

Diseño e implementación de un sistema de automatización basado en PLC y HMI para equipos de proceso y envasado de productos lácteos para la empresa ESSI SAS

Diego Hernando Cáceres Vega¹, Universidad Santo Tomás de Aquino, Diego.caceres01@ustabuca.edu.co

Resumen - Este proyecto de grado expone el proceso de automatización llevado a cabo en una máquina de proceso y envasado de leche en diversas presentaciones. Se abarca la programación tanto del PLC como del HMI, implicando una minuciosa validación del funcionamiento de cada componente presente en las máquinas, tales como sensores, actuadores, controladores Festo, motores paso a paso, variadores de velocidad y bombas. Además, se incluye la creación de rutinas de programación, la implementación de animaciones de pantalla, variables de control y procesos de limpieza o producción, es necesario corroborar las diferentes rutinas para certificar que tanto el lavado de las máquinas como la entrada a producción cumplan con los estándares más altos de calidad, higiene y asepsia del producto final, el cual será entregado al público en general.

Palabras clave: Automatización, PLC, HMI, Envasadora, Festo, Esterilización, CIP, UHT, Esterilizador.

Abstract - This study presents the automation process carried out on a milk processing and packaging machine for various product presentations. It covers the programming of both the PLC and the HMI, involving a thorough validation of the operation of each component present in the machines, such as sensors, actuators, Festo controllers, stepper motors, variable frequency drives, and pumps. In addition, it includes the development of programming routines, the implementation of screen animations, control variables, and cleaning or production processes. It is necessary to verify the different routines in order to ensure that both the machine cleaning procedures and the production start-up meet the highest standards of quality, hygiene, and asepsis of the final product, which will be delivered to the general public.

Keywords: Automation, PLC, HMI, Packaging machine, Festo, Sterilization, CIP, UHT, Sterilizer.

I. INTRODUCCIÓN

Este artículo documenta el proceso de desarrollo de un proyecto de automatización encargado de la programación del PLC y HMI de un esterilizador de 10.000 litros hora y una

envasadora de leche. En este proyecto, se llevaron a cabo pruebas exhaustivas de adquisición de señales de entrada y salida, tanto digitales como analógicas. También se validaron diversas rutinas de ejecución, que incluyen etapas como el predesarrollo, desarrollo, dosificación, sellado, esterilización, CIP en el caso de la envasadora y CIP, pre-esterilización y producción en el caso del esterilizador. Las máquinas deben cumplir con precisión estas rutinas, además de generar los pesos específicos requeridos para cada presentación de producto, que pueden variar entre 250ml, 500ml, 900ml, 1000ml y 1100ml. La variación permitida en los pesos no debe exceder los 5ml, y se garantiza un sellado sólido tanto en sentido horizontal como vertical para asegurar la integridad del envasado del producto.

II. JUSTIFICACIÓN

Para abordar este desafío, es esencial comprender los diversos procesos que la máquina debe llevar a cabo. Estos procesos incluyen el proceso CIP (Cleaning in Place), Esterilización y Producción. Además, se requiere un profundo conocimiento en varias disciplinas de ingeniería para comprender e integrar sistemas tanto mecánicos como electrónicos. Implementar un sistema automatizado no solo mejora la calidad del producto, sino que también facilita el cumplimiento normativo, reduce los tiempos de parada y minimiza el desperdicio. Para lograrlo, se requiere una integración inteligente de varias disciplinas de la ingeniería. La ingeniería mecánica permite interpretar y optimizar ensamblajes y planos técnicos; la ingeniería electrónica asegura un control preciso a través de sensores, actuadores y paneles de control; y la ingeniería de automatización proporciona las herramientas necesarias para programar PLCs y HMIs que supervisan y controlan el proceso en tiempo real [1].

Siendo esto el punto fuerte para una empresa, tener el control del proceso en todo momento, reduciendo tiempos de parada de la máquina, solucionando problemas rápido, reduciendo el desperdicio de material de envase como de suministros industriales, esto presenta una ventaja para la competitividad de la empresa frente a otras, ya que automatizar estos

¹ Artículo científico presentado como opción de grado para optar por el título de Especialista en Automatización Industrial.

Autor de contacto: Diego Hernando Cáceres Vega. Ingeniero Mecatrónico. Universidad Santo Tomás de Aquino. Correo electrónico: diego.caceres01@ustabuca.edu.co. Teléfono: 322 809 7282

Director: William Razvan Castro Jaluba. Ingeniero Electricista. Máster en Redes y Sistemas de Comunicaciones. Universidad Santo Tomás. Grupo de Investigación en Aplicaciones Mecatrónicas (GRAM). Correo electrónico: williamrazban12@ustabuca.edu.co. Teléfono: 316 577 4847.

procesos es una decisión estratégica que impacta directamente en la productividad, calidad y sostenibilidad de la operación industrial.

III. ALCANCE

El alcance del proyecto involucra la construcción y puesta en funcionamiento de una máquina envasadora de cuatro cabezales diseñada para envasar leche junto a un esterilizador Ultra Alta Temperatura o Ultra-high temperature (UHT) de 10.000 litros-hora de capacidad. Estas máquinas serán instaladas en Bogotá - Colombia y estará destinada a la empresa LA GRAN VIA. El proyecto requerirá la implementación de programación en Controladores Lógicos Programables (PLC) y una Interfaz Hombre-Máquina (HMI). Para lograr la automatización completa, se llevará a cabo la verificación y validación de las rutinas de ejecución.

Además, se establecerá una interacción eficiente entre elementos de las marcas Siemens y Festo, donde Siemens proporcionará el control por medio de PLC, variadores de velocidad, sistemas de periféricas descentralizadas ET200, HMI, por otro lado, Festo se encargará del control de válvulas proporcionales, tarjetas drive para servomotores y motores paso a paso. A lo largo de este proceso, se revisarán todas las rutinas existentes y se agregarán nuevas rutinas de programación para integrar los elementos recién incorporados a la máquina.

Entre las mejoras, se incluye la transición del sistema de dosificación de servoasistido a uno controlado por un motor paso a paso de la marca Festo. También se realizará la configuración desde cero de variadores de velocidad, drivers, CPX (Controladores de Proceso Centralizados) y módulos de entradas y salidas. Es importante destacar que esta máquina envasadora y esterilizador son de la marca Siemens dando así confiabilidad y seguridad para el proceso y datos del cliente. El objetivo final es garantizar que la máquina envasadora y esterilizador cumplan los estándares de calidad, funcionamiento, seguridad y operatividad más altos para la industria láctea, entregando así al cliente dos equipos de última tecnología para el proceso y envasado de productos lácteos en Colombia.

IV. MARCO DE REFERENCIA

IV-A. Automatización industrial: Es la tecnología basada en la aplicación de complejos sistemas mecánicos, electrónicos y computacionales a la operación y control de la producción. Esta tecnología incluye entre otras cosas máquinas, herramientas automáticas para producir partes, sistemas automáticos de manejo de materiales, sistemas de control y retroalimentación de información para la calidad y la producción de sistemas computarizados de control de procesos [2], [3].

IV-B. SCADA: Es una aplicación o conjunto de aplicaciones de software especialmente diseñadas para funcionar sobre ordenadores de control de producción, con acceso a la planta mediante la comunicación digital con instrumentos y actuadores, e interfaz gráfica de alto nivel para el operador (pantallas táctiles, ratones o cursores, lápices ópticos, etc. [4].

IV-C. PLC: Un PLC (Programmable Logic Controller), también conocido como autómatas, es un dispositivo que se utiliza sobre todo en el ámbito industrial. Su finalidad, tal y como su nombre indica, es procesar de forma automática los datos en procesos industriales y controlar otros elementos periféricos como pueden ser motores, bombas, válvulas, etc. [5].

IV-D. Sensores: Son dispositivos electrónicos que están diseñados para detectar y responder ante cualquier tipo de entrada en un ambiente físico, las señales que manda una sonda las convierte en salidas y las redirige a una pantalla para su análisis [6].

IV-E. Actuadores Neumáticos: Es el tipo de actuador más común, cuya fuente de energía es el aire comprimido y que se mueve mediante un pistón cuando el aire se descomprime. Es una de las opciones más extendidas gracias a su facilidad de uso y su bajo precio de instalación, así como por ser resistente a las temperaturas, transporta y almacena fácilmente la potencia mecánica [7].

IV-F. Servo Drive: Son considerados el sistema central de los servomotores ya que en ellos residen las principales funcionalidades de los servos: perfil de movimiento, la aceleración, la velocidad y la deceleración. Es decir, estos controladores son los encargados de alimentar a los servomotores y al mismo tiempo interpretar y ejecutar las órdenes de movimiento que se mandan de forma directa o programada [8].

IV-G. HMI: Se trata de una Interfaz Humano-Máquina, la abreviación se debe por su nombre en inglés: Human-Machine Interface. Es decir, es la interfaz entre el proceso y los operarios de una fábrica, una línea de producción, una empresa o cualquier sistema donde sea necesaria la operación por parte de un humano. En sí, es un panel de instrumentos que el operario puede manipular para controlar un proceso [9], [10].

IV-H. Un variador de frecuencia por definición es un regulador industrial que se encuentra entre la alimentación energética y el motor. La energía de la red pasa por el variador y regula la energía antes de que ésta llegue al motor para luego ajustar la frecuencia y la tensión en función de los requisitos del procedimiento [11].

IV-I. Un relé de estado sólido (en inglés "Solid State Relays" o SSR) realiza la misma función que los relés mecánicos, pero se diferencian de estos porque no tienen partes móviles. Los relés de estado sólido son dispositivos semiconductores con una velocidad de conmutación muy superior a la de los relés electromecánicos, del orden de los 50 a 100 milisegundos [12].

IV-J. CPX-E El sistema de automatización CPX-E es un sistema potente de control y automatización especializado funcionalmente en el control del movimiento (Motion Control) para el sector de la técnica de manipulación. Está formado por diversos módulos de funciones, lo que contribuye a que la estructura del sistema sea muy flexible. En función de la combinación, el sistema de automatización

CPX-E puede dimensionarse y utilizarse como sistema de I/O remoto puro o como sistema de control [13].

V. ENVASADORA

La envasadora cuenta con cuatro cabezales donde cada uno es capaz de producir hasta 3000 litros hora dando un total de 12000 litros, produciendo 50 unidades de 1000ml por minuto, lo cual resulta en 3000 bolsas en una hora de 1000ml por cabezal, además de ello cuenta con un CIP es cual se encarga de hacer la limpieza con ácido y soda a toda la máquina, por medio de una bomba que hace recircular agua por las diferentes tuberías de la máquina, dependiendo de la fase de limpieza en la que este va a tener una solución diferente, y por un tiempo en específico además de mantenerse bajo ciertas condiciones como son temperatura estable y flujo.

Esta envasadora particularmente es de marca Siemens en sus diferentes elementos de potencia y control, como lo son, PLC, HMI, variadores de frecuencia, módulos de I/O, breakers, entre otros. Toda la programación es realizada en el software de TIA Portal, por medio de diferentes rutinas, como desarrollo, predesarrollo, esterilización, dosificación, entre otras. Igualmente es necesario integrar distintos elementos de marcas como Festo, donde tenemos presente un CPX-E para el control de diferentes válvulas para las rutinas de esterilización y CIP, drivers para el control del motor paso a paso encargado de la dosificación para el llenado de las bolsas y drives para el control de servo motores en la rutina de estiradores encargados de traer el plástico hacia la parte de delante de la máquina. Los diferentes elementos se muestran en las figuras 1, 2 y 3.

Figura 1. PLC, HMI, ET200 y CPX



Figura 2. Servo drivers estiradores y dosificadores

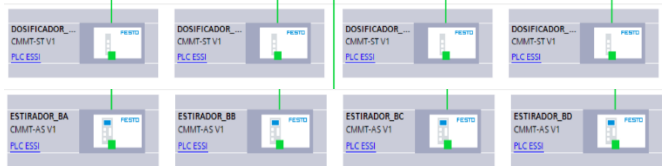


Figura 3. Variadores de velocidad



VI. SEÑALES DE ENTRADA Y SALIDA

Una vez terminada la construcción de la máquina y del tablero de control con todos sus elementos se procede a revisar una a una las diferentes conexiones desde la cometida, seccionar principal, interruptor principal, breakers,

variadores, y sus diferentes elementos de control como lo son PLC, HMI y módulos. Una vez verificada la información se procede a energizar la máquina y conectarse al PLC para hacer el cargue del programada de control igualmente se carga la pantalla HMI, posteriormente se configura las diferentes direcciones IP que van a llevar los elementos de control, como servo drivers, variadores y CPX. Al ejecutar lo anteriormente descrito, es momento de pasar a la verificación de señales de entrada y salida, tanto digitales como analógicas. Para ello es necesario buscar el bloque de funciones donde tenemos dichas señales y probar una a una, accionando el sensor correspondiente y verificando que llega la señal al PLC de manera correcta, correspondiendo al elemento y su nombre sea el correcto (ver figura 4).

Figura 4. Señales de entrada y salida



Figura 5. Señal de entrada sensores puertas

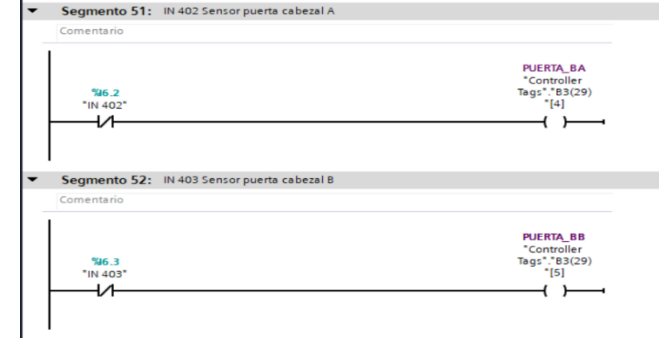


Figura 6. Señales de salida válvula de producto y moduladora

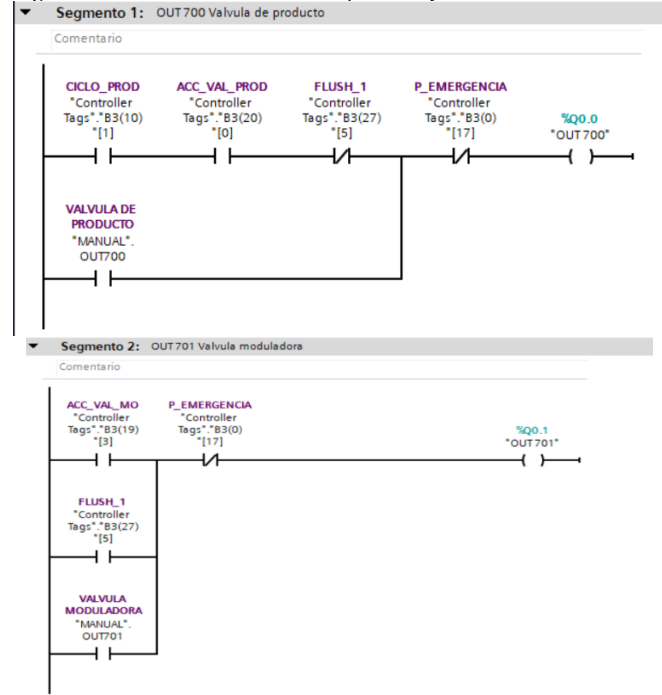
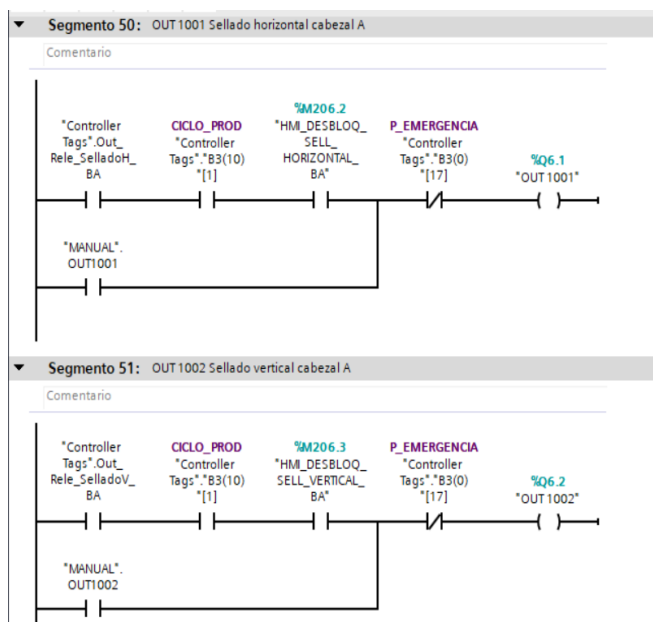


Figura 7. Señales de salida sellados

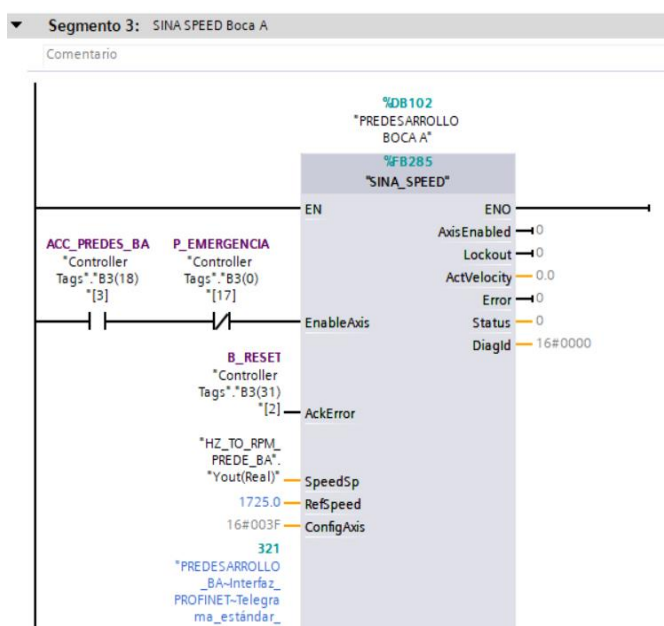


Lo anterior descrito es simplemente uno de los tantos ejemplos que tenemos de señales de entrada o salida digitales, para distintos elementos de la máquina, llegando a tener que comprobar más de 85 señales de entrada y más de 80 señales de salida digitales. Además de corroborar las señales en el CPX el cual este comunicado mediante comunicación profinet al PLC.

VII. CONTROL DE VARIADORES

En el caso de los variadores de velocidad, es necesario asociarle su respectivo bloque de función llamado SINA_SPEED el cual es el encargado de realizar la comunicación entre variador y PLC, dando así un control desde PLC y HMI a los diferentes motores presentes en la máquina, como lo son el desarrollo, predesarrollo, turbinas de extracción y inyección.

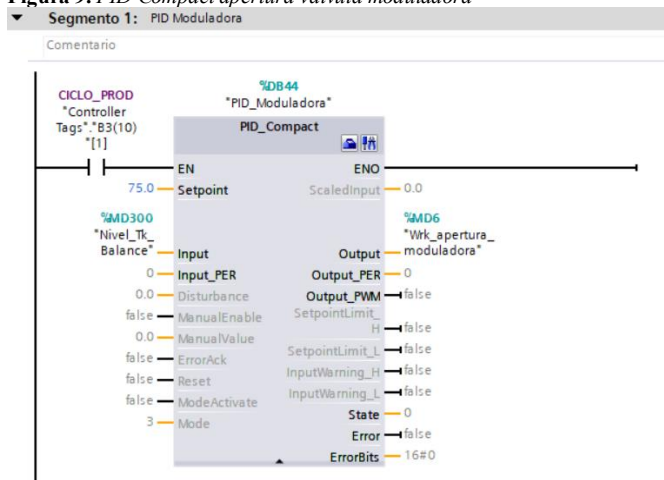
Este bloque cuenta con diferentes parámetros donde tenemos el EnableAxis el encargado de dar el arranque del variador, AckError es el encargado de resetear las diferentes fallas presentes en el variador, SpeedSp es donde se da la referencia a la que queremos que llegue nuestro motor, esta referencia es en rpms, RefSpeed se agregan las rpms máximas del motor, este dato está ubicado en la placa del motor, HWIDSTW y HWIDZSW son encargados de la comunicación telegram, la cual para un accionamiento tanto de arranque como de set point de velocidad se haga por profinet, se usa telegram estándar, si se quiere un arranque digital y referencia de velocidad por profinet se usa telegram libre.



VIII. CONTROL PID PARA APERTURA VÁLVULA MODULADORA

Para las diferentes señales de salida análogas tenemos que realizar los diferentes controles PID para cada una de las resistencias puestas en las mordazas vertical y horizontal correspondiente a cada cabezal, además de la apertura de la válvula moduladora, la cual es la encargada del suministro del producto al tanque de llenado, esto se debe a que es necesario mantener un nivel en el tanque estable en cada momento del proceso para así garantizar junto con la apertura del dosificador el peso exacto en cada una de las presentaciones de las bolsas de leche, para el control de esta válvula y para el control de temperatura se hace su correspondiente control PID gracias al PID Compact de Siemens para el caso de la válvula moduladora y PID Temp para las diferentes resistencias, todos estos PID fueron optimizados en modo de ajuste Optimización Fina.

Figura 9. PID Compact apertura válvula moduladora

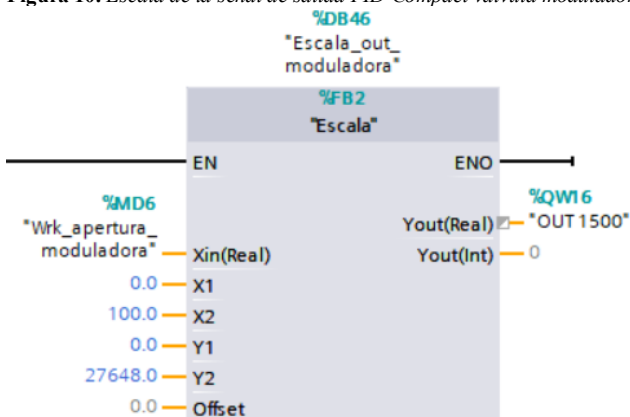


El PID Compact correspondiente a la válvula moduladora donde se establece el Setpoint al cual queremos mantener el tanque, la Input donde tendremos el sensor puesto en el tanque para la medición el cual es un sensor Vega, un sensor de presión; y por último la salida de apertura la cual es necesario

Figura 8. Control variador Predesarrollo

escalar para dar la salida por el módulo análogo de siemens el cual dará una señal entre 0 y 27648.

Figura 10. Escala de la señal de salida PID Compact válvula moduladora



IX. CONTROL DE SERVO MOTORES Y MOTORES PASO A PASO FESTO

Para el control de los elementos Festo, como lo son los servo motores del sistema estirador y motores paso a paso para el sistema de dosificación es necesario establecer comunicación entre la tarjeta drive la cual hará el puente entre el PLC y el motor, dando así un estado del motor y accionando el mismo a lo requerido en cada momento que se le solicite, dado que en producción en necesario modificar el valor de posición del motor paso a paso para cuadrar la dosificación final y la posición del avance en el sistema estirador debido a que se deben manejar diferentes presentaciones.

Figura 11. Control servo motor sistema estirador

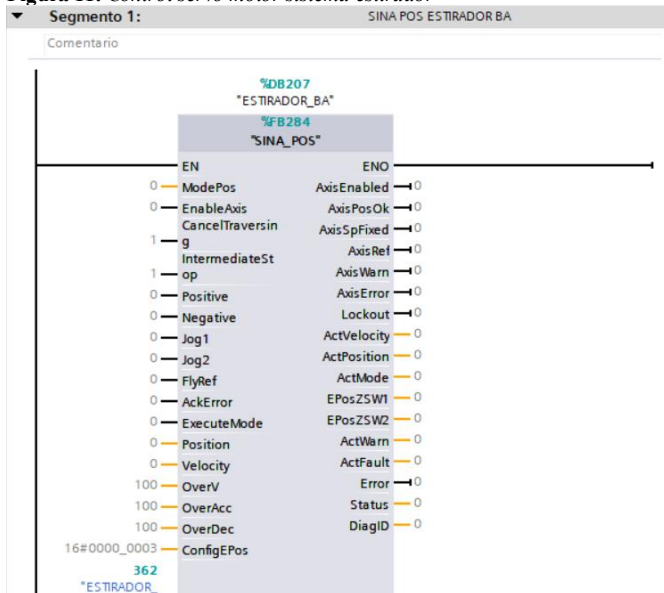
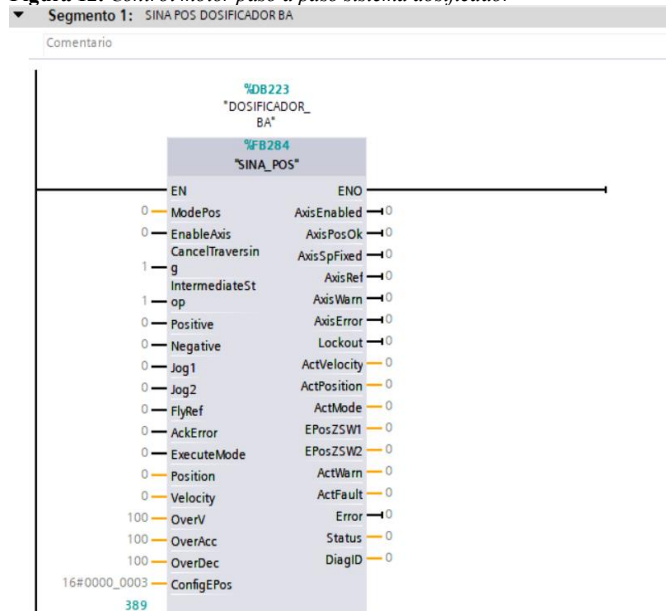


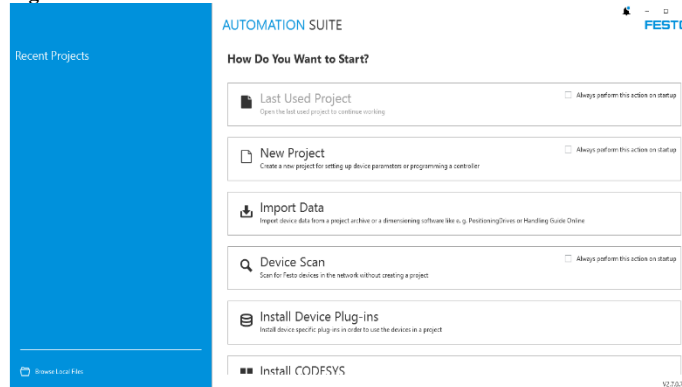
Figura 12. Control motor paso a paso sistema dosificador



X. CONFIGURACIÓN DRIVE FESTO

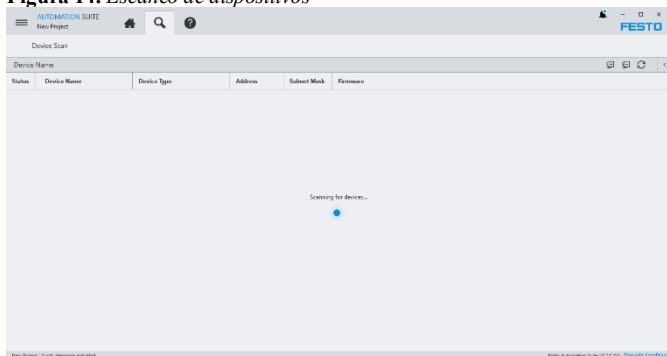
Para poder tener control desde el PLC y posteriormente la HMI es necesario cargar diferentes parámetros a la tarjeta drive Festo, esto se realiza mediante el software propio del fabricante llamado Festo Automation Suite, el cual nos permite cambiar el nombre a la tarjeta drive, cambiar la dirección ip tanto del puerto de configuración como del puerto de comunicación, para poder configurar y tener un buen rendimiento en los motores servo y paso a paso, es necesario ciertos parámetros, los cuales se verán a continuación. La figura 13 muestra como luce esta aplicación.

Figura 13. Festo Automation Suite



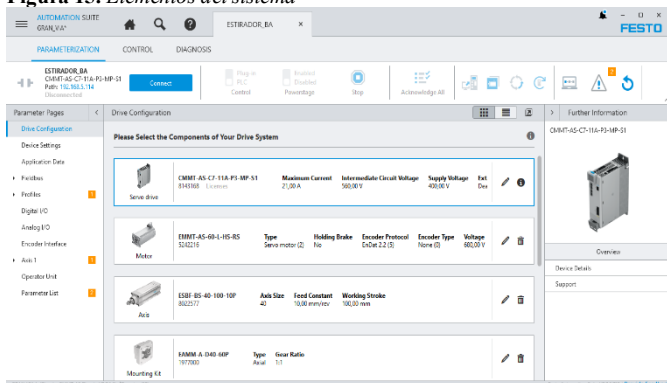
En este apartado del software tendremos la posibilidad de abrir el último proyecto realizado, un proyecto nuevo, importar datos o escanear dispositivos. Por este motivo, es importante para que podamos reconocer que tarjetas Festo que tenemos conectadas a la red, desde este apartado podremos cambiar la dirección IP del puerto de configuración, que será por el cual vamos a cargar toda la configuración de la tarjeta.

Figura 14. Escaneo de dispositivos



Una vez configurada la dirección IP y nombre de la tarjeta, es necesario seleccionar los elementos presentes en el sistema, los cuales son, motor, actuador y acople.

Figura 15. Elementos del sistema



La selección de estos elementos se hace acorde al sistema, las características de la máquina y recomendaciones del proveedor de estos elementos, una vez seleccionados y agregados al software de Festo, se requiere revisar el voltaje de entrada y el medio de activación del drive, para este ejemplo la máquina estaba alimentada a una red trifásica 440 y su activación iba a ser por medio de fieldbus.

Figura 16. Alimentación de la tarjeta y vía de activación del drive

Supply Voltage

Mains voltage: V

Enable Servo Drive

Activation via:

Es necesario especificarle que tipo de comunicación va a trabajar, esto debido a que estas tarjetas en especial vienen para multiprotocolo, lo cual nos permite trabajarlas para profinet, Ethernet/IP, ModbusTCP o EtherCAT, en este caso vamos a trabajar profinet para la suite de siemens.

Figura 17. Selección de comunicación

Prepared Values

Fieldbus Configuration

RTE Configuration (user defined):

RTE Configuration next:

Una vez seleccionado la comunicación y elementos del sistema, vamos a configurar el método de homing o método de referencia del servo, esto es importante debido a que se necesita tener la referencia 0 clara del sistema, ya que al manejar diferentes presentaciones este actuador va a tener que cambiar su recorrido.

Para cumplir con la distancia requerida para cada presentación, este método homing se realiza enviándolo a método de homing negativo stop -17, esto para que el detecte el 0 y de ahí para atrás sea posición negativa, y de ahí hacia adelante sea posición positiva, la cual vamos a usar para hacerlo bajar la distancia deseada. Este homing lo hace en base a un % de corriente, una vez encuentra una obstrucción mecánica la cual no lo deja moverse más este eleva su corriente y es donde decimos que llego al punto 0 o punto de referencia.

Figura 18. Método de Homing

Homing Method

Method:

Move to axis zero point after homing: ☒ Active

Activation Save zero offset: ☐ Active

Homing Parameters

	Velocity [m/s]	Accel. [m/s ²]	Jerk [m/s ³]
Crawl	0,005	1,00	100,00
Search	0,01	1,00	100,00
Running	0,05	1,00	100,00

Es necesario darle un tiempo prudente para que haga el homing, ya que este proceso lo hace a una velocidad lenta, validando un buen recorrido y el alcance del % de la corriente nominal para verificar que encontró el punto 0, además de esto se le da un offset pequeño para que el actuador tenga la posibilidad de moverse un poco hacia la parte de atrás, sin llegar a mostrar un fallo, esto puesto que lo hace a velocidades muy altas y la probabilidad de que llegue a desfasarse unos milímetros del punto cero es considerable.

Figura 19. Tiempo de homing y porcentaje de corriente nominal

Homing timeout: s

Nominal current limit value scaling factor:

Limit position detection time monitoring window: s

Axis Configuration

Reversing direction of motion: ☒ Active

Axis zero point offset: mm

Software limit positions active: ☒ Active

Negative software limit position: mm

Positive software limit position: mm

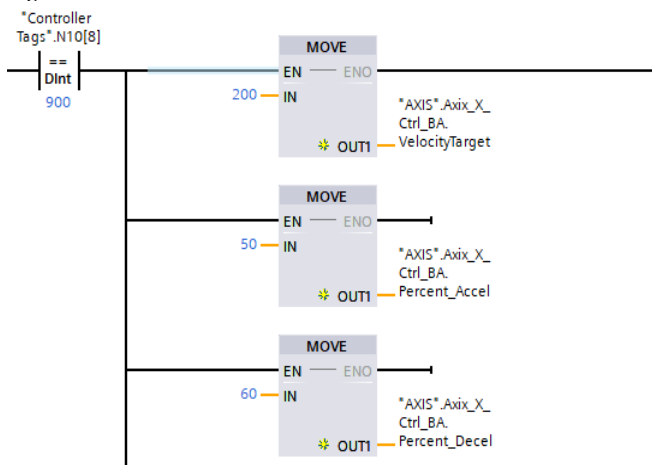
Una variable importante a la hora de configurar estas tarjetas es el factor de las unidades, esto debido a que así mismo es como se deberá enviar la información desde el PLC a la tarjeta, ya que estos serán los varoles que va a tomar, y las distancias que va a recorrer, entonces es importante determinar este factor.

Figura 20. Factor de unidades para posición y velocidad

Factor Group	
Actual user unit	Metric [m, m/s, ...] (6)
Position	-6
Velocity	-3

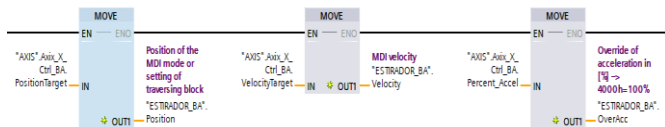
Una vez realizado el cargue de estos parámetros a la tarjeta drive y de corroborar la comunicación con el bloque de sina_pos en TIA portal, procedemos a enviar los parámetros de distancia, velocidad, aceleración, desaceleración y sobre velocidad, esto se hace por presentación.

Figura 21. Envío de datos a servo estirador



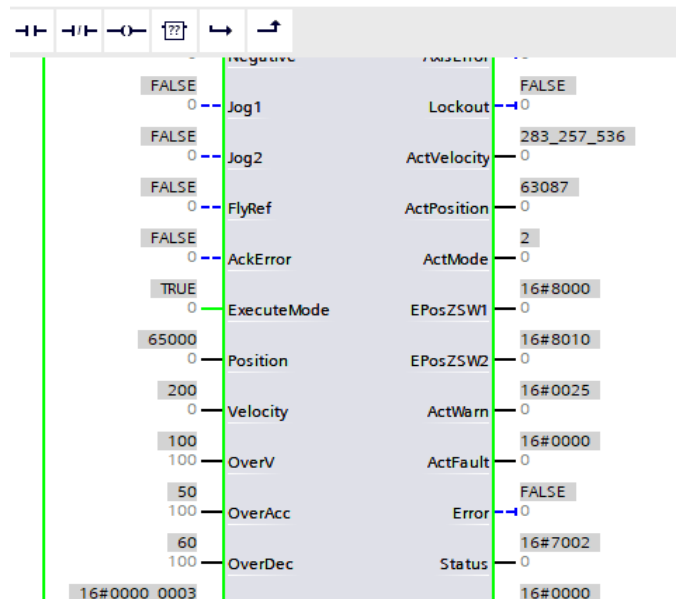
Estos son los datos que van a llegar al bloque del sina_pos, para ser ejecutado por la tarjeta.

Figura 22. Datos a bloque Sina Pos



Una vez que todos estos datos son enviados al bloque este se encarga de ejecutarlos y se puede ver su ejecución cíclica en tiempo real, directamente en ese mismo bloque. Donde se puede apreciar, la posición deseada, la velocidad, aceleración y desaceleración, junto a retroalimentación de estas, donde la posición cumple con lo requerido.

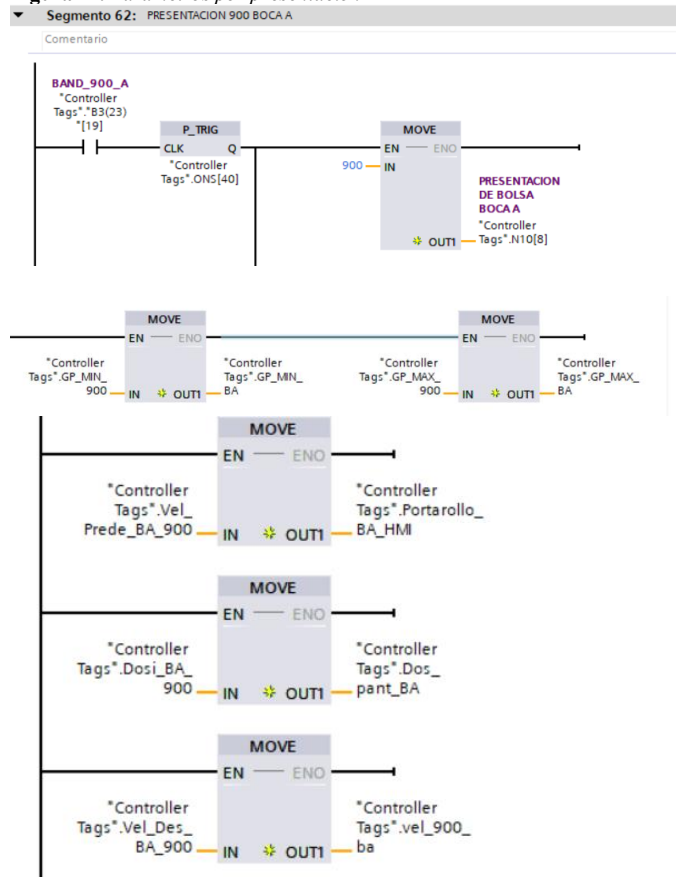
Figura 23. Datos en bloque Sina Pos

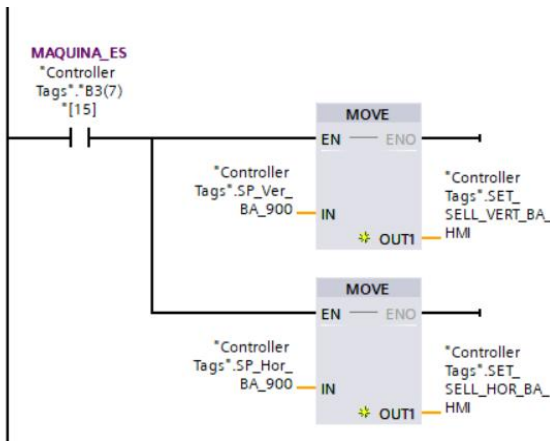


XI. PRESENTACIONES POR CABEZAL

Cada cabezal debe ajustar sus parámetros según la presentación a manejar, de forma automática, esto se logra seleccionando la presentación y los valores anteriormente ajustados en pruebas serán cargados correspondientemente, entre estos valores se encuentran los golpes máximos y mínimos o unidades por minuto máximas y mínimas, velocidad de arranque del sistema de predesarrollo, velocidad de desarrollo, dosificación y temperaturas de sellado vertical y horizontal.

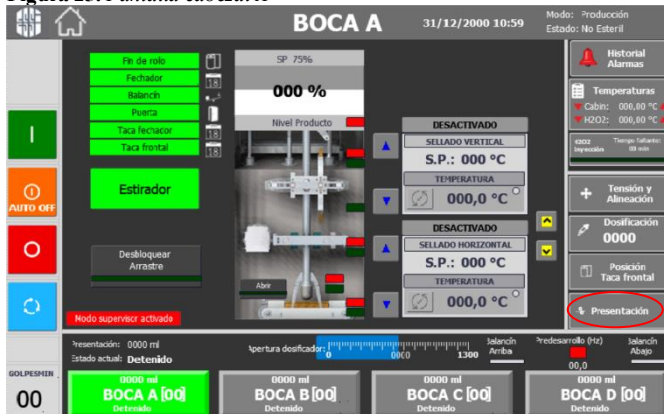
Figura 24. Parámetros por presentación





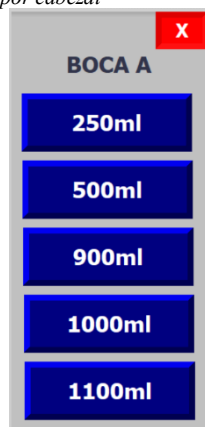
Estás presentaciones se seleccionan desde pantalla en el apartado de presentaciones, el cual está ubicado en la parte derecha inferior de cada pantalla de cabezal.

Figura 25. Pantalla cabezal A



Desplegando la ventana de presentaciones, mostrada a continuación.

Figura 26. Presentación por cabezal



Igualmente en la figura 26 se muestra el control total de cada cabezal, donde se puede ver un historial de alarmas, temperaturas del sellado vertical y horizontal, dosificación, velocidad del predesarrollo, posición del sistema balancín, estado actual de la máquina, el porcentaje de llenado del tanque de balance, las fallas presentes, como lo pueden ser, fin de rollo, fechador, balancín alto o bajo por mucho tiempo, puerta abierta, taca fechador no detecta, taca frontal no detecta, además los botones encargados de resetear fallas, detener la máquina, preparar la máquina, y darle inicio, ya sea en modo

automático o paso a paso, donde se empieza por el sistema estirador, pasando al sistema de sellado vertical, bloqueo del desarrollo para arrastrar plástico, sellado horizontal y dosificación, siendo así posible llevar el plástico de la parte de atrás de la máquina a la parte delantera, sellándolo en su parte vertical, dosificando el producto, sellando en la parte horizontal y a su vez cortando, por otro lado, se imprime la fecha de lote, vencimiento y hora de producción.

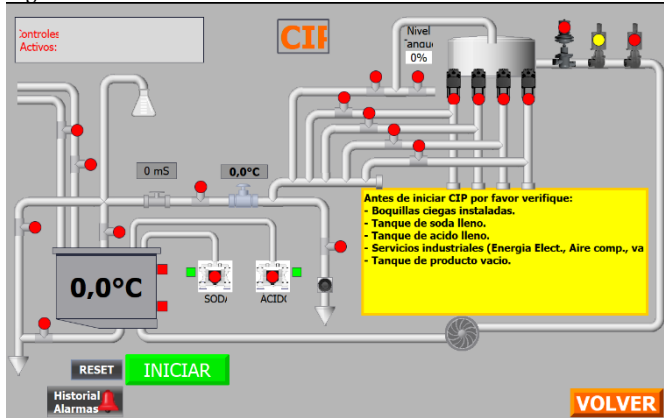
XII. CIP DE LA ENVASADORA

Antes de ser posible envasar producto es necesario lavar la máquina, esto se realiza mediante un proceso de limpieza en sitio o CIP (Cleaning in Place), el cual se encarga de limpiar toda la tubería por donde va a fluir producto, como lo son tubos dosificadores, tanque de balance, entrada a la válvula de producto y moduladora, esta limpieza tiene diferentes pasos, los cuales son necesarios cumplir tanto por tiempos, temperaturas y concentraciones de químicos, esto para garantizar un buen lavado en las tuberías y elementos de contacto con producto, inicialmente se realiza un enjuague, el cual introduce agua al tanque CIP de la máquina.

Una vez lleno este tanque, se recircula esta agua a la tubería para ser posteriormente enviado al drenaje, luego de esto, se hace un primer enjuague donde se recircula agua por 5 minutos, por toda la tubería sin llegar a ser drenado antes de cumplir este tiempo, luego de esto se drena esta agua, para posteriormente introducir nueva agua y empezar a cumplir condiciones para un primer lavado con soda, estas condiciones son de temperatura, donde debe alcanzar una temperatura establecida para empezar a introducir la solución alcalina, la cual debe llegar a una concentración especificada por el área de calidad de la empresa, esta concentración se mide por medio de un conductímetro, el cual se encarga de enviar una señal de 4-20mA según una escala configurada en el dispositivo.

Una vez alcanzadas estas condiciones, la solución alcalina será recirculada por un tiempo establecido por el departamento de ingeniería de ESSI, esto con el fin de garantizar la limpieza de la máquina, una vez terminado este paso, drena toda la solución para posteriormente introducir agua nueva recircular, y drenar la solución de agua y soda que haya quedado en la tubería, una vez realizado estos pasos anteriores se repite el mismo ciclo para una solución ácida, introduciendo ácido a una concentración específica, para finalmente dar un enjuague final, el cual removerá cualquier residuo de las soluciones anteriormente descritas, permitiendo así una limpieza total de la máquina. En este proceso es necesario abrir en su totalidad los dosificadores, válvulas de asiento inclinado de retornos, retorno del tanque de balance. Una vez finalizado este proceso, se dará paso a la esterilidad de la máquina, para posteriormente entrar en producción.

Figura 27. CIP Automático



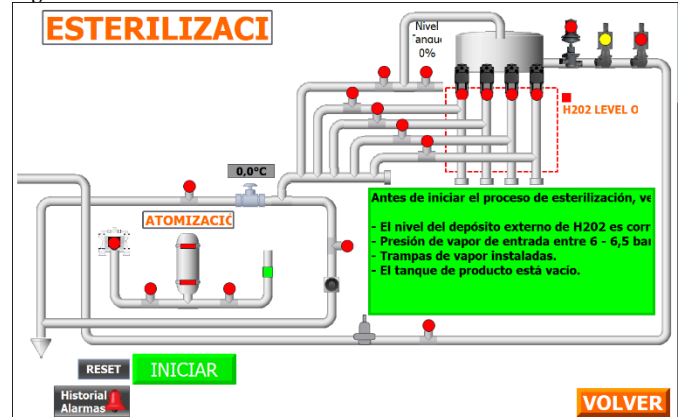
Todo este ciclo de CIP es controlado de forma automática por el PLC y HMI, mediante una rutina de limpieza la cual tiene todos los pasos descritos anteriormente, además de las confirmaciones de las diferentes condiciones ya sea de temperaturas, concentraciones, nivel, posicionamiento de los dosificadores y válvulas de accionamiento, dosificación de químicos, apertura de válvula de cip y moduladora. Este proceso es totalmente automático, sin embargo es necesario que el operario de la máquina, se encargue de llenar los tanques de químicos, además de dar inicio al ciclo CIP, en dado caso de tener un fallo o alarma es necesario que el operario lea detenidamente el tipo de falla o alarma, para ser corregido lo más pronto posible y dar continuidad al ciclo CIP de la máquina.

Desde Programación de HMI, se detalla el estado de las válvulas mediante señales de entrada, las cuales son finales de carrera de confirmación de apertura de las válvulas, o sensores inductivos en el caso de la válvula de CIP, igualmente mediante el control de los motores paso a paso es posible tener la información actual de la posición de apertura de los mismos, en dado caso que estas aperturas cambien de la posición establecida, es necesario dar alarma de esto, y si se mantiene dar fallo de posición, lo cual repercutirá en el ciclo de limpieza, siendo así cancelado y necesario comenzar de nuevo.

XIII. ESTERILIZACIÓN

Una vez finalizado el proceso de CIP es necesario esterilizar la máquina, por lo cual es necesario llenar los tanques internos de peróxido, esto con el fin de limpiar toda posible suciedad en el plástico, una vez llenados, se da inicio a una entrada de vapor, en todos los tubos de la misma, a su vez se llena un tanque de atomización, el cual se encargará mediante una boquilla ubicada en el interior de la cabina, inyectar peróxido a toda la máquina y sistemas de la misma, esto con el mismo fin de remover cualquier suciedad de la máquina, una vez atomizada la cabina, se deja un tiempo en contacto, para luego dar un tiempo de enfriamiento y la esterilidad de la máquina quedaría lista.

Figura 28. Esterilización

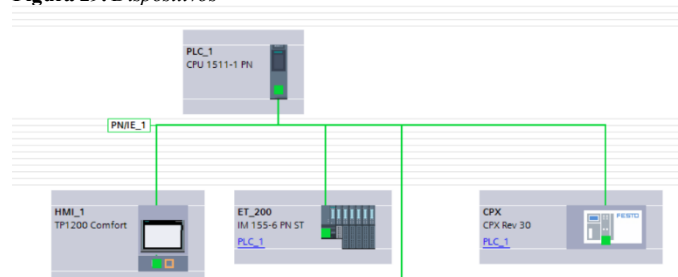


Mediante programación de PLC y HMI es necesario coordinar estas rutinas, dándole tiempos, set points de temperaturas, accionamiento de válvulas, posicionamiento de motores paso a paso, accionamiento de bombas para inyección de peróxido, en caso de que algún paso no se cumpla en los tiempos o condiciones requeridas, se dará un estado de fallo, para que el operador pueda revisar que está pasando, todo este proceso funciona de forma automática, mediante una programación de PLC y visualización en tiempo real en HMI.

XIV. ESTERILIZADOR

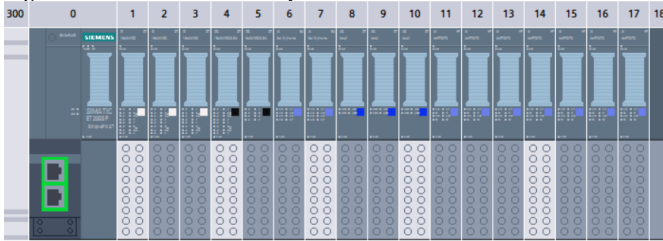
El esterilizador UHT T10 es el equipo encargado de llevar a la esterilidad del producto a envasar, por medio de esta máquina, se realiza el proceso de limpieza de la tubería por donde va a fluir la materia prima, además de limpiar la válvula de producto de la envasadora ya que es esta la encargada de dar ingreso hacia la máquina para su posterior envasado, este esterilizador debe cumplir con el ciclo CIP en tiempos, temperaturas y concentraciones de químicos, los cuales son soda y ácido, se puede utilizar desinfectantes adicionales, pero es por petición del cliente, debe cumplir con una pre esterilización lo que hace es cumplir, con unas temperaturas específicas las cuales hacen que la materia prima, quede libre de bacterias i/o organismos no aptos para el consumo humano, siendo este un proceso delicado, en el cual se debe vigilar en todo momento, la temperatura de esterilidad, es por ende que una buena programación y visualización en tiempo real por medio de una HMI es completamente necesario para un buen proceso, para llegar a cabo a cumplir con estos estándares y supervisiones es necesario contar con una programación de PLC y HMI, adquisición de señales de entrada, señales de salida, variadores de velocidad, cpx, periferia descentralizada, actuadores neumáticos.

Figura 29. Dispositivos



Para dar cumplimiento a estándares de calidad, supervisión y seguridad, se usan marcas conocidas en el mercado, como lo son Siemens y Festo, para el control de PLC se usa la marca Siemens, de igual forma para la HMI y periferia descentralizada, mientras que para el control de válvulas se usará una periferia de Festo, más conocida como CPX, el cual nos ayudará a controlar la activación o no de electroválvulas, mediante la periferia descentralizada de Siemens, la ET200 vamos a tener diversos módulos de entradas y salidas digitales, entradas y salidas analógicas y módulos de RTD's. Esto con el fin de adquirir y controlar todas estas señales presentes en la máquina, para su correcto funcionamiento.

Figura 30. Módulos de entradas y salidas



XV. SEÑALES DE ENTRADA Y SALIDA

Figura 31. Señales digitales de entrada

```
1 /////////////////////////////////////////////////// ENTRADAS DIGITALES //////////////////////////////////////
2
3
4 "AKL".DI."AUX BREAKER B1" := "DIN_100";
5 "AKL".DI."AUX BREAKER B2" := "DIN_101";
6 "AKL".DI."AUX BREAKER B3" := "DIN_102";
7 "AKL".DI."SEÑAL UPS" := "DIN_103";
8 "AKL".DI."FARO EMERGENCIA" := "DIN_104";
9 "AKL".DI."SN-1 SENSOR NIVEL BAJO TK BALANCE" := "DIN_105";
10 "AKL".DI."SN-2 SENSOR NIVEL MEDIO TK BALANCE" := "DIN_106";
11 "AKL".DI."SN-3 SENSOR NIVEL ALTO TK BALANCE" := "DIN_107";
```

Para la adquisición de señales de entrada digitales, se realiza mediante el uso del lenguaje SCL, el cual nos permite programar el PLC, con una interfaz parecida a un C++ o programación de código, estas señales son las provenientes de auxiliares de breakers, sensores de nivel, sensores inductivos, paso de emergencia, sensores de flujo, contadores de litros, señales de fallo o alarma.

Figura 32. Señales digitales de salida

```
//////////////////////////////////// SALIDAS DIGITALES //////////////////////////////////////
"DOUT_400" := "AKL".DQ."BALIZA PRODUCCION";
"DOUT_401" := "AKL".DQ."BALIZA PREPARACION";
"DOUT_402" := "AKL".DQ."BALIZA ALARMA/FALLO";
// "DOUT_403" := "AKL".DQ."BALIZA SIRENA";
```

Mediante la activación de señales digitales de salida, podemos mostrar el estado de la máquina, los cuales pueden ser, en producción, preparación o ciclo CIP y alarma o fallos en la máquina, sin embargo tenemos más señales de salida de tipo digital, las cuales se hacen presente en el módulo del cpx de la marca Festo.

Figura 33. Señales de salida CPX

```
//////////////////////////////////// CPX //////////////////////////////////////
"CPX_10" := "CPX".DQ."V21 AGUA POTABLE";
"CPX_11" := "CPX".DQ."V20 AUTOLAVADO TK BALANCE";
"CPX_12" := "CPX".DQ."V23 CIP EXTERNO";
```

A su vez tenemos señales de entrada analógicas, las cuales, nos permiten revisar el caudal que está pasando por el equipo, y la concentración de los químicos, entre otras señales.

Figura 34. Señales de entrada analógicas

```
//////////////////////////////////// ENTRADAS ANALOGICAS //////////////////////////////////////
"AKL".AI_420."FT1 CAUDALIMETRO" := "AIN_600";
"AKL".AI_420."CT CONDUCTIVIMETRO" := "AIN_601";
```

Por otro apartado tenemos las señales provenientes de las RTD's, en este apartado debemos recibir estas señales y dividirlas en 10 debido a que el módulo de Siemens me presenta una lectura mayor por ende se debe realizar este ajuste para conseguir la temperatura real de la rtd.

Figura 35. Señales de RTD

```
//////////////////////////////////// RTD //////////////////////////////////////
"AKL".AI_RTD."TT1 ALIMENTACION" := "RTD_1100";
"AKL".AI_RTD."TT2 HOMOGENEIZACION" := "RTD_1101";
"AKL".AI_RTD."TT3 ESTABILIZACIÓN" := "RTD_1102";
"AKL".AI_RTD."TT4 PRE CALENTAMIENTO PARA ESTERILIZACION" := "RTD_1103";
"AKL".AI_RTD."TT5 ESTERILIZACIÓN" := "RTD_1200";
"AKL".AI_RTD."TT6 SALIDA PRODUCTO DEL Q5" := "RTD_1201";
"AKL".AI_RTD."TT7 ENVASADO" := "RTD_1202";
```

Salidas Analógicas para el control de válvulas moduladoras de la marca Samson, por medio de una señal de 4-20mA se realiza el debido control de estas válvulas, no sin antes realizar una calibración en la válvula, esto debido a que la válvula debe reconocer su recorrido, ya que esto varía dependiendo de el vaso donde se acople el vástago que hace sello del actuador.

Figura 36. Señales analógicas de salida

```
//////////////////////////////////// SALIDA ANALOGICA //////////////////////////////////////
"AOUT_800" := "AKL".AQ_420."VMP-1 MOD. ESTERILIZACION";
"AOUT_801" := "AKL".AQ_420."VMP-2 PRECALENTAMIENTO";
```

Las válvulas moduladoras Samson, requieren de un posicionador para su respectivo control y modulación, por medio de un posicionador de la marca Samson referencia trovis 3730-1 se logra este control, es aquí donde se conecta la señal analógica proveniente del módulo del PLC, una vez que se energice el posicionador se deben ajustar ciertos parámetros, como son; señal 4-20mA, rango máximo del actuador, posición de apertura, por último se da una inicialización la cual es la encargada de ajustar la posición de apertura y cierre del actuador máxima a la que puede llegar el actuador. Una vez completado este proceso, se pueden dar diferentes valores analógicos para certificar la apertura modular de la válvula.

Figura 37. Posicionador Trovis 3730-1



Fuente: Samson [14]

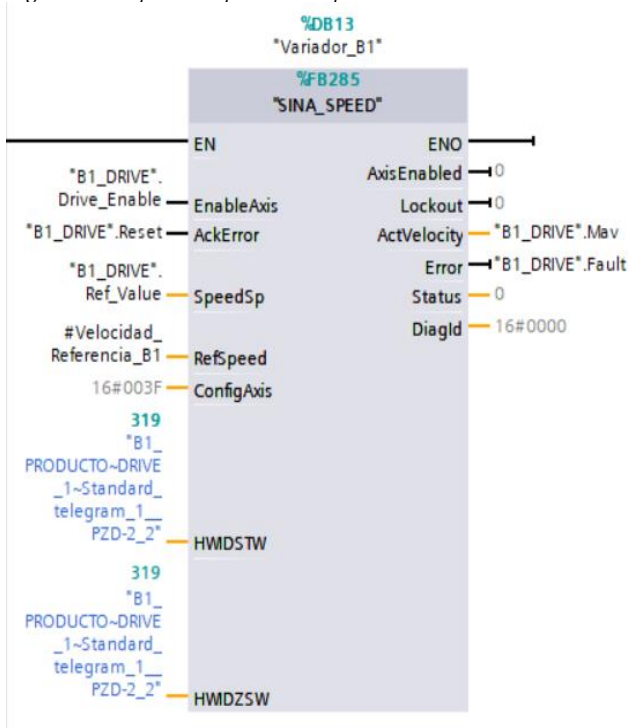
Igualmente será necesario controlar bombas para los sistemas de producción, agua caliente y regenerativo, los cuales se encargan de ayudar a aumentar las temperatura en las diferentes calandrias del equipo, puesto que es un esterilizador tubular. Esto se hará mediante el uso de variadores de velocidad siemens de referencia G120X.

Figura 38. Variadores control bombas



Una vez agregados los diferentes variadores de velocidad en el proyecto se debe establecer la comunicación y referencias a trabajar, esto se realizará mediante el bloque Sina_Speed el cual nos permitira tener el control de la velocidad y arranque de las bombas.

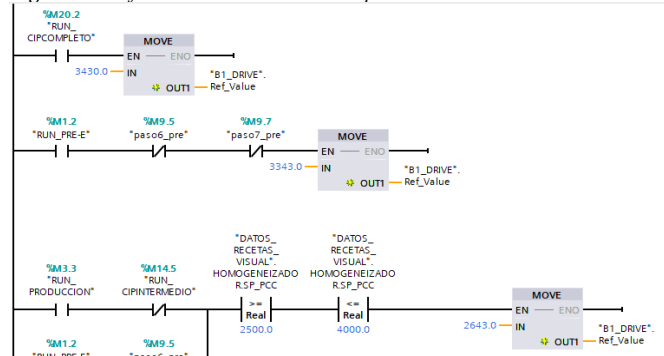
Figura 39. Bloque sina_speed bomba producto esterilizador



Al igual que en la envasadora, este bloque nos permite dar el arranque de la bomba, resetear errores, dar una referencia de velocidad y su respectiva comunicación de telegram.

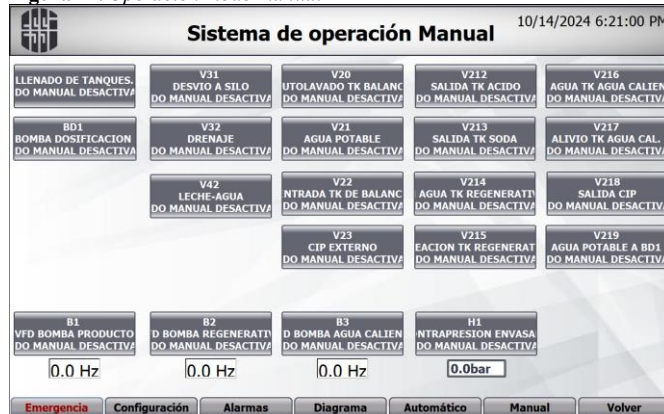
Por parte de programación la referencia de velocidad debe cambiar, esto debido a que en cada rutina la bomba debe trabajar a una velocidad específica, por ende es necesario ajustarlas. La figura 40 representa un ejemplo de las velocidades, sin embargo maneja más set points de velocidades, de acuerdo a otras rutinas o condiciones específicas.

Figura 40. Referencias velocidad bomba producto



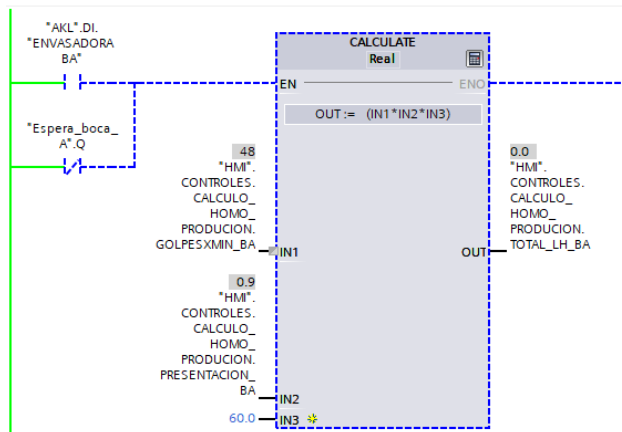
Con fin de probar el accionamiento de las diferentes válvulas y bombas, se tiene un apartado de operación en modo manual, el cual nos ayuda a dar accionamiento de estas válvulas para corroborar físicamente que se estén accionando de manera correcta.

Figura 41. Operación modo manual

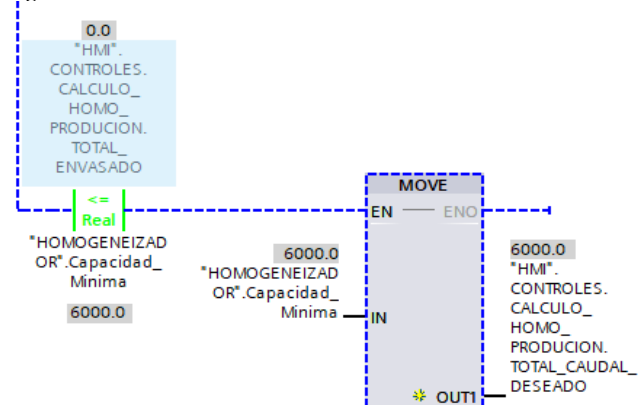


Aunque el modo manual es necesario para corroborar el accionamiento de las diferentes válvulas, es necesario restringir el uso de las mismas en procesos automáticos, es por ello que el modo manual, solo estará disponible cuando el equipo no esté en ninguna de las rutinas posibles del mismo, con el fin de evitar accionamientos no deseados en rutinas automáticas, que puedan afectar el proceso o integridad del operario.

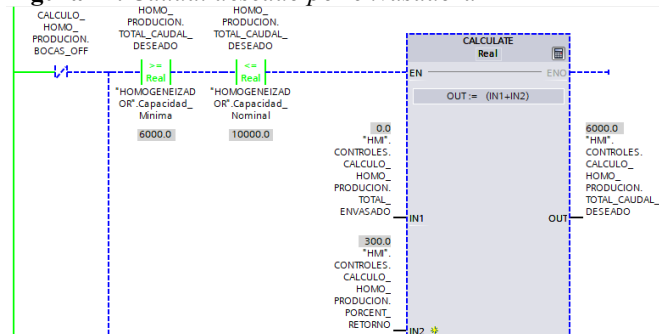
Para este equipo se tiene un apartado de producción donde es necesario realizar el caudal del equipo según los cabezales que están en funcionamiento, esto debido a que el caudal debe adecuarse automáticamente a lo requerido por la máquina envasadora para mantener un flujo constante y un nivel estable en el tanque de balance de la máquina, para ello se desarrolló un cálculo de caudales por boca, donde se tiene el cálculo del caudal por boca, la suma de los caudales activos, y el retorno al tanque de balance del UHT, esto con el fin de mantener una presión en la línea, este cálculo se realiza, tomando los golpes de cada cabezal, la presentación que maneja y el tiempo por hora, un ejemplo sería, trabajar un cabezal a 48 golpes, presentación de 900ml por una hora o 60 minutos, lo que resulta en, un caudal deseado de 2,592 Litro/Hora, por cabezal.

Figura 42. Cálculo de caudal por cabezal

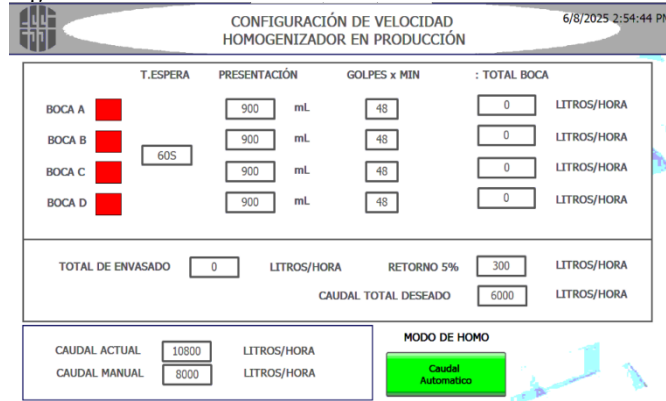
Es importante tener en cuenta que el equipo funciona con un caudal mínimo que es equivalente al funcionamiento de dos cabezales, es decir unos 6000 Litros/hora, por ende, es necesario limitar este caudal, sin importar a que golpes o cuantos cabezales están funcionando, y limitar el caudal máximo que es de 10000 Litros/hora, por ende, si el cálculo del caudal queda por debajo de 6000 litros, este enviara los 6000 litros de manera automática al caudal deseado.

Figura 43. Caudal mínimo

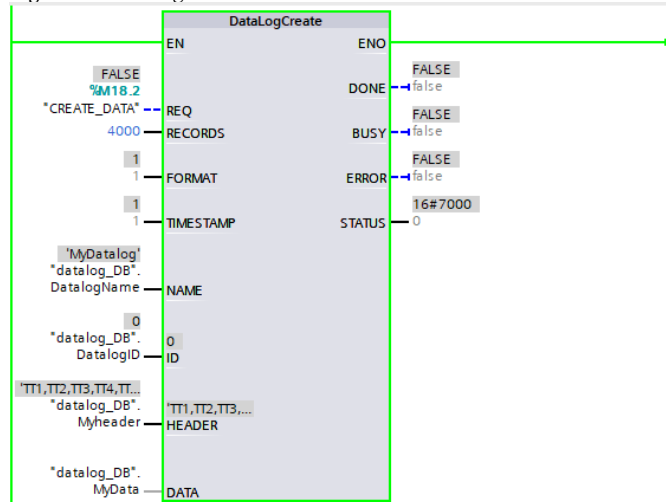
Mientras que si el caudal es mayor al caudal mínimo 6000 litros y menor a la capacidad máxima 10000 litros, el cálculo del caudal deseado por cabezal se hará efectivo y enviara este valor exacto, al homogenizador para que este cumpla con el caudal requerido para que la máquina trabaje en condiciones óptimas, este cálculo y operación automática es importante, debido a que el equipo debe mantener un caudal ideal para la envasadora y evitar que al dejar un caudal manual, se pueda llegar a caramelizar la leche puesto que esta va a estar recirculando en el equipo constantemente.

Figura 44. Caudal deseado por envasadora

Para ello se dispone de una pantalla, la cual fue adecuada para que el operario del equipo pueda poner los golpes que van a trabajar por cabezal y la presentación, allí podrá ver que caudal será el requerido por cabezal y la suma de todos los que estén funcionando más su respectivo % de retorno, el cual se suma a este caudal total deseado.

Figura 45. Pantalla caudal

Por otra parte, en este equipo se realizó una toma de datos, mediante el uso de un data log, esto con el fin de reunir información de diferentes variables del equipo, como lo puede ser temperaturas, presiones, velocidades de los variadores y caudal del equipo, para ser posteriormente analizados por el equipo de ingeniería y ver la eficiencia del equipo en los diferentes procesos de CIP, Esterilización y Producción. Para esto se creó un DataLog, con un número de 4000 datos para guardar, cada 30 segundos.

Figura 46. DataLog

Los datos por guardar para ser analizados posteriormente, son temperaturas del proceso, presiones, caudal, y velocidades de bombas.

Figura 47. Variables DataLog

	Name	Data type	Start value	Monitor value
4	Myheader	String	'TT1,TT2,TT3,T...	'TT1,TT2,TT3,TT4,T...
5	MyData	Struct		
6	TT1	Real	0.0	20.8
7	TT2	Real	0.0	19.3
8	TT3	Real	0.0	18.5
9	TT4	Real	0.0	18.3
10	TT5	Real	0.0	19.0
11	TT6	Real	0.0	3276.7
12	TT7	Real	0.0	19.0
13	TT8	Real	0.0	21.9
14	TT9	Real	0.0	23.6
15	TT10	Real	0.0	19.1
16	TT11	Real	0.0	23.8
17	TT12	Real	0.0	19.7
18	TT13	Real	0.0	20.5
19	TT14	Real	0.0	21.4
20	TT20	Real	0.0	20.0
21	TT22	Real	0.0	21.1
22	TT23	Real	0.0	172.6
23	SP1	Real	0.0	0.001808449
24	B1	Real	0.0	0.0
25	B2	Real	0.0	0.0
26	B3	Real	0.0	0.0
27	LO1	Int	0	1

En el webserver del PLC, quedará el archivo csv, el cual nos permitirá descargar y revisar los datos en un Excel, dando así la posibilidad de analizarlos y graficar las diferentes variables de interés.

XVI. REFERENCIAS

- [1] A. Ortiz, *Programación de PLC, HMI y comunicaciones en la industria*. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente y Celsia S.A., 2018.
- [2] A. Ollero, S. Boverie, R. Goodall, J. Sasiadek, H. Erbe, y D. Zuehlke, «Mechatronics, robotics and components for automation and control», *Annu Rev Control*, vol. 30, n.º 1, pp. 41-54, 2006, doi: 10.1016/j.arcontrol.2006.02.002.
- [3] J. Iqbal, M. Raza, S. Zain, y A. Attayyab, «Automating industrial tasks through mechatronic systems – a review of robotics in industrial perspective», *Tehnicky vjesnik - Technical Gazette*, vol. 23, n.º 3, pp. 917-924, 2016, doi: 10.17559/TV-20140724220401.
- [4] K. Raghunandan, «Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)», en *Textbooks in Telecommunication Engineering. Era of the Internet and Network Science/Engineering*, T. El-Bawab, Ed., Suiza: Springer Nature, 2022, pp. 321-337. doi: 10.1007/978-3-030-92188-0_16.
- [5] H. Zhang, «Optimization and Innovation of Industrial Control Systems Based on PLC», *Advances in Computer, Signals and Systems*, vol. 8, n.º 4, pp. 12-19, 2024, doi: 10.23977/acss.2024.080403.
- [6] S. Sharma, A. Kumar, y R. Verma, «Implementation of Arduino Controlled Automated Model for Automatic Processing of Milk Packets in Dairy Industry», *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, vol. 9, n.º 8, pp. 172-179, 2018, [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/2j9deu>
- [7] S. Davis, «Pneumatic Actuators», *Actuators*, vol. 7, n.º 3, pp. 62-65, 2018, doi: 10.3390/act7030062.
- [8] H. K. Li, L. Z. Song, H. S. Li, L. S. Huang, y Y. Yin, «A Study on the Position and Velocity Control of AC Servo System Using Discrete Sliding Mode Predictive Algorithm», *Applied Mechanics and Materials*, vol. 29-32, pp. 2018-2024, 2010, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.29-32.2018.
- [9] H. P. Singh y P. Kumar, «Developments in the human machine interface technologies and their applications: a review», *J Med Eng Technol*, vol. 45, n.º 7, pp. 552-573, 2021, doi: 10.1080/03091902.2021.1936237.
- [10] E. Ruíz, J. Inche, y A. Chung, «Desarrollo de una interfaz hombre máquina orientada al control de procesos», *Industria Data*, vol. 11, n.º 1, pp. 70-72, 2008, [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/816/81611211010.pdf>
- [11] L. Pabón, J. Díaz, y A. Pardo, «Simulación del inversor multinivel de fuente común como variador de frecuencia para motores de inducción», *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, vol. 7, n.º 1, pp. 165-180, 2016, doi: 10.19053/20278306.v7.n1.2016.5636.
- [12] X. Zhang y H. Zhang, «The accelerated life experiment study of Solid State Relay», en *2011 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering*, IEEE, 2011, pp. 349-351. doi: 10.1109/ICQR2MSE.2011.5976628.
- [13] F. Castillo, «Diseño y construcción de un PLC didáctico para el laboratorio de electrónica», Trabajo de grado, Universidad Veracruzana, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.uv.mx/instru/files/2021/01/Tesis_Francisco_Cast.pdf
- [14] Samson, «TROVIS 3730-1. Posicionador electroneumático». [En línea]. Disponible en: <https://www.samsongroup.com/es/equipos/accesorio/s/detalles/accessorytype/trovis3730-1/>