

Unidad de obra	Unidad	Rendimiento	Precio (€/h)	Importe total (€)
Puesta a punto del motor CC				
Ingeniero Titulado en Electrónica Industrial y Automática	h	2	24	48
Técnico de laboratorio	h	0.5	15	7.5
Tutor o supervisor	h	0.5	20	10
Ordenador Laboratorio	h	2	2	4
Línea indexada de mecanizado	h	2	2.20	4.4
PLC MODICON TSX-Premium Schneider	h	2	4.30	8.6
Licencia programa UNITY PRO M	h	2	3.80	7.6
Costes directos				90.1
Costes indirectos complementarios (2% directos)				1.8
Coste TOTAL				91.9

Unidad de Obra Nº 4

Unidad de obra	Unidad	Rendimiento	Precio (€/h)	Importe total (€)
Redacción de los documentos (se incluye memoria descriptiva, memoria técnica, anexos y presupuestos)				
Ingeniero Titulado en Electrónica Industrial y Automática	h	66	24	1584
Tutor o supervisor	h	3	20	60
Ordenador Laboratorio	h	66	2	132
Costes directos				1776
Costes indirectos complementarios (2% directos)				35.52
Coste TOTAL				1811.52

2.3. CUADRO DE PRECIOS UNITARIOS

Descripción de la unidad de obra	Precio (€)
U.O.1 Diseño de la programación del autómeta MODICON TSX-Premium a partir del software de programación UNITY PRO M	4830.72
U.O.2 Puesta a punto de la línea indexada de mecanizado	331.91
U.O.3 Puesta a punto del motor CC	91.9
U.O.4 Redacción de los documentos del proyecto	1811.52

2.4. PRESUPUESTO FINAL

Descripción de la unidad de obra	Cantidad	Importe (€)
Diseño de la programación del autómatas MODICON TSX-Premium a partir del software de programación UNITY PRO M	1	4830.72
Puesta a punto de la línea indexada de mecanizado	1	331.91
Puesta a punto del motor CC	1	91.9
Redacción de los documentos del proyecto	1	1811.52
Presupuesto de Ejecución Material (PEM)		7066.05
Gastos generales (12% PEM)		847.93
Beneficio Industrial (6% PEM)		423.96
Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC)		8337.94
IVA 21 %		1750.97
PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN		10088.91

El presente presupuesto asciende a la cantidad de:

DIEZ MIL OCHENTA Y OCHO EUROS CON NOVENTA Y UN CÉNTIMOS

ANEXOS

3. ANEXOS

CONTENIDO DE LOS ANEXOS:

- 4.1 Graficet primera cinta
- 4.2 Graficet segunda y tercera cinta (centros de mecanizado)
- 4.3 Graficet cuarta cinta
- 4.4 Transiciones
- 4.5 Salidas Condicionadas
- 4.6 Contadores
- 4.7 Temporizadores
- 4.8 Tabla de parámetros bloque PI_B

3.1. GRAFCET PRIMERA CINTA

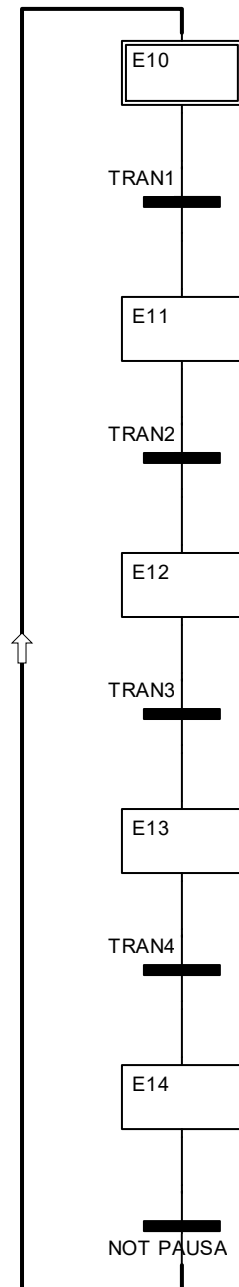


Figura 43

3.2. GRAFCET SEGUNDA Y TERCERA CINTA (CENTROS DE MECANIZADO)

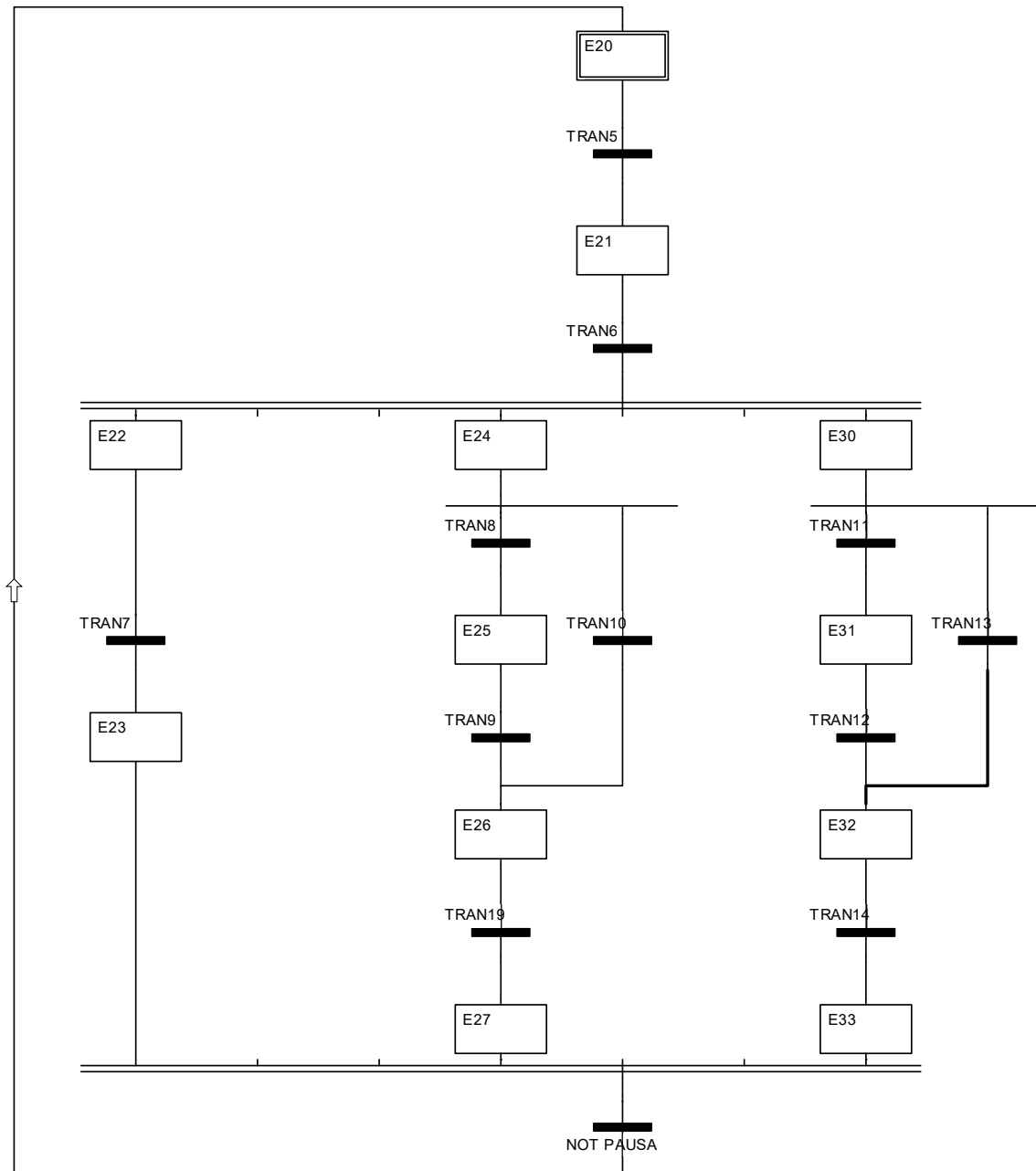


Figura 44

3.3. GRAFCET CUARTA CINTA

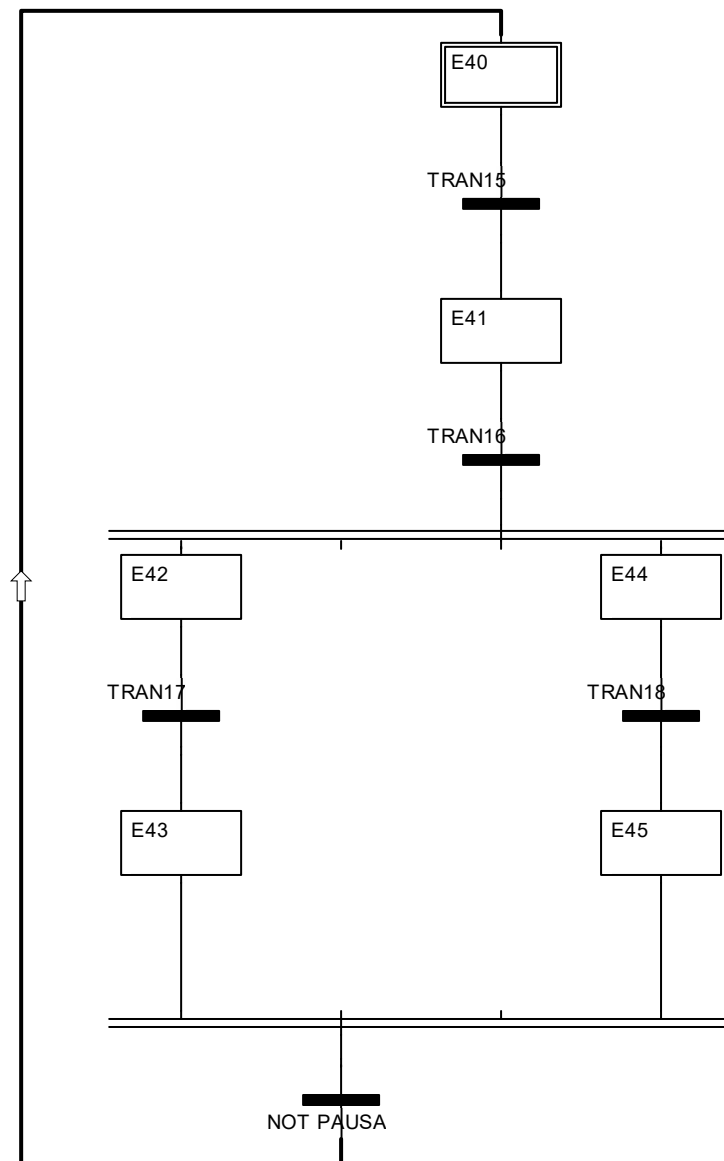


Figura 45

3.4. TRANSICIONES

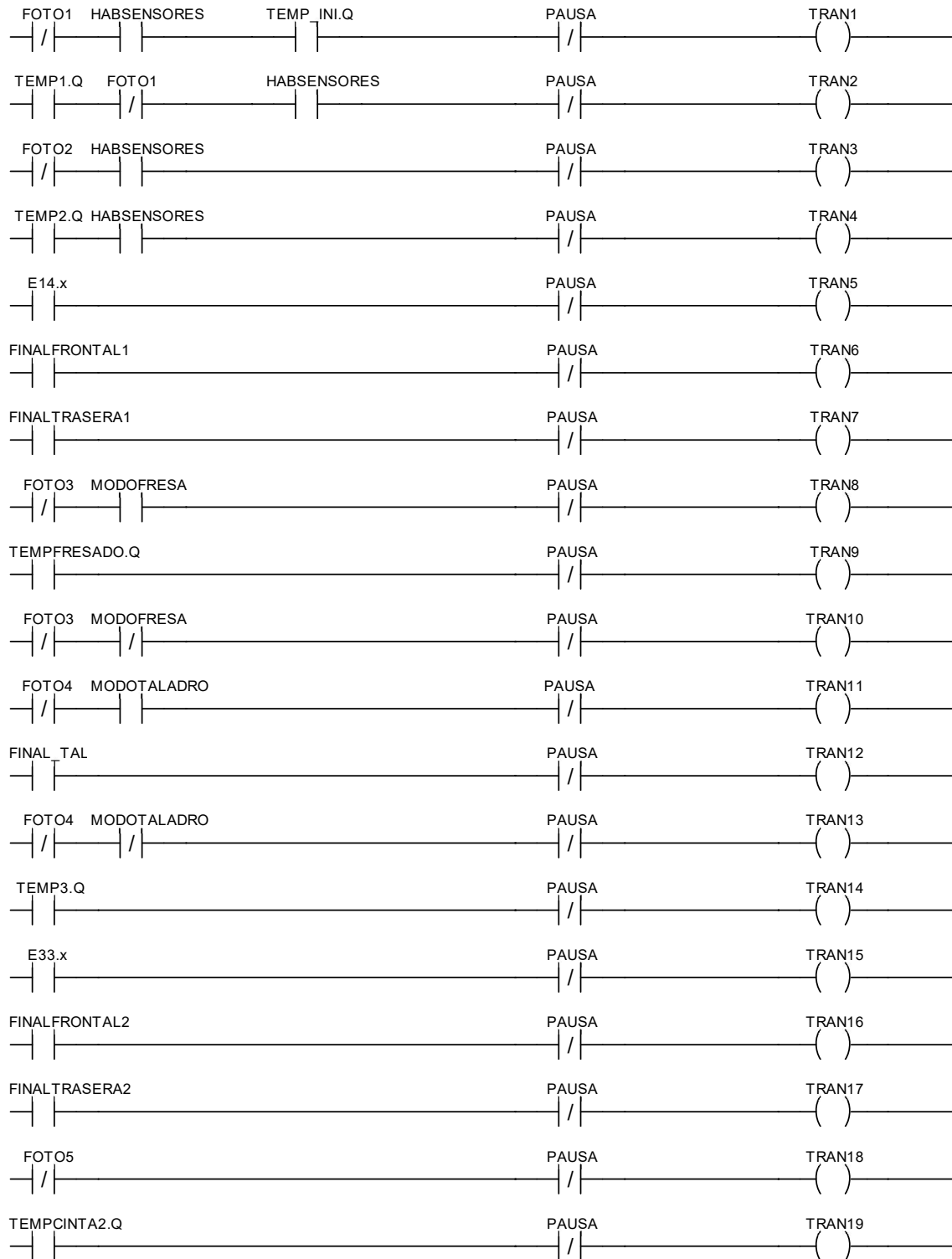


Figura 46

3.5. SALIDAS CONDICIONADAS

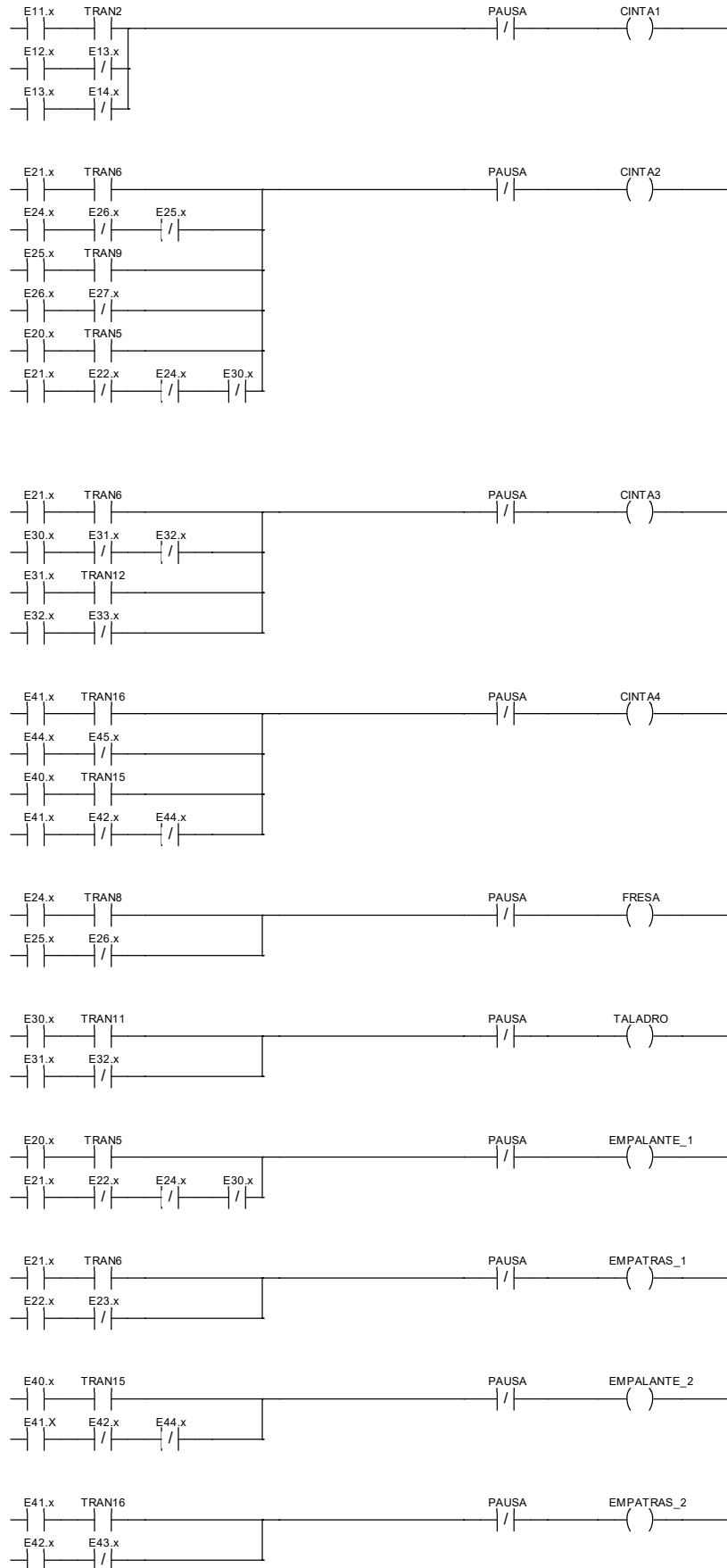


Figura 47

3.6. CONTADORES

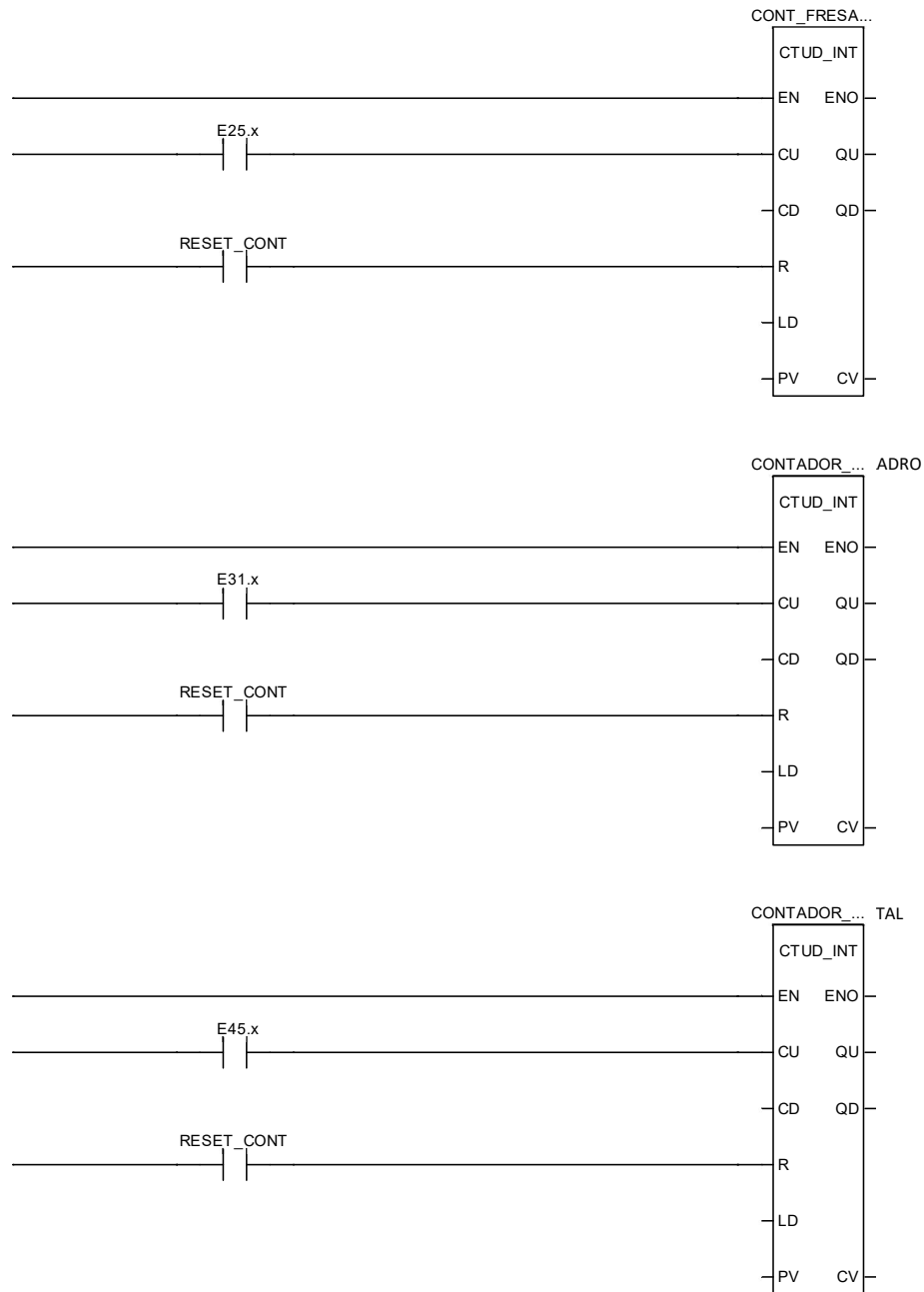


Figura 48

3.7. TEMPORIZADORES

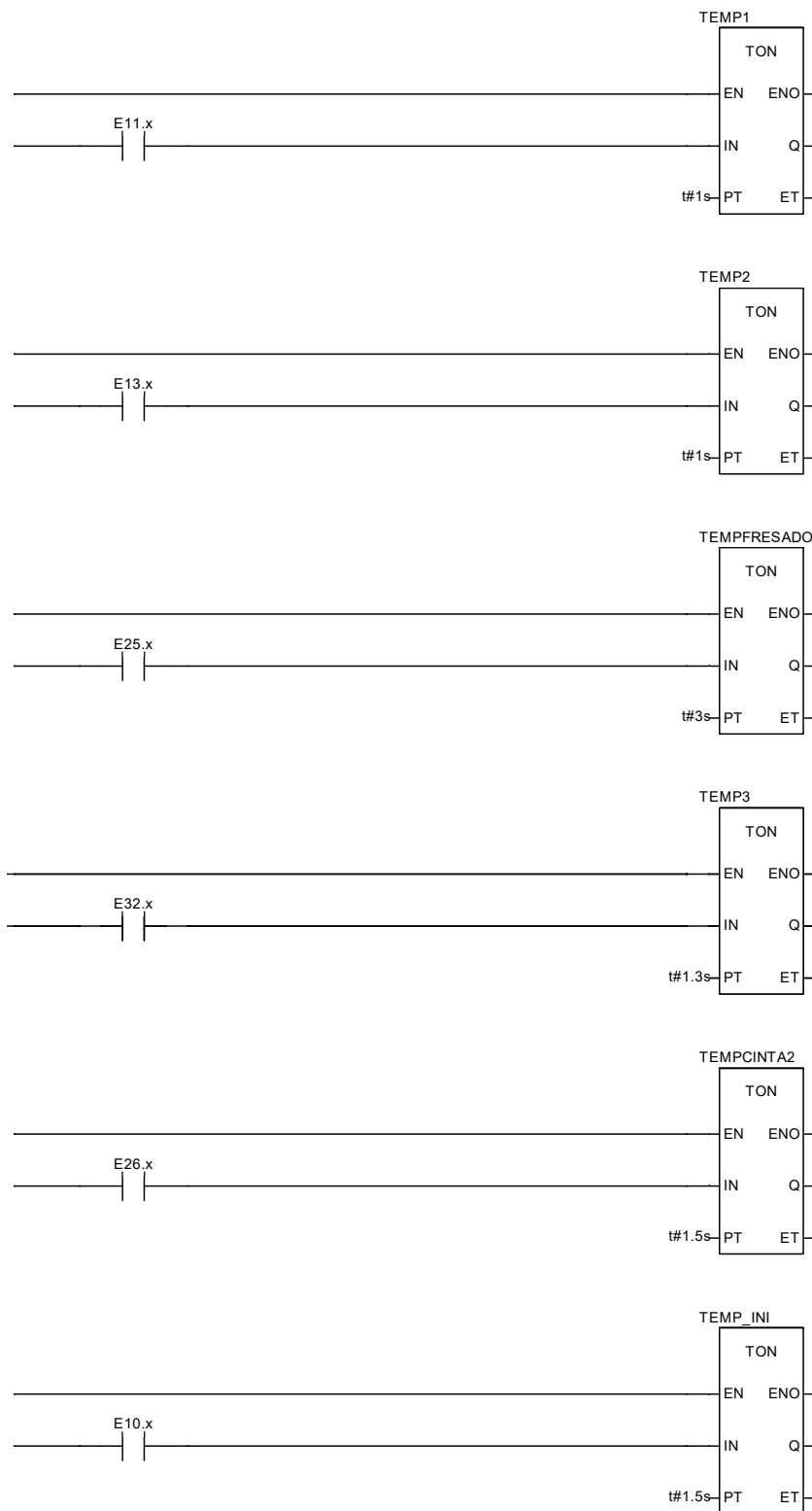


Figura 49

3.8. TABLAS PARÁMETROS BLOQUE PI_B

Descripción de los parámetros de entrada

Parámetro	Tipo de datos	Significado
PV	REAL	Salida del proceso a controlar
SP	REAL	Referencia
RCPY	REAL	Copia de la magnitud de posicionamiento efectiva
MAN_AUTO	BOOL	Modalidad de servicio del regulador: "1": Modalidad Automático "0": Modalidad de servicio Manual
PARA	Para_PI_B	Parámetro
TR_I	REAL	Entrada de inicialización
TR_S	BOOL	Mando de inicialización

Descripción de los parámetros de entrada/salida

Parámetro	Tipo de datos	Significado
OUT	REAL	Salida del accionador

Descripción de los parámetros de entrada/salida

Parámetro	Tipo de datos	Significado
OUTD	REAL	Salida diferencial: diferencia entre la salida de la ejecución actual y la anterior
MA_O	BOOL	Modalidad de servicio actual del bloque: "1": modo automático "0": otro modo (manual o tracking)
DEV	REAL	Valor de desviación (PV – SP)
STATUS	WORD	Palabra de estado

Descripción de los parámetros para Para_PI_B

Elemento	Tipo de datos	Significado
Id	UINT	Reservado para el ajuste automático del regulador
pv_inf	REAL	Límite inferior del rango del valor de la salida del proceso
pv_sup	REAL	Límite superior del rango del valor de la salida del proceso. La referencia también estará limitada según estos valores.
out_inf	REAL	Límite inferior del rango del valor de la acción de control
out_sup	REAL	Límite superior del rango del valor de la acción de control
rev_dir	BOOL	"1": acción directa del regulador PID "0": acción inversa del regulador PID Permite adaptar el sentido del regulador a la conexión accionador/proceso de medición
en_rcpy	BOOL	"1": si se usa la entrada RCPY
Kp	REAL	Componente proporcional (ganancia)
Ti	TIME	Tiempo de acción de integración
Dband	REAL	Zona de inestabilidad en desviación. Al llegar al punto de trabajo, la zona de inestabilidad permite limitar pequeños saltos de compensación respecto al valor del accionador: mientras la desviación sea inferior a <i>dband</i> (en valores absolutos), el módulo de función considera nulo este valor para el cálculo.
Outbias	REAL	Compensación manual de la desviación estática. Permite un ajuste preciso en el punto de trabajo si no hay ninguna componente integral (ti=0)

Modalidades de servicio

Modalidad de servicio	TR_S	MAN_AUTO	Significado:
Automático	0	1	Las salidas OUT y OUTD corresponden al resultado de los cálculos hechos por la función PI_B
Manual	0	0	El módulo no ajusta la salida OUT, de manera que el usuario puede modificar el valor directamente.
Tracking (prioritaria)	1	0 o 1	La entrada TR_I se transfiere a la salida OUT

Figura 50

