

## Aplicación de PAC y HMI para la automatización de un proceso de electrodeposición de metales

### Application of PAC and HMI for the automation of a metal electroplating process

E. Flores-García <sup>a</sup>, J.C. Quezada-Quezada <sup>b</sup>, R.V.H. Calderón-Medina <sup>c</sup>,  
E.J. Jiménez-San Juan <sup>d</sup>, J.M. Meléndez-Morales <sup>e</sup>

---

#### Abstract:

This paper introduces a proposal for the application of automation technology to control and monitor an electroplating process, which is manually carried out in a micro-industry located in the municipality of Tizayuca, by means of a *GE PACSystems RX3i* and the development of a control algorithm in the Ladder Diagram language in the programming environment *Proficy Machine Edition*, as well as an HMI designed in the software *Cimplicity Workbench*. Electroplating or electrodeposition is a finishing process that consists of coating objects with metals by applying electric current; in this case, copper, nickel and brass on a *zamac* alloy. In such a process, to control the exact duration of time that the material must be immersed in the acid solutions of each stage is required in order to guarantee a high quality in the product final finishing and optimize overall production times. Automation at industries guarantees safer, faster, and product uniform quality production processes, among many more attributes; this work constitutes a terminal academic project of practical application, with a focus on the automation of industrial-type processes, with implementation and integration of technology through the development of a technological model whose purpose is to simulate and validate the operability and functionality of the proposed system.

#### Keywords:

*Automation, Electrolysis, Electroplating, HMI, PAC.*

---

#### Resumen:

El presente trabajo presenta una propuesta de aplicación de tecnología de automatización para controlar y monitorear un proceso de galvanoplastia, que se efectúa manualmente en una microindustria ubicada en el municipio de Tizayuca, mediante un *PACSystems RX3i* de *GE* y el desarrollo de un algoritmo de control en lenguaje Diagrama Escalera en el entorno de programación *Proficy Machine Edition*, así como una HMI diseñada en el software *Cimplicity Workbench*. La galvanoplastia o electrodeposición es un proceso de acabado que consiste en el recubrimiento de objetos con metales aplicando corriente eléctrica; en este caso cobre, níquel y latón sobre aleación de *zamac*. En tal proceso, se requiere controlar la duración exacta de tiempo que el material debe estar sumergido en las soluciones ácidas de cada etapa, para garantizar una alta calidad en el acabado final del producto y optimizar tiempos globales de producción. La automatización en las industrias garantiza procesos productivos más seguros, rápidos y con calidad uniforme en los productos, entre muchos atributos más; este trabajo constituye un proyecto académico terminal de aplicación práctica, con enfoque a la automatización de procesos de tipo industrial, con implementación e integración de tecnología mediante la elaboración de un modelo tecnológico cuyo propósito es simular y validar la operatividad y funcionalidad del sistema propuesto.

#### Palabras Clave:

*Automatización, Electrodeposición, Electrólisis, Galvanoplastia, HMI, PAC.*

---

<sup>a</sup> Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Tizayuca | Tizayuca-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-4606-8217>, Email: [efloresg@uaeh.edu.mx](mailto:efloresg@uaeh.edu.mx)

<sup>b,c,d,e</sup> Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Tizayuca | Tizayuca-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-3125-3708>, Email: [jcarlos@uaeh.edu.mx](mailto:jcarlos@uaeh.edu.mx); <https://orcid.org/0000-0002-7292-6051>, Email: [rafael\\_calderon@uaeh.edu.mx](mailto:rafael_calderon@uaeh.edu.mx); <https://orcid.org/0009-0004-1840-0413>, Email: [jj401862@uaeh.edu.mx](mailto:jj401862@uaeh.edu.mx); <https://orcid.org/0009-0000-2457-2431>, Email: [me347608@uaeh.edu.mx](mailto:me347608@uaeh.edu.mx).

## Introducción

Dentro del sector de la industria manufacturera, el recubrimiento electrolítico es un proceso altamente demandado por una amplia cantidad de empresas que buscan dar una apariencia distinta a las piezas que fabrican, o proporcionar mayor resistencia a metales que no poseen características para soportar condiciones ambientes como la humedad y el calor.

Desde hace varios años, HEBIMEX (Hebillas y Aplicaciones de México) es una microempresa dedicada al recubrimiento electrolítico con cobre, níquel y latón de piezas de *zamak*, donde un operador realiza de manera manual el control del proceso; asimismo, el monitoreo se realiza mediante métodos comunes de medición, como termómetros analógicos de mercurio para la temperatura, amperímetro para la corriente (DC) y pH-metro para el nivel de acidez o de alcalinidad en las disoluciones de cada contenedor en cada etapa del proceso donde las piezas se sumergen.

En el proceso de galvanoplastia que se desarrolla en HEBIMEX, se requiere del control preciso de las variables; la temperatura, factor muy importante para lograr la electrólisis; el nivel de las soluciones en los contenedores, puesto que las piezas deben de cubrirse por completo; el amperaje que fluye por los conductores hasta llegar a las piezas que se van a tratar, para lograr eficazmente la electrodeposición; y el pH, para evitar que el grado de acidez sobrepase el nivel adecuado.

Gracias a la implementación de tecnología de control y automatización industrial, es posible desarrollar el proceso con mayor eficacia tal que garantice el cumplimiento de características de calidad deseadas en el producto final. El presente proyecto comprende la puesta en marcha de un modelo tecnológico del proceso integrando tecnología de automatización, lo que incluye un *PACSystems RX3i* de *General Electric* con sus respectivos módulos de salidas discretas (MLD754) y de entradas discretas (MLD230), además de una HMI.

## Galvanoplastia

El proceso de galvanoplastia o electrodeposición, es una práctica del sector metalúrgico con el que se logra mejorar las propiedades de los metales, como: el aumento de resistencia a la corrosión, al ataque de sustancias químicas, a la fricción, al daño por impactos, la durabilidad y la apariencia con fines decorativos, mediante su recubrimiento con otro metal; para hacerlo posible, es necesario contar con elementos como Vcc, una solución de sales metálicas y el metal que se usará como

recubrimiento. Hoy en día, la galvanoplastia está inmersa en varios sectores, como la industria automotriz, joyería, electrónica, ferretería, entre otros; este tratamiento que se le da a las piezas pertenece al sector llamado Tratamiento y revestimiento de metales; maquinado de acuerdo al CIU (Clasificación Industrial Internacional Uniforme) [1].

Tomando en cuenta que existen varias empresas dedicadas a desarrollar esta actividad, es importante señalar que se genera impacto adverso al medio ambiente, debido a la cantidad de aditivos, ácidos y cianuros añadidos durante el proceso y, en consecuencia, a las emisiones de gases ácidos y alcalinos que provienen de los contenedores [2]; por esto, adicionalmente, como trabajo futuro, para tratar de mitigar esos estragos, se considera implementar enjuagues con agua a presión que se pueda reciclar al proceso por medio de filtros.

## Zamak

Es la materia prima principal para el proceso de electrodeposición; se trata de una aleación cuyo nombre es un acrónimo que hace referencia a las primeras letras de los nombres (en alemán) de los elementos metales de los que se compone; *Z*ink, *A*luminium, *M*agnesium y *K*upfer (cobre). El *zamak* no es un metal propiamente, sino, como ya se mencionó, una aleación de varios, gracias a la cual se obtiene un material resistente que se puede utilizar en diversas aplicaciones; una de sus características principales es que tiene alto grado de reproducción de detalles, al momento de crear duplicados de piezas, hacer llaveros, hebillas, elementos decorativos, figuras, refacciones automotrices, accesorios para prendas, herramientas, carcasas, entre otras [3].



Imagen 1. Ejemplo de piezas procesadas por Galvanoplastia. Fuente: elaboración propia.

## Sensores y actuadores para el proceso de galvanoplastia

### Sensores

Elementos creados para detectar acciones o estímulos, medir variables, y responder en consecuencia; existen diferentes tipos en función de las necesidades de los sistemas y procesos. En el de galvanoplastia, se han de medir y regular variables determinantes de su correcto funcionamiento [4], como posición, nivel, temperatura, pH, tiempo y corriente.

### Sensor fin de carrera

Interruptor que se abre o cierra por el contacto físico del objeto a detectar; son de tipo discreto, enviando dos señales al PAC (0,1) [4].

### Transductor

Elemento que convierte una determinada manifestación de energía de entrada, en otra diferente de salida; transforma una magnitud física en una señal eléctrica normada.

### Pre-actuadores

Dispositivos utilizados para el funcionamiento de un motor eléctrico; operan con una señal de control normada de 24 Vcc. Realizan su función entre el sistema de control y el sistema de potencia.

### Actuadores: Motor eléctrico

Su función principal es generar energía mecánica, esto es, proporcionar fuerza y en consecuencia desplazamiento; el uso de servomotores específicamente, es indispensable para regular la velocidad de movimiento y aprovechar el torque constante, para que al aumentar o disminuir la carga o el peso, la velocidad se mantenga invariable gracias al sistema de engranes que caracterizan a este motor, y al tipo de encoder incremental y absoluto [5].

### Driver de control para motores

Dispositivo que permite controlar los motores de corriente continua; estos controladores permiten manipular los voltajes y corrientes que se suministran al motor para controlar su sentido de giro; el driver está constituido por dos circuitos electrónicos y una parte conformada por electrónica de potencia que es la encargada de suministrar corriente para producir el movimiento.

## PAC

El PACSystems RX3i de General Electric posee todas las características esperadas de un PLC, incluyendo la conectividad al Internet Industrial. Se trata de potentes Controladores de Automatización Programables (PAC; Programmable Automation Controller) modulares,

especializados en alta disponibilidad. Los RX3i integran un control individual y un entorno de programación universal para facilitar la portabilidad de aplicaciones entre múltiples plataformas de hardware [6].

## Protocolo Ethernet

Ethernet/IP es un protocolo de comunicación de red por niveles, de gran funcionalidad para aplicaciones de automatización industrial, que se basa en los protocolos estándar TCP/IP utilizando hardware y software Ethernet para establecer un nivel de protocolo para configurar, acceder y controlar dispositivos de automatización industrial [7].

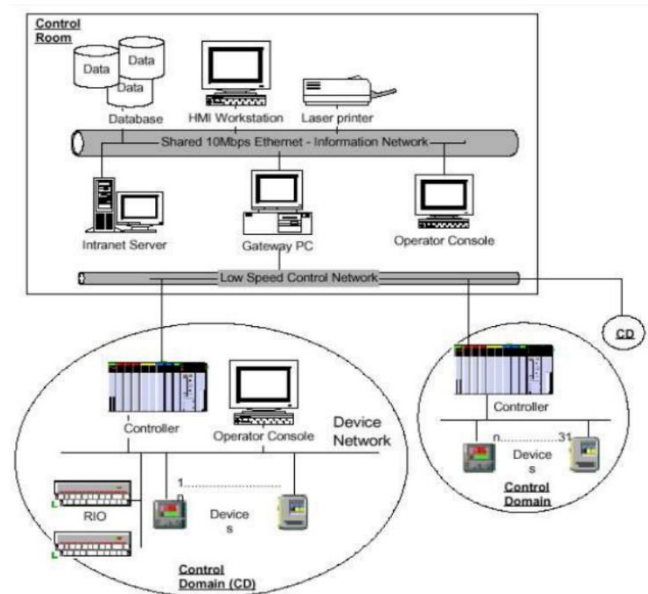


Imagen 2. Ethernet en el nivel de información de redes industriales. Fuente: Estándares de Ethernet, Ethernet/IP y otros.

El uso de Ethernet en plantas industriales es cada vez más extenso, entre otras razones, por su buena relación prestaciones/costo y por su capacidad de soportar el uso de tecnologías de fibra óptica, cables eléctricos y comunicaciones inalámbricas en un único sistema. Además, la Industria 4.0 y el Internet Industrial de las Cosas (IIoT; Industrial Internet of Things) así lo exige. Otra ventaja es que las tecnologías TCP/IP asociadas a Ethernet proporcionan una infraestructura de red que se puede gestionar de forma unitaria [8].

## Planteamiento del problema

En la microindustria HEBIMEX, se desarrolla el proceso de galvanoplastia manualmente por un operador, quien inicia

introduciendo las piezas a recubrir dentro del depósito denominado barril perforado, fabricado de polímero termoplástico (ver Imagen 3); posteriormente, vierte los metales cobre, níquel y latón dentro de contenedores, fabricados en fibra de vidrio para aprovechar su propiedad térmica, aislante eléctrica, de rigidez, entre otras (ver Imagen 4), los cuales contienen disoluciones químicas, principalmente sales y algunos ácidos añadidos como el sulfúrico y cianuros, con la finalidad de lograr que los metales mencionados se disuelvan, para entonces sumergir en cada uno de ellos las piezas a las cuales se ha de aplicar una ligera capa de metal adicional.



Imagen 3. Barril de acrílico perforado. Fuente: elaboración propia.



Imagen 4. Contenedor de la disolución acuosa. Fuente: elaboración propia.

En seguida, sumerge las piezas en la disolución acuosa y enciende el motor que hace girar al barril; establece el tiempo del proceso en un dispositivo sonoro que configura manualmente; enciende el rectificador de corriente alterna a corriente continua (ver Imagen 5), modula la intensidad de la corriente específica para cada tipo y tamaño de material, y espera el tiempo necesario para la adherencia de la capa de cobre a las piezas de zamak; además, en cada ciclo de electrodeposición, debe adicionar sustancias para garantizar la buena conducción y el brillo requerido en las piezas, y verificar la temperatura de las disoluciones mediante un termómetro de varilla de cristal, el cual introduce dentro de la sustancia para decidir si encender o apagar los calentadores para cada etapa del proceso; posteriormente, realiza el enjuagado de las piezas en depósitos con agua limpia para eliminar

residuos de sustancia del contenedor en el que estuvieron en la etapa anterior, y finalmente, si la pieza lo requiere, se le añade una capa protectora de barniz adherente en spray, o bien se sumerge en el barniz directamente [9].



Imagen 5. Rectificador de corriente alterna a directa. Fuente: elaboración propia.

Si bien es cierto que en la mayoría de ocasiones el proceso se desarrolla correctamente, también es común que ocurran errores debidos al operador, puesto que la mayoría de los procedimientos se realizan de acuerdo con sus criterios y consideraciones; entonces, no siempre se logra la exactitud en los tiempos requeridos para la finalización satisfactoria del proceso. Además, existe la posibilidad de que el acabado de las piezas no cumpla las expectativas del cliente. Por lo anterior, se determina conveniente la implementación de una lógica de control automático y de una HMI que provea respaldo visual y remoto al operador, de modo que la utilización y capacidad de un sistema automatizado, impida cometer esos errores. Así, la función principal de la HMI es agilizar el trabajo del operador para el monitoreo y control de las variables para garantizar la calidad del producto final [10].



Imagen 6. Ejemplo de equipo improvisado en el proceso de forma manual (contenedor de disolución de latón y barril de acrílico perforado). Fuente: elaboración propia.

Entre la problemática que se presenta con la ejecución manual del proceso está, las mermas en la producción, el reprocesamiento de la materia prima (zamak) que implica tiempo adicional y elevado costo del insumo, las devoluciones por parte del cliente, incluso la pérdida de

clientes. Con base en tales incidencias y en el uso que se hace de equipo improvisado (ver Imagen 6), surge la presente propuesta de proyecto.

### Objetivo general

Automatizar el proceso de galvanoplastia mediante la implementación de PLC y HMI para incrementar la eficiencia del proceso.

### Objetivos específicos

- Diseñar un sistema electromecánico para trasladar las piezas en las distintas etapas del proceso.
- Disminuir errores debidos a la intervención humana.
- Mejorar la calidad del producto final.
- Reducir el consumo de agua que implica el proceso.
- Reducir la contaminación al sistema de alcantarillado con los residuos de ácidos, cianuros y aditivos usados en cada etapa del proceso.
- Evitar la mezcla de las disoluciones acuosas de un contenedor a otro de distinto pH.
- Evitar al operador el contacto con los gases nocivos y salpicaduras de las disoluciones corrosivas.
- Incrementar la producción de la microindustria.
- Implementar tecnología especializada en automatización, como sensores, transductores y actuadores.

### Etapas del proceso galvanoplástico

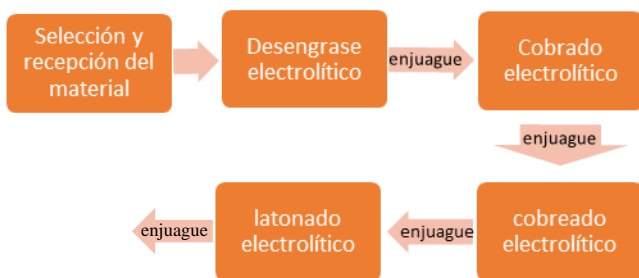


Imagen 7. Diagrama del proceso de galvanoplastia.

#### Selección y recepción del material

Conteo y separación por modelo; inspección de piezas para conocer el estado en el que se encuentran.

#### Desengrase electrolítico

Eliminación de manchas e impurezas externas, como óxido, aceites u otro contaminante que pudieran tener por el proceso de satinado y pulido.

#### Cobreado electrolítico

Recubrimiento con una ligera capa de cobre, ya sea delgada o gruesa, cuya función principal es generar una base para un baño posterior con níquel.

#### Niquelado y latonado electrolítico

Estas dos etapas constituyen en conjunto el acabado final que poseerán las piezas; al ser el último tratamiento que reciben, les debe proveer buen aspecto, por lo que el operador debe revisarlas a detalle al salir de estas etapas.

### Variables de proceso

En los procesos industriales, los sensores captan el valor de las variables implicadas, y envían una señal de salida predeterminada. El sensor puede formar parte de otro instrumento (por ejemplo, un transmisor) o puede estar separado; también se denomina detector o elemento primario por estar en contacto con la variable. En el proceso de galvanizado están presentes variables analógicas; estas señales son medidas y provienen de distintos actuadores, por ejemplo, la temperatura es provocada por un intercambiador de calor, la corriente es derivada de un rectificador de CA, mientras que el nivel es medido desde el depósito de la solución, y para la parte del movimiento se usan señales digitales para limitar la posición de los motores [11].

### Variables de Medición

Variable	Valor	Descripción
Tiempo	30-40 min	Lograr la deposición de manera óptima.
Nivel	5 cm borde del contenedor	Las piezas deben ser cubiertas totalmente por las disoluciones para garantizar una capa homogénea.
pH	2-4	Lograr la conductividad efectiva en las disoluciones.
Temperatura	60°C	Garantizar la realización adecuada de la reacción de los químicos.
Corriente	65-70 A	En función del tipo de pieza y del grosor de la capa requerida.

Tabla 1. Valores que deben adoptar las variables del proceso. Fuente: elaboración propia.

## Desarrollo de la propuesta

Para la implementación de la propuesta, es importante destacar los puntos importantes para cada etapa del proceso de galvanoplastia. Mediante un diagrama de flujo (ver Imagen 8), se presentan las etapas del proceso de forma general.

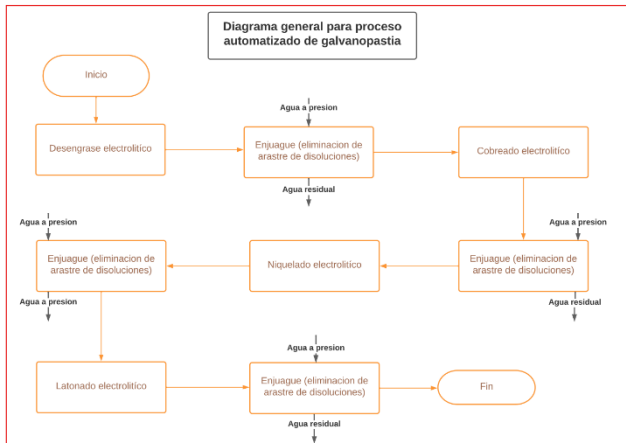


Imagen 8. Diagrama general del proceso de recubrimiento electroquímico.

A través de otro diagrama de flujo (ver Imagen 9), se presentan los pasos a seguir para desarrollar un proceso de recubrimiento electroquímico, el cual se divide en 4 etapas principales; una de ellas opcional, en función de los requerimientos del cliente; una etapa de activado, llamada así debido a que se encarga de preparar las piezas para recibir la capa de cobre y eliminar algunas manchas, sin esta etapa el proceso podría sufrir perturbaciones importantes y proporcionar como resultado un recubrimiento no uniforme.

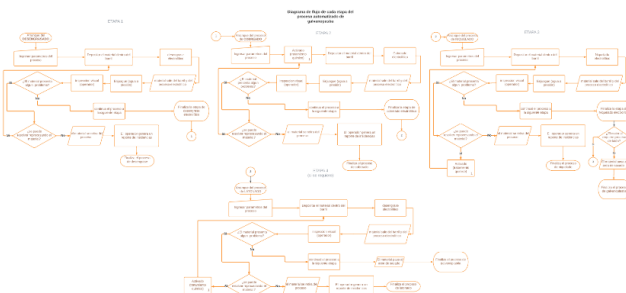


Imagen 9. Diagrama de las etapas principales del proceso.

Para la implementación de esta propuesta, se diseña un sistema mecánico para trasladar las piezas a procesar por las diferentes etapas de recubrimiento (ver Imagen 10 y

11), el cual es controlado a través del PAC y monitoreado mediante la HMI, donde es posible visualizar el estado del proceso, la etapa en la que se encuentra y el tiempo de ejecución, entre otros aspectos.

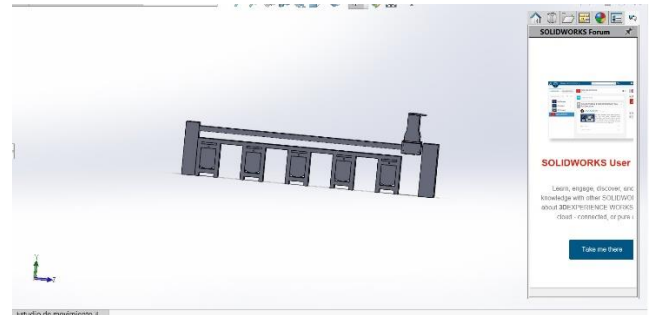


Imagen 10. Diseño del sistema de movimiento.

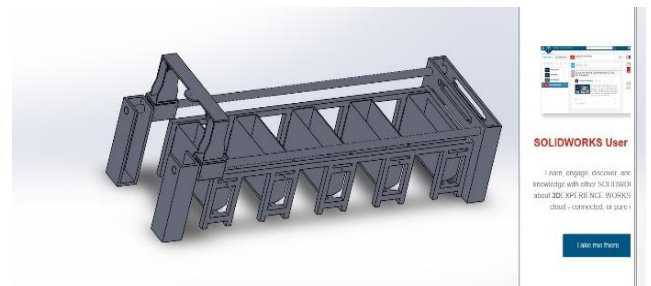


Imagen 11. Perspectiva del sistema de movimiento.

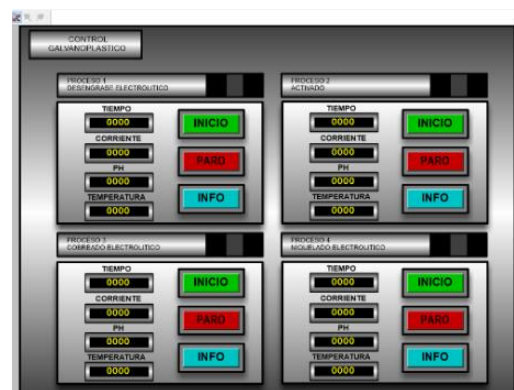


Imagen 12. Visualización de subprocesos (etapas) y variables en la HMI principal.

El control del proceso se realiza mediante el control de las variables que intervienen en éste (ver Tabla 1), y que están presentes en cada etapa o subproceso, esto es, temperatura, pH, corriente, nivel y tiempo, las cuales se pueden visualizar en la HMI (ver Imagen 12) desarrollada en el software Cimplicity Workbench.

La programación del algoritmo de control que ejecuta el PAC se ha realizado empleando el software *Proficy Machine Edition* (ver Imagen 13). Al crear y configurar un proyecto nuevo, se asigna el tamaño de los racks a utilizar; por las características del proceso y el tipo de variables a controlar, de sensores y actuadores, se ocupa un rack de 12 slots (ver Imagen 14).

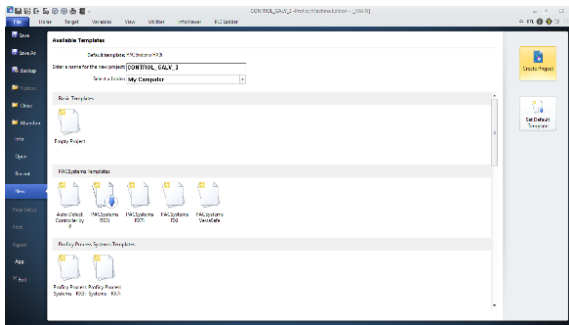


Imagen 13. Creación de un nuevo proyecto en Proficy Machine Edition.

Posteriormente, se asignan los módulos de entradas y salidas tanto discretas como analógicas (ver Imagen 15). Habiendo configurado cada slot en relación con los módulos instalados, se configura el puerto de conexión por medio del protocolo 802.3 Ethernet, se configura la dirección IP de la computadora y la sub-máscara, así como el target establecido para conexión Ethernet (ver Imagen 16).

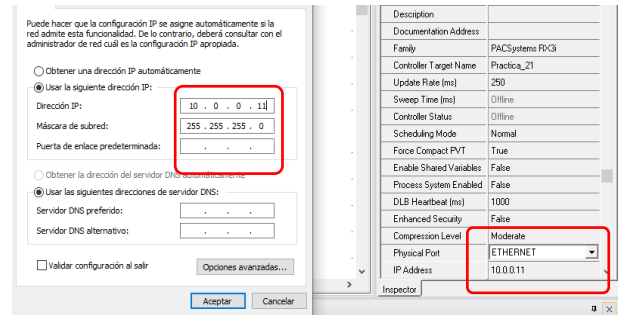


Imagen 16. Configuración de dirección IP.

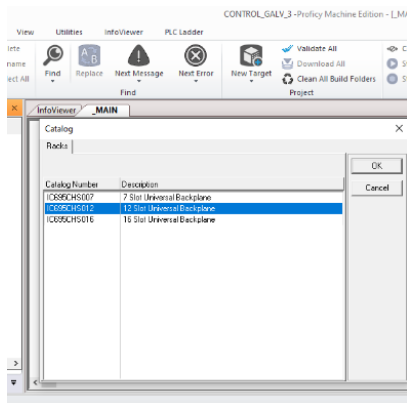


Imagen 14. Selección de rack con 12 slots.

Por su parte, para la HMI, se crea un proyecto nuevo en *Cimplicity* y se realiza la configuración con la que se establecerá la comunicación entre la HMI y *Proficy*, en el puerto de comunicación se selecciona S90\_TRIPLEX (ver Imagen 17). En el campo *Device*, se asigna el nombre del proyecto el cual se enlazará con la lógica de control en *Proficy* (ver Imagen 18).

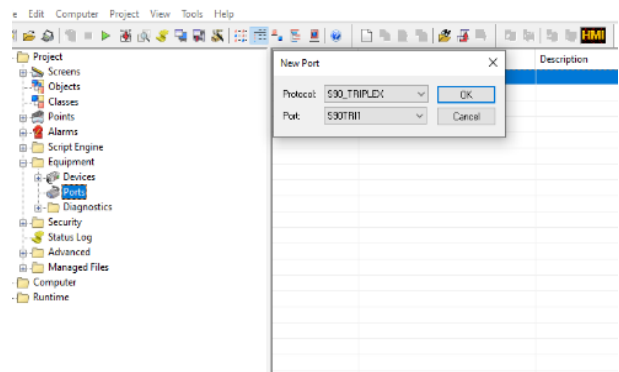


Imagen 17. Selección de puerto de comunicación.

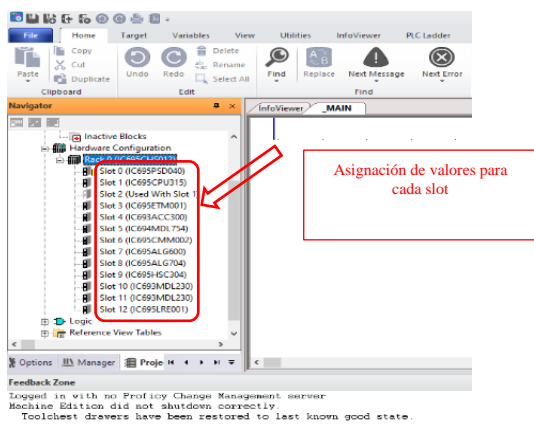


Imagen 15. Asignación de módulos de entradas y salidas.

El posicionamiento del sistema en cada etapa del proceso, para identificar la acción que se encuentra efectuando, está asociado a variables discretas, específicamente entradas discretas %I17, provenientes de *limit switch* ubicados en cada etapa, y asignadas en relación con la tabla de variables (ver Imagen 19) al módulo MLD230 que recibe las señales de tales interruptores.

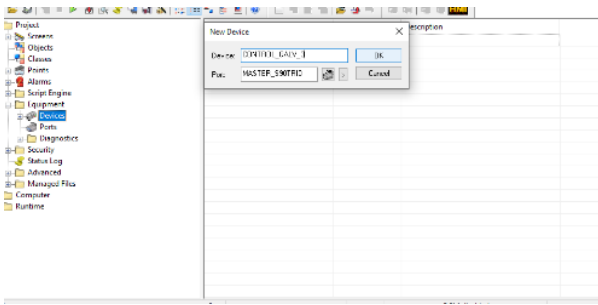


Imagen 18. Asignación del nombre del proyecto.

Variable	Nombre	Valor	Unidad	Comentarios
02	Entrada proceso 5	0		
03	Salida proceso	0		
SALIDAS				
04	Salida proceso 1	0		
05	Salida proceso 2	0		
06	Salida proceso 3	0		
07	Salida proceso 4	0		
08	Salida proceso 5	0		
09	Salida proceso 6	0		
10	Salida proceso 7	0		
11	Salida proceso 8	0		
12	Salida proceso 9	0		
13	Salida proceso 10	0		
14	Salida proceso 11	0		
15	Salida proceso 12	0		
16	Salida proceso 13	0		
17	Salida proceso 14	0		
18	Salida proceso 15	0		
19	Salida proceso 16	0		
20	Salida proceso 17	0		
21	Salida proceso 18	0		
22	Salida proceso 19	0		
23	Salida proceso 20	0		
24	Salida proceso 21	0		
25	Salida proceso 22	0		
26	Salida proceso 23	0		
27	Salida proceso 24	0		
28	Salida proceso 25	0		
29	Salida proceso 26	0		
30	Salida proceso 27	0		
31	Salida proceso 28	0		
32	Salida proceso 29	0		
33	Salida proceso 30	0		
34	Salida proceso 31	0		
35	Salida proceso 32	0		
36	Salida proceso 33	0		
37	Salida proceso 34	0		
38	Salida proceso 35	0		
39	Salida proceso 36	0		
40	Salida proceso 37	0		
41	Salida proceso 38	0		
42	Salida proceso 39	0		
43	Salida proceso 40	0		
44	Salida proceso 41	0		
45	Salida proceso 42	0		
46	Salida proceso 43	0		
47	Salida proceso 44	0		
48	Salida proceso 45	0		
49	Salida proceso 46	0		
50	Salida proceso 47	0		
51	Salida proceso 48	0		
52	Salida proceso 49	0		
53	Salida proceso 50	0		
54	Salida proceso 51	0		
55	Salida proceso 52	0		
56	Salida proceso 53	0		
57	Salida proceso 54	0		
58	Salida proceso 55	0		
59	Salida proceso 56	0		
60	Salida proceso 57	0		
61	Salida proceso 58	0		
62	Salida proceso 59	0		
63	Salida proceso 60	0		
64	Salida proceso 61	0		
65	Salida proceso 62	0		
66	Salida proceso 63	0		
67	Salida proceso 64	0		
68	Salida proceso 65	0		
69	Salida proceso 66	0		
70	Salida proceso 67	0		
71	Salida proceso 68	0		
72	Salida proceso 69	0		
73	Salida proceso 70	0		
74	Salida proceso 71	0		
75	Salida proceso 72	0		
76	Salida proceso 73	0		
77	Salida proceso 74	0		
78	Salida proceso 75	0		
79	Salida proceso 76	0		
80	Salida proceso 77	0		
81	Salida proceso 78	0		
82	Salida proceso 79	0		
83	Salida proceso 80	0		
84	Salida proceso 81	0		
85	Salida proceso 82	0		
86	Salida proceso 83	0		
87	Salida proceso 84	0		
88	Salida proceso 85	0		
89	Salida proceso 86	0		
90	Salida proceso 87	0		
91	Salida proceso 88	0		
92	Salida proceso 89	0		
93	Salida proceso 90	0		
94	Salida proceso 91	0		
95	Salida proceso 92	0		
96	Salida proceso 93	0		
97	Salida proceso 94	0		
98	Salida proceso 95	0		
99	Salida proceso 96	0		
100	Salida proceso 97	0		
101	Salida proceso 98	0		
102	Salida proceso 99	0		
103	Salida proceso 100	0		

Imagen 19 Tablas de variables.

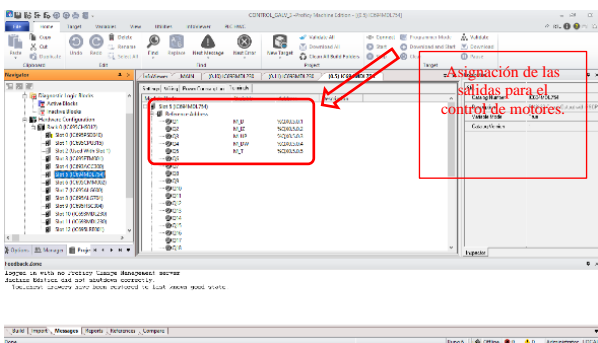


Imagen 20. Asignación de salidas.

Para la implementación física, puesta en marcha, simulación y validación de la operatividad y funcionalidad del sistema propuesto, se ha elaborado un modelo tecnológico, donde se han empleado motores a 12V controlados por el módulo de salidas discretas MDL745 a 24V (ver Imagen 20), direccionadas con %Q1 a %Q5, que para ser funcionales se deben dar de alta en la configuración desde el software

Cuando las entradas, salidas y los registros empleados en la programación se han declarado en el entorno de Proficy, se crean, agregan y nombran los puntos en Cimplicity usando Points (ver Imagen 21), para enlazar la programación en Proficy con la HMI en Cimplicity.

En las propiedades del punto, se asigna la dirección que tiene asociada en Proficy, este proceso se realiza para todas las variables que se controlan mediante la lógica de control (ver Imagen 22). Al asignar las direcciones a los puntos con los cuales se vincula la HMI con Proficy, se procede entonces a la creación de las interfaces; para ello, se utiliza Screen y se crea una nueva (ver Imagen 23).

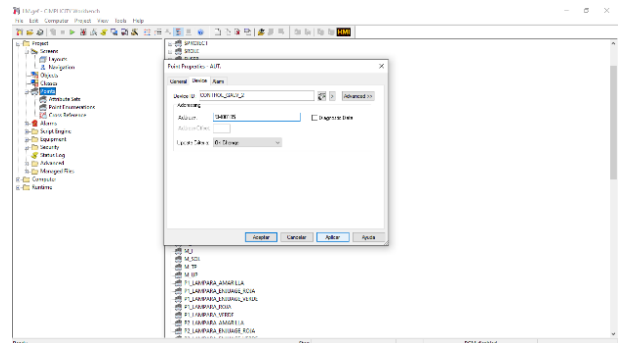


Imagen 21. Creación de puntos en Cimplicity.

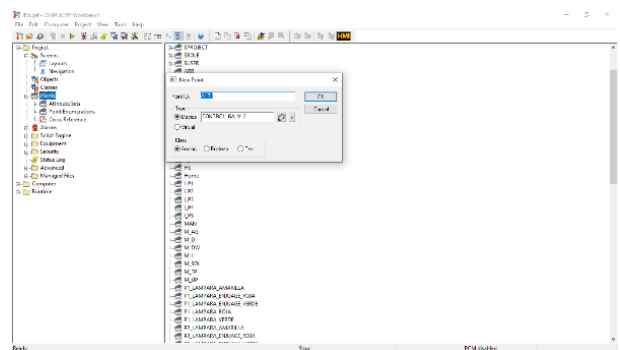


Imagen 22. Asignación de dirección a los puntos.

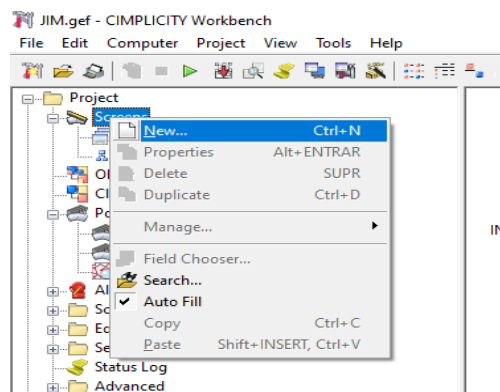


Imagen 23. Creación de nuevo proyecto en Cimplicity.

Para el desarrollo de la HMI, se insertan los elementos gráficos necesarios para conformar y representar todo el proceso; por ejemplo, contenedores, botones, posición en



el proceso, lámparas, tuberías, ventanas indicadoras que muestran valores ingresados o algún parámetro. Para cada pantalla se realiza el mismo procedimiento, en función de las necesidades (ver Imagen 24).

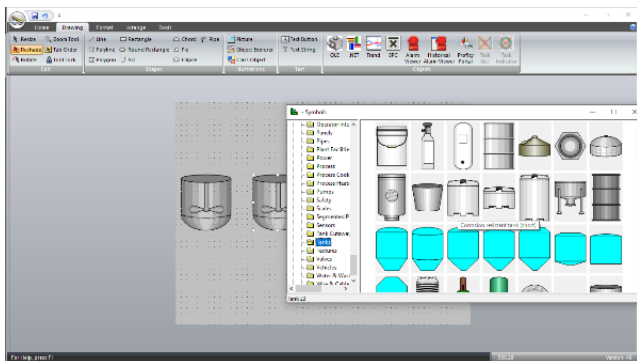


Imagen 24. Selección de los elementos para la HMI.

Para vincular un elemento de la HMI con la acción que éste debe realizar de acuerdo con la lógica de control, por ejemplo, un botón, el de arranque, se da clic derecho en el elemento y se seleccionan sus propiedades (ver Imagen 25); en el apartado de Evento, se elige la opción *Mouse Down* para un primer evento asociado a la activación del botón con la acción del clic del *mouse*; y después, un segundo evento con la opción *Mouse Up*, ahora para la desactivación del botón (ver Imagen 26).



Imagen 25. Creación de un nuevo evento para un elemento de la HMI.

Posteriormente, se selecciona Eventos y Nuevo procedimiento (ver Imagen 27); en Información de procedimiento se elige Nuevo y *Absolute setpoint* (ver Imagen 28). Se selecciona la dirección del punto enlazado a la lógica de control (ver Imagen 29); cuando se realice una acción desde la HMI, ésta se ejecutará en la programación y se verá reflejada en una acción de operación del proceso.

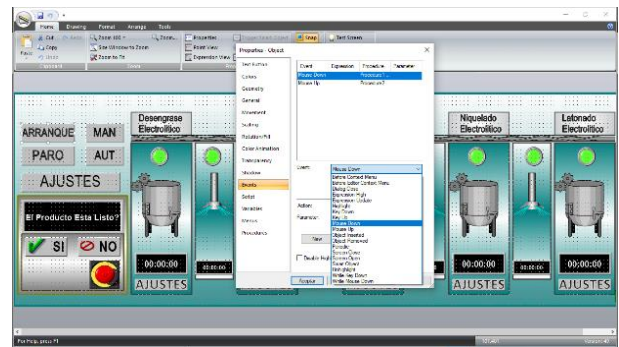


Imagen 26. Creación de una acción para un botón.



Imagen 27. Creación de una acción para un botón.

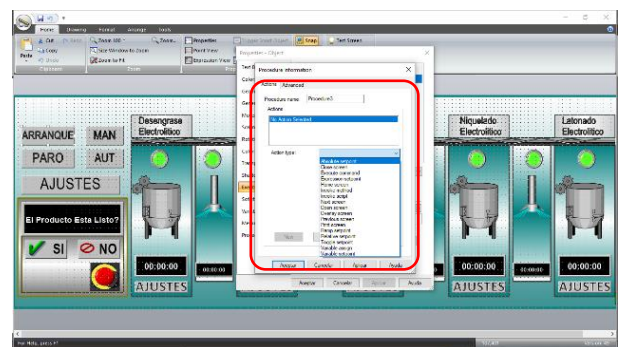


Imagen 28. Creación de una acción para un botón.

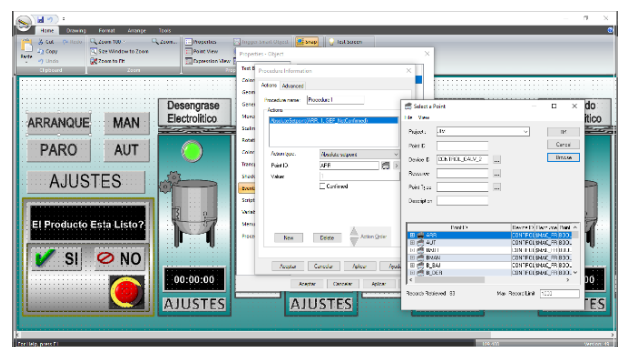


Imagen 29. Selección de la dirección del punto relacionado con la lógica de control.

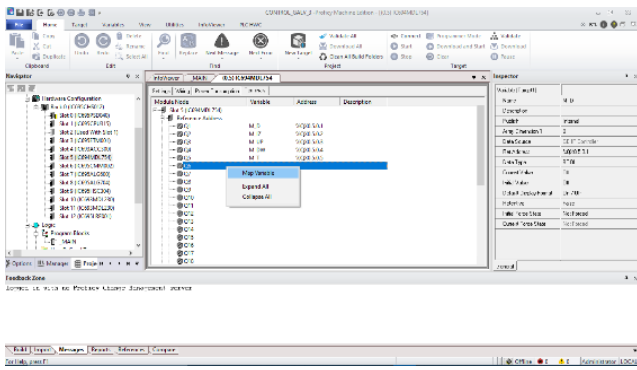


Imagen 30. Habilitación de las salidas discretas.

Para que las salidas del módulo funcionen, se deben activar en la dirección de referencia a la que se desea asignar una salida, en este caso, las que enviarán las señales de control a los motores de CC. (ver Imagen 30).

Para el desarrollo de la lógica de control, una importante herramienta de apoyo empleada fue un DTI diseñado, que contiene la instrumentación, las tuberías, los elementos de control del proceso y accionamientos que conforman el sistema real; el diseño de tal DTI se realizó con base en la problemática de la empresa donde surge esta propuesta (ver Imagen 31). Otra valiosa herramienta fue el desarrollo de un diagrama eléctrico, donde se especifican las conexiones necesarias, los pre-actuadores para cerrar el circuito, y los motores usados para el movimiento rotacional del barril de acrílico (ver Imagen 32).

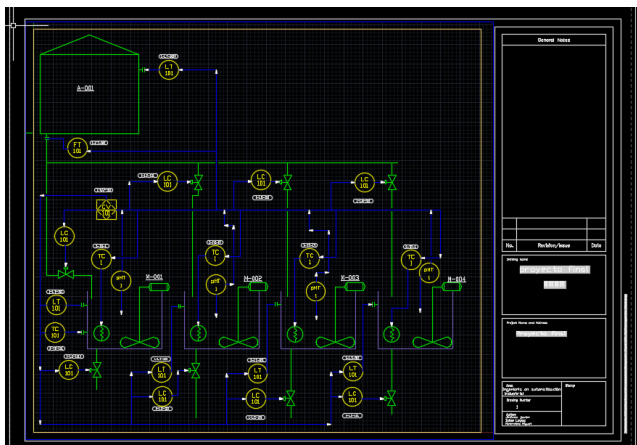


Imagen 31. Diseño del DTI para el proceso de galvanoplastia.

### Logica de control

La programación del algoritmo de control se realizó en lenguaje Diagrama Escalera (LD, Ladder Diagram), mediante el software Proficy Machine Edition. El sistema

propuesto se ha diseñado para operar el proceso en ambos modos; manual y automático (ver Imagen 33).

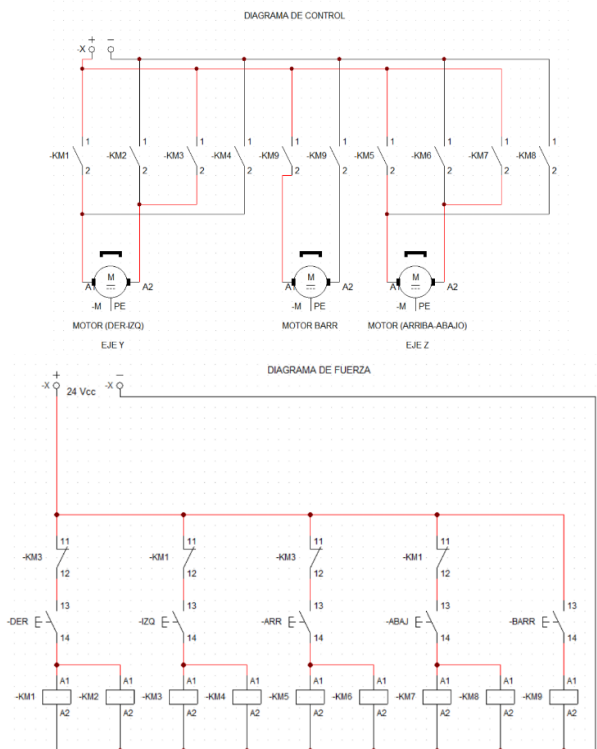
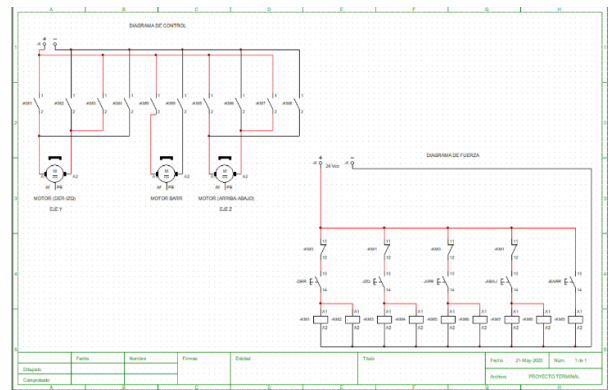


Imagen 32. Diagrama de fuerza y de control.

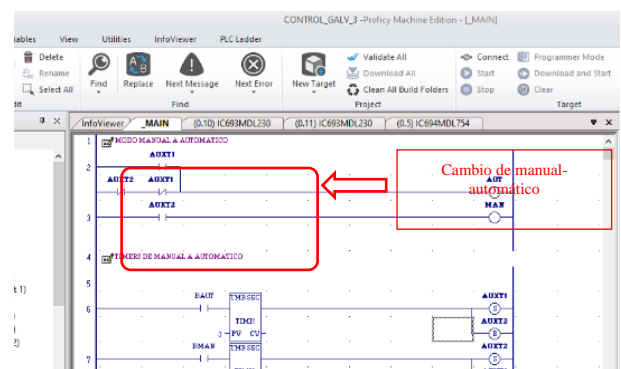


Imagen 33. Control de selección Manual/Automático.

En el modo manual, se puede controlar el posicionamiento del sistema en cada subproceso, así como el ascenso y descenso del barril de acrílico. Para la selección Manual/Automático, se han empleado dos timer (TMR SEC % R201, %R205) para generar, como medida de seguridad, un retardo de 3 segundos para activar cualquiera de los dos modos (ver Imagen 34).

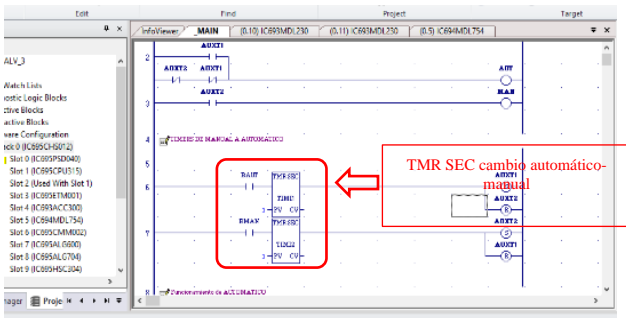


Imagen 34 Retardo de activación Manual/Automático.

### Registros

En los registros se ha definido el tiempo que ha durar cada subproceso (ver Imagen 38); estos datos se configuran desde la HMI y son direccionados hacia la lógica mediante los bloques GE INT, que almacenan los datos %R00151 (ver Imagen 39).

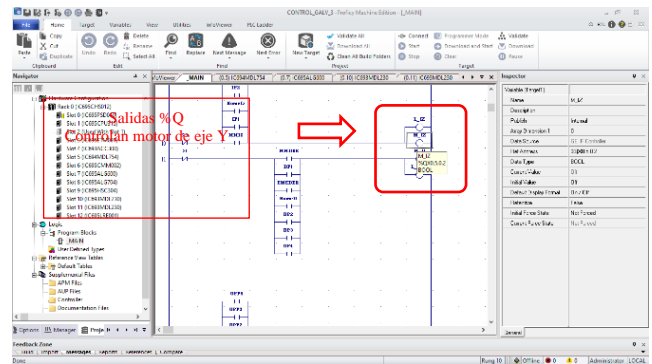


Imagen 36. Control de movimiento en el eje Y.

### Funcionamiento en modo automático

El control automático del proceso implica la parametrización de los subprocesos para cumplir las condiciones de funcionamiento (ver Imagen 35). Se observa en la imagen la asignación de las salidas para las señales de control de los motores para el posicionamiento del sistema en cada subproceso, ya sea avanzar o retroceder, definido como desplazamiento en el eje Y; éstas se han asignado a %QX0.5.0.1, %QX0.5.0.2. (ver Imagen 36).

El control de movimiento en el eje Z corresponde al ascenso y descenso del barril de acrílico que contiene las piezas que se sumergen en cada etapa del proceso para su recubrimiento con cada metal; estas salidas se han asignado en %QX0.5.0.3, %QX0.5.0.4. (ver Imagen 37).

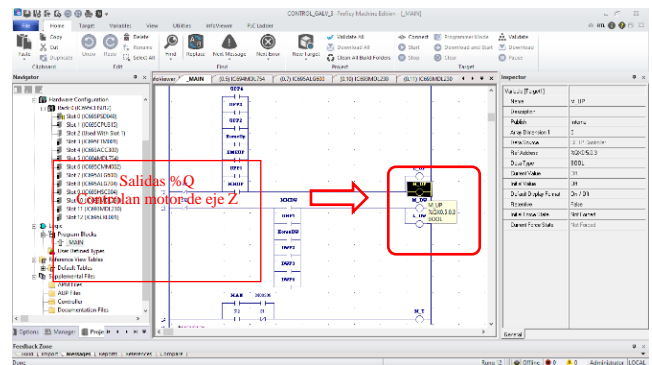


Imagen 37. Control de movimiento en el eje Z.

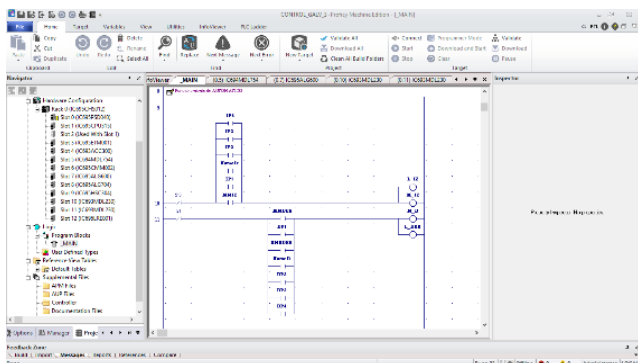


Imagen 35. Parametrización de condiciones de funcionamiento para los subprocesos.

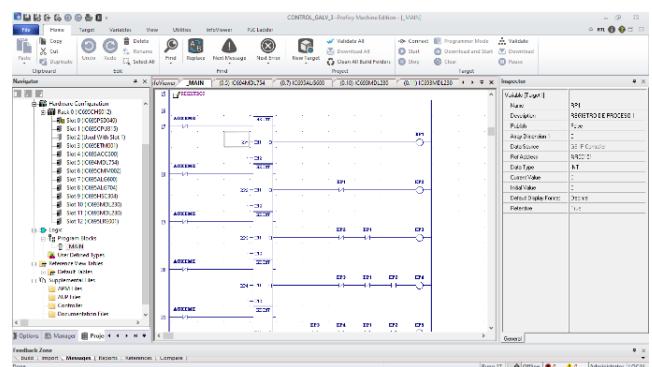


Imagen 38. Creación de registros en los comparadores.

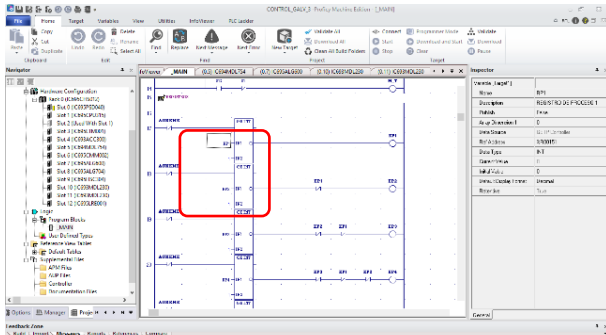


Imagen 39. Configuración de tiempo en los registros.

### Tiempo de duración de subprocesos

Los tiempos de duración de los subprocesos se asignan a través de los *timer*, los cuales efectúan el conteo del tiempo que el barril estará sumergido en cada una de las disoluciones respectiva a cada etapa (ver Imagen 40).

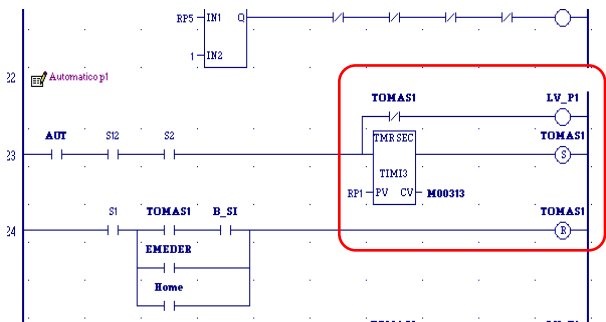


Imagen 40. Control de duración de tiempo de subprocesos mediante timer.

La lógica de control desarrollada para cada etapa es idéntica a la de las otras etapas, en cuanto a su estructura para el subproceso y el enjuague; la diferencia única entre ellas es el tiempo de duración asignado, utilizando los bloques TMR SEC que realizan conteo por segundo, en función de los requerimientos de la etapa (ver Imagen 40).

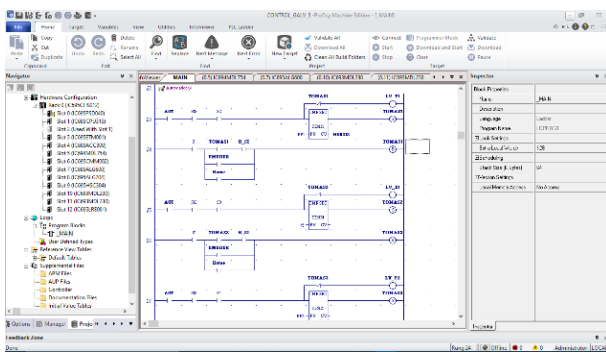


Imagen 40. Uso de bloques TMR SEC.

Al término de cada uno de los subprocesos, se activa una lámpara indicadora para alertar que el subproceso ha finalizado y está listo para realizar la revisión de las piezas; para lo cual, se asignan memorias %M en la programación, (ver Imagen 41).

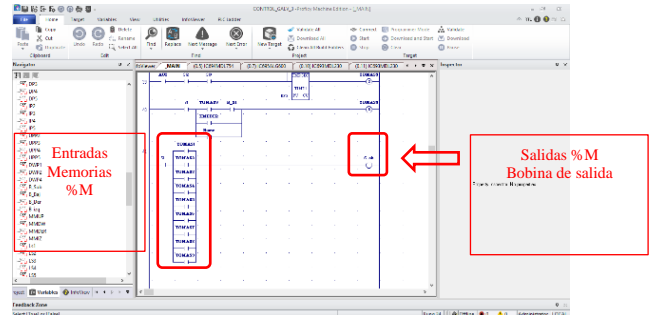


Imagen 41. Uso de memorias para alertas visuales.

### Control automático Home

La lógica de control automático *Home* considera que cuando termina un subproceso, se indicará que el barril ha de desplazarse hacia el punto de inicio (*home*) donde se tiene asignada la revisión de las piezas procesadas (ver Imagen 42).

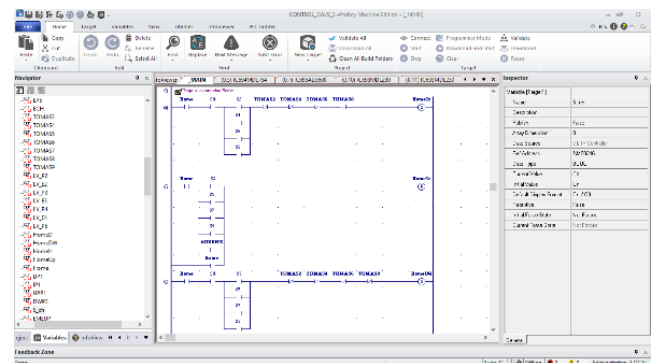


Imagen 42. Implementación de un punto Home.

Para accionar el motor que produce desplazamiento en el eje Y, se considera el arreglo donde se observan los contactos asociados a los *limit switch* asignados a las variables de entrada %I correspondientes a cada sensor de posición en cada subproceso (ver Imagen 43), y secuencialmente se emite la variable de salida %M hacia el motor (ver Imagen 44).

En el control automático de retorno a *home*, se controla el movimiento del motor del eje Z, bajo el mismo esquema del párrafo anterior (ver Imagen 45).

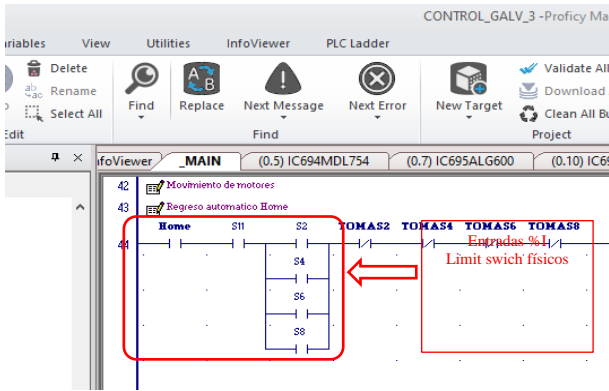


Imagen 43. Entradas físicas provenientes de los limit switch para detección de posición del sistema.

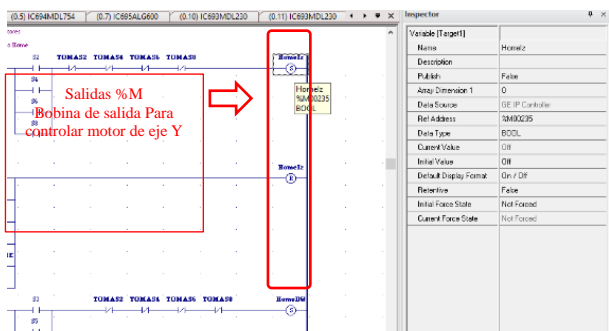


Imagen 44 Control del motor del eje Y.

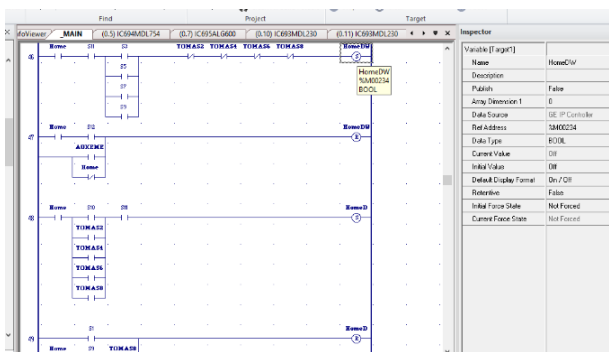


Imagen 45. Control del motor del eje Z.

### Funcionamiento en modo manual

Existe un acceso a una pantalla de la HMI (ver Imagen 46) mediante la cual se puede operar manualmente el movimiento del sistema (ver Imagen 47) controlando independientemente los motores del eje Y, del eje Z y del giro del barril.

### Controlador de temperatura y de corriente

El control de temperatura y corriente constituye una parte esencial en la automatización del proceso de

electrodeposición, ya que sin este control automático se dificulta lograr ajustar con exactitud estas variables en su valor deseado (SP, *Set Point*) (ver Tabla 1). Por ello, se determinó incluir el bloque de controlador de tipo PID (ver Imagen 48) que tiene incorporado el PAC, el cual, por tratarse de un control en lazo cerrado, favorece la corrección de errores gracias al efecto conocido de cada una de sus acciones de control (Proporcional, Integral y Derivativa), y la suma de estas acciones permite regular la variable de proceso (PV; *Process Variable*). El ajuste de las ganancias (sintonización) del controlador, como suele ocurrir mayormente en la industria, se ha realizado pragmática y empíricamente, mediante prueba-error.

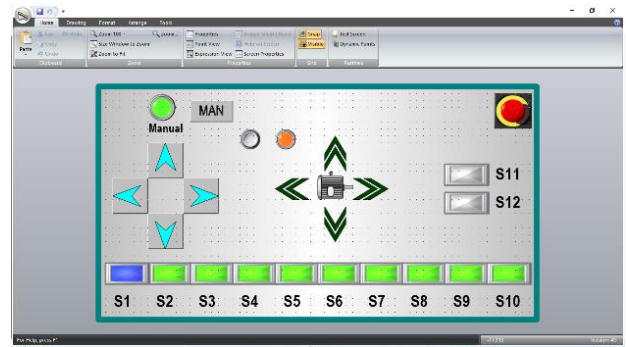


Imagen 46. Pantalla de la HMI de operación manual.

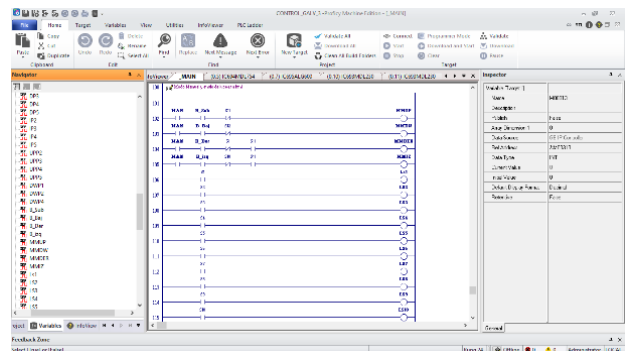


Imagen 47. Lógica de control manual de los motores.

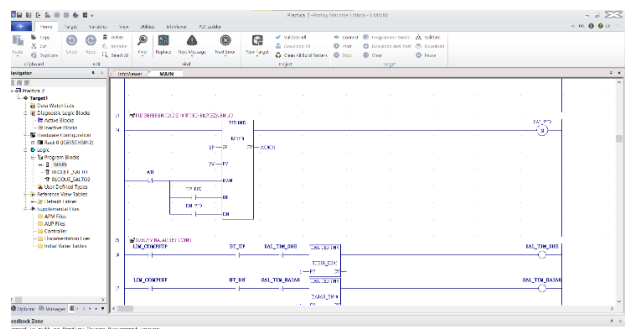


Imagen 48. Bloque de controlador PID.

Para la configuración y el funcionamiento del bloque PID, se usan a su vez dos bloques; el primero, BLK CLR, encargado de limpiar los registros del bloque PID; el segundo, BLK MOVE, encargado de trasladar los registros del PID (ver Imagen 49). Tal configuración, posibilita una adecuada corrección de error y lograr estabilizar la variable en cuestión para que mantenga el valor del SP establecido a través de la HMI.

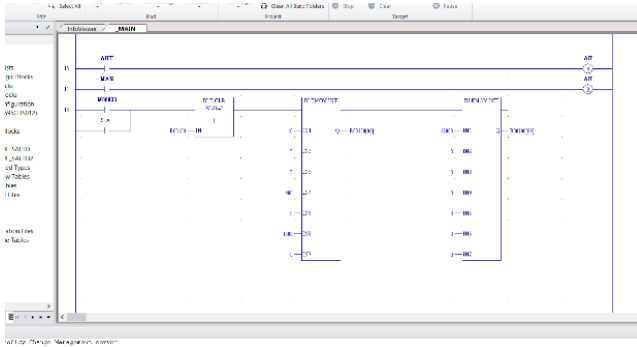


Imagen 49. Configuración del bloque PID.

Finalmente, se construyó un modelo tecnológico (ver Imagen 50) para verificar y validar físicamente la operatividad y funcionalidad del sistema propuesto, mediante la implementación de los algoritmos de control programados para el PAC, así como del monitoreo y el control remoto virtual del proceso a través de la HMI.



Imagen 50. Modelo tecnológico del sistema automatizado para el proceso de galvanoplastia.

## Conclusiones

La extensa diversidad de aplicaciones que involucran automatización, industrial específicamente, permite incrementar la eficiencia y seguridad de los procesos

productivos en sus diferentes tipos, y los del sector metalúrgico se encuentran entre los más críticos debido a los materiales con los que se desarrollan y a los riesgos que implican; tal como ocurre en el de galvanoplastia o electrodeposición, que es un tratamiento electroquímico donde entre algunos de los retos importantes está el manejo de sustancias y compuestos peligrosos, como ácidos y cianuros, y el consecuente impacto adverso a la salud y al medio ambiente, por emisión de gases ácidos y alcalinos. Considerando que el presente trabajo constituye un proyecto académico terminal de aplicación práctica orientado a proponer alternativas de solución a las problemáticas sobre automatización de procesos de tipo industrial, en él se ha planteado una propuesta de un sistema automatizado para el recubrimiento electrolítico de piezas fabricadas de zamak, integrando tecnología de automatización de gama industrial para control, monitoreo, instrumentación y comunicación; cumpliendo satisfactoriamente el objetivo general declarado, verificado a través del modelo tecnológico cuya puesta en marcha ha permitido validar el correcto desempeño tanto de los algoritmos de control desarrollados como de la HMI diseñada, y con ello la operatividad y funcionalidad del macrosistema para la consecuente verificación de los objetivos específicos.

## Referencias

- [1] Correa Delgado, *Estudio para conocer los potenciales impactos y vulnerabilidad relacionada con las sustancias químicas y tratamiento de desechos peligrosos del sector productivo del Ecuador*, Ecuador: Ministerio del ambiente, 2017.
- [2] V. Molina Gallegos, *Minimización del riesgo ambiental en la industria de galvanoplastia (maestro en ciencias en ingeniería ambiental)*, México, D.F., Instituto Politécnico Nacional.
- [3] A.A. Flores Saldívar, *Optimización del proceso de vaciado de zamak 3 en molde permanente mediante técnicas estadísticas y cómputo suave (Maestría en ciencia y tecnología con especialidad en sistemas de manufactura avanzada)*, Saltillo, Coahuila, CONACyT.
- [4] P.U. Daniel Thomazini, *Sensores industriales: Fundamentos y aplicaciones*, 2020.
- [5] A. Codina García, *Posicionamiento y proyección actual del motor de paso en aplicaciones industriales*, 2002.
- [6] Opertek, *Nuevo PLC en la familia de controladores RX3i*, Barcelona, España, Opertek, 2018.
- [7] B. Hallberg, *Fundamentos de redes*, México, D.F., McGraw-Hill Interamericana, 2007.
- [8] ABB, *Ethernet de alto rendimiento*, Zúrich, Suiza, Kai Hansen, 2015.

- [9] F.J. Suárez Domínguez, E. Marañón Maison (dir. tes.), *Diseño y modernización de un equipo de tratamiento integral por intercambio iónico de los efluentes de una planta de galvanizado*, Universidad de Oviedo, España, 1997.
- [10] O.M. Carsten, *¿cómo pueden los humanos entender sus autos automatizados? principios problemas y soluciones de HMI*, Cong. Tech Work, 2019.
- [11] P. Alcocer Quinteros, M. Calero Zurita, N. Cedeño Zambrano, E. Lapo Manchay, *Automatización de procesos industriales*, Journal of business and entrepreneurial studies, 2020.