

## Automation of a drilling process via a wireless connection using the EMQX protocol

Orantes-Molina A. \*, Juárez-Abad J. A., Linares-Flores J., Miranda Luna, Rosebet

- Universidad Tecnológica de la Mixteca, Oaxaca, México (Tel: 9512649741; [tonito@mixteco.utm.mx](mailto:tonito@mixteco.utm.mx))

**Abstract:** This paper proposes an alternative solution to automate a system called "Drill Station." Our automation proposal focuses on wireless communication between a GUI and a PLC S7-200 CPU 226 from the manufacturer Siemens to achieve remote control and monitoring of the process. In our proposal, the enriched production Grafctets diagrams and the security Grafctet diagrams are used with the transfer-type process forcing order. The process consists of three work areas: loading, drilling, testing, and evacuation of the part. We showed that with the use of Grafctets, it is possible to fully automate the process, considering the various running, operating, and safety modes, to improve the operation, achieve a better understanding of the drive, and facilitate the training of the operators.

**Keywords:** Function chart Grafctet, forcing order, Grafctet Enriched, MQTT, Transfer Machine, PLC, ESP32, GUI.

### 1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la "Industria 4.0" ha generado cambios irreversibles y muy profundos, incluso comparado con las tecnologías que la preceden, por ejemplo: máquinas de vapor, energía eléctrica, sistemas informáticos, por citar algunos. Sin embargo, una diferencia fundamental con las tecnologías mencionadas es que la industria 4.0 y sus tecnologías emergentes evolucionan y se adaptan con mayor velocidad. Una de las tecnologías emergentes que ha tenido una penetración muy importante en la mejora de productos y servicios es el Internet de las cosas (IoT, *Internet-of-Things*). Dicha tecnología ha ido evolucionando y mejorando en su infraestructura, funcionalidad, seguridad y protección en el transporte de datos que actualmente se emplea con gran envergadura en áreas como la salud, hogares inteligentes, vehículos autónomos, transporte, agronomía, ingeniería y equipos controlados a distancia [1,5]. En ese sentido, la automatización de procesos es un campo de la ingeniería que con el paso del tiempo ha crecido a través de esas nuevas tecnologías, ya que ese campo se desenvuelve en procesos de producción industrial con el objetivo de optimizar y lograr una mayor productividad mejorando el tiempo de ejecución. Los avances en la industria han creado numerosas aplicaciones en los controladores lógicos programables (PLC, *Programmable Logic Controller*) en temas de índole industrial [2]. En la actualidad hay un alto potencial para los sistemas y las aplicaciones enfocados a mejorar la operatividad de los procesos que integren sensores con técnicas de comunicación vía internet, para el monitoreo, análisis y estadísticas. Gracias a los avances tecnológicos se permite mejorar considerablemente la calidad de los procesos en máquinas compactas o aplicaciones de pequeño alcance [3].

Dadas las nuevas necesidades de comunicación en los procesos industriales y con las nuevas tendencias en el desarrollo de sistemas con aplicación industrial con un enfoque de IoT, en este documento se desarrolla una propuesta de solución para un

proceso que involucra un puesto de taladro que debe realizar tres secuencias de movimiento al mismo tiempo: *Carga, taladrar y evacuación de la pieza*. Para ello, primero se obtiene un Grafctet de producción del proceso y posteriormente se enriquece el mismo. La programación se realizó en Ladder usando el software Step 7 MICROWIN y se hizo una cosimulación entre un PLC de la marca Siemens ® modelo S7-200 y el software PC SIMU. Dada la necesidad de la aplicación de contar con comunicación inalámbrica, se implementó por medio de Wi-Fi y se usó el protocolo abierto de uso generalizado MQTT [6] para las transacciones, empleando el Broker EMQX. Para el control de la comunicación se empleó un módulo basado en un microcontrolador ESP32 [7], el cual ofrece conexión Wi-Fi/Bluetooth todo en uno y se utilizó una computadora donde se desarrolló una interfaz gráfica para el control de las acciones, misma que fue codificada por medio de la *App Designer* de MATLAB [8].

En este trabajo se ha realizado el diseño y construcción de la automatización de un puesto de taladro utilizando un **Grafctet enriquecido** donde se le incrementa al **Grafctet de base** los modos de marcha y de seguridad por medio de acciones de forzado. Para el control del proceso se implementó una **Unidad de Control Remota** como parte de un sistema **IoT** utilizando un Microcontrolador ESP32 y el protocolo MQTT. Por último, se construyó el prototipo del sistema de control utilizando un PLC S7-200 CPU 226 del fabricante SIEMENS. Por ello, el trabajo se organizó de la siguiente forma: en la sección 2 se realiza la Descripción de la Problemática, se presenta el modo de funcionamiento del proceso "Puesto de Taladro". Aquí se muestra el Grafctet de base a nivel descriptivo. En la sección 3, se describe nuestra propuesta de solución, e inicia con la mención del objetivo del trabajo. A continuación, se muestra el Grafctet enriquecido de nivel 2 del proceso, así como, el Grafctet de

seguridad, el cual es de mayor jerarquía que el Grafset enriquecido. En la misma sección se presenta el diagrama eléctrico de la conexión entre el PLC CPU 226 con el Microcontrolador y finalmente, se explica lo relacionado a la interfaz gráfica diseñada en el software de Matlab. La sección 4, Pruebas y Resultados, muestra el diseño del prototipo del sistema, la comunicación inalámbrica y los resultados obtenidos. Finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones del trabajo.

## 2 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

En la automatización de los procesos industriales se estudia el caso de máquinas en las cuales existen muchas secuencias que deben desarrollarse al mismo tiempo, un caso muy frecuente son las máquinas tipo *transfer*. El proceso del puesto de taladro de la Fig. 1 es un ejemplo de máquina *transfer circular* donde existe la necesidad de simultaneidad de secuencias. La bandeja giratoria cuenta con tres puestos de trabajo: el primero es de carga, el segundo es de taladrar y el tercero de testador y evacuación de las piezas taladradas. Un motor eléctrico debe permitir la rotación de 120° de la bandeja exterior, y después de la rotación, las piezas son sujetas para la perforación. Finalmente, la verificación del taladrado se efectúa por un testador que debe descender a la posición de la base, para verificar si el perforado fue realizado correctamente. Si existe una anomalía, todo el sistema se bloquea y el testador se sube para que el operador pueda cambiar la pieza defectuosa antes de rearmar manualmente el sistema.

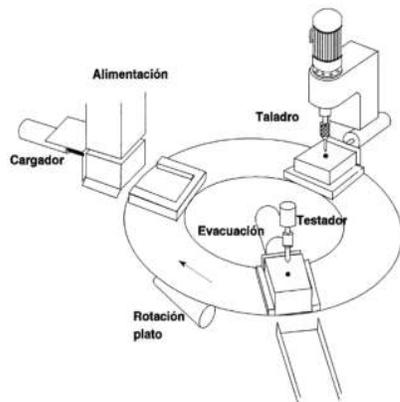


Fig. 1: Puesto de Taladro

El Grafset de primer nivel (descriptivo) que describe el funcionamiento del proceso se muestra en la Fig. 2. Cuando el orden "Marcha" aparece y las condiciones iniciales de la parte operativa sea correctamente posicionada, el franqueamiento de la receptividad de la transición conduce a la activación simultánea de las etapas 1, 5 y 13. A partir de esta situación las tres secuencias 1 a la 4, 5 a la 12 y 13 a la 22 evolucionarán independientemente, pero deberán ser todas concluidas para franquear a una evolución común en la etapa 23 ó 24.

Para asegurar la sincronización de la desactivación de varias secuencias al mismo tiempo, generalmente se ponen etapas de espera recíprocas sin acciones asociadas (etapas 4, 12 y 22). Estas

etapas son importantes, ya que permite desactivar las acciones que están a la espera de la conclusión de las otras ramas que se ejecutan de manera simultánea. En términos generales, las secuencias se pueden agrupar de la forma siguiente:

- La secuencia de las etapas 1 a la 4 evolucionará hasta la etapa 4 donde se detendrá la acción del retroceso del cargador.
- La secuencia de la etapa 5 a la 12 evolucionará hasta la etapa 12 donde se detendrá la acción de retraer la sujeción.
- La secuencia de la etapa 13 a la 22 evolucionará hasta la etapa 22 donde se detendrá la acción de retroceso de la evacuación de la pieza taladrada.

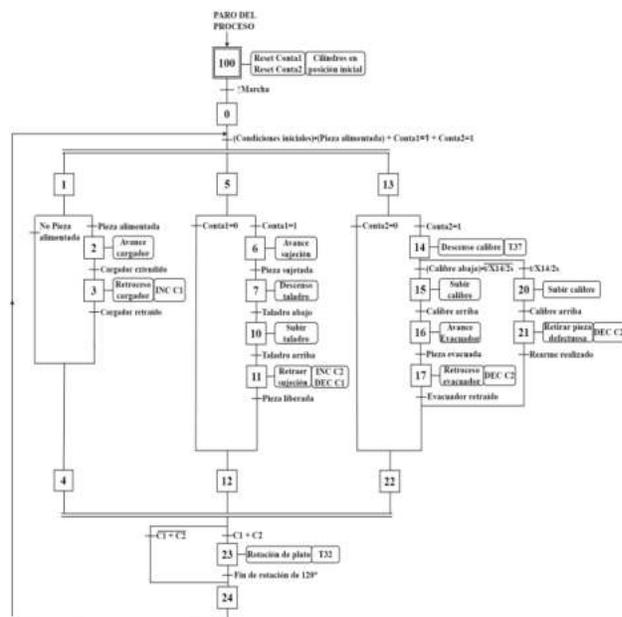


Fig. 2: Grafset de base de primer nivel del proceso de taladro

Cabe remarcar que para la receptividad de la transición t14-15 se debe tener en cuenta la posición base del testador y de la temporización de 2 segundos no acabados, con el fin de asegurar la exclusión con la receptividad de la transición t14-20.

## 3 PROPUESTA DE SOLUCIÓN

El objetivo principal es automatizar el puesto de taladro estableciendo una comunicación bidireccional con conexión Wi-Fi entre un panel de control y un microcontrolador para poder monitorear las entradas y salidas de un PLC. Para lograr este objetivo se realizaron las siguientes tareas: se obtuvo un Grafset enriquecido del proceso, se realizó un diagrama eléctrico de conexiones entre el microcontrolador y el PLC, se diseñó un panel de control por medio de una interfaz gráfica en la computadora y se construyó un prototipo para realizar las pruebas

correspondientes del sistema. Cada una de las tareas mencionadas se describen a continuación:

### 3.1 Enriquecimiento del Grafcet de Base

En la Fig. 3 se muestra el Grafcet enriquecido de nivel dos del proceso del puesto de taladro. Al Grafcet de base se le agregan los modos de funcionamiento automático (producción), semi automático (ciclo a ciclo) y etapa por etapa (manual). Para poder iniciar el funcionamiento en cualquiera de los modos descritos, en el Grafcet de seguridad, debe estar activa la etapa 30 (ver Fig. 4). El grafcet de seguridad controla el avance del grafcet de producción (por medio de la etapa 30), permite el paro de emergencia que se activa con la etapa 32 en el cual, mediante una acción de forzado envía el grafcet de producción a la etapa 0 (etapa de inicialización). Por tratarse de un tipo de forzado por nivel, el proceso no iniciará hasta que se desenchave el botón de paro de emergencia (PE). En la etapa 31 se activa un piloto luminoso indicando el congelamiento del proceso mediante forzado y una vez que alguna de estas dos etapas sea desactivada, regresa a la etapa 30 permitiendo al Grafcet de marcha seguir con el proceso.

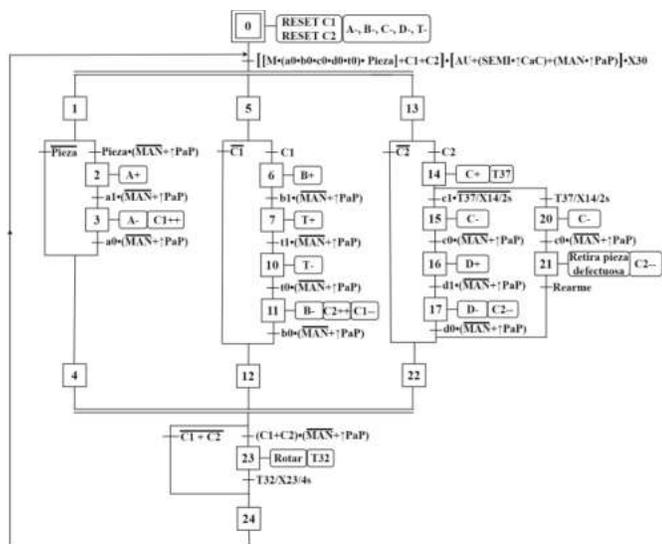


Fig. 3: Grafcet de producción enriquecido de segundo nivel

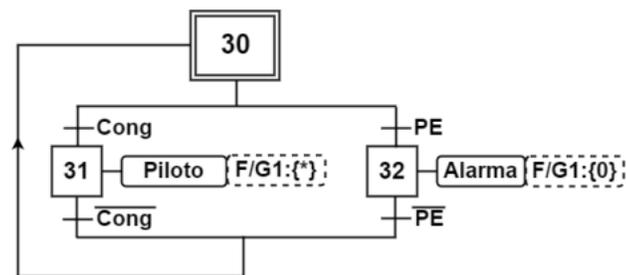


Fig. 4: Grafcet de seguridad (maestro) de segundo nivel

### 3.2 Diagrama Eléctrico

En este apartado se presenta el análisis previo a la conexión eléctrica del PLC CPU 226 de la familia SIMATIC del fabricante Siemens ®. Debido a que existen limitaciones en cuanto a las entradas y salidas disponibles, se eliminaron algunas salidas y entradas de acuerdo con la relevancia del proyecto. Para realizar las conexiones de entrada del PLC, se tomaron en cuenta que estas están divididas en dos secciones de acuerdo con la procedencia: *manual* y *microcontrolador*. Esto se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Conexión de entradas al PLC

Acción/Sensor	Dirección de entrada del PLC	Procedencia
Marcha	10.0	Microcontrolador
CI	10.1	Microcontrolador
Pieza Cargada	10.2	Manual
A1	10.3	Manual
A0	10.4	Manual
B1	10.5	Manual
B0	10.6	Manual
CC1	10.7	Manual
CC0	11.0	Manual
D1	11.1	Manual
D0	11.2	Manual
REARME	11.3	Microcontrolador
POSICIONT	11.4	Manual
ET	11.5	Microcontrolador
CL	11.6	Microcontrolador
CY	11.7	Microcontrolador
DY	12.0	Microcontrolador
EMERGENCIA	12.1	Microcontrolador
CONGELAMIENTO	12.2	Microcontrolador
TT1	12.3	Manual
TT0	12.4	Manual

De acuerdo con la Tabla 1, se emplean nueve entradas del PLC las cuales provienen del microcontrolador, para ello, se utilizaron módulos de relé cuya activación está a cargo del microcontrolador ESP32. Los módulos de relé se conectan a la fuente de voltaje que proporciona el PLC, que es de 24V de CD; mientras que, la conexión normalmente abierta del relé va hacia la entrada correspondiente del PLC. Para el caso de los sensores, se optó, por simplicidad, utilizar un switch con encapsulado DIP para realizar la activación de las entradas correspondientes; dicho switch está conectado de igual manera a la fuente de voltaje del PLC debido a los requerimientos de voltaje en la entrada. En el caso de las salidas, se optó por representarlas con leds, puesto que serán leídas por el microcontrolador. La interfaz gráfica proporciona los datos de operación del sistema en

todo momento. Estas salidas están conectadas a 5V, ya que son los requerimientos para la entrada del dispositivo.

### 3.3 Conexión PLC - Microcontrolador

En la Fig. 5 se muestra un esquema de las entradas y salidas utilizadas en el PLC.

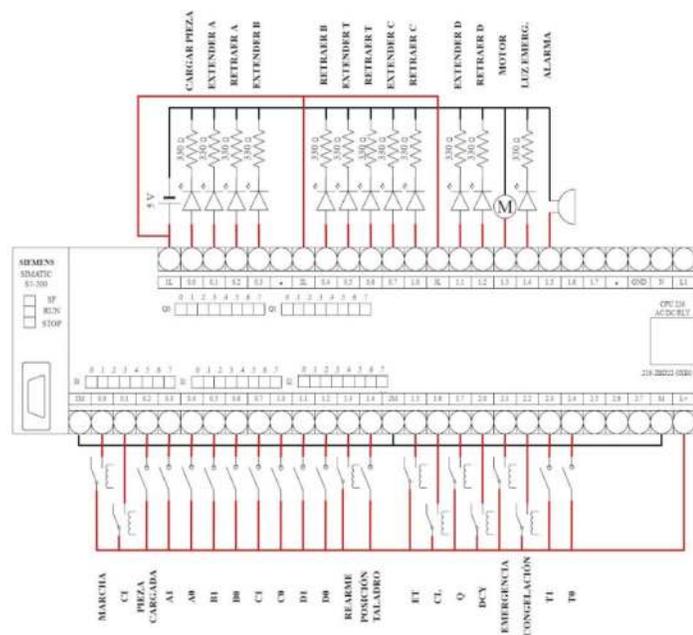


Fig. 5: Esquema de conexión al PLC.

Para las conexiones con el microcontrolador se tomaron en cuenta las Tablas 2 y 3. En la Tabla 2 se muestran los pines utilizados para las salidas a relé, así como los identificadores utilizados en la programación.

Tabla 2. Salidas del microcontrolador

Identificador de salida	Pin de conexión
Marcha	22
CI	14
Dy	4
Cy	16
Etapa	17
Ciclo	5
Rearme	18
Paro	19
PE	21

Para las entradas al microcontrolador, se tomaron en cuenta aquellos pines que son dedicados a la lectura puesto que, existen

pinos que no son compatibles con lectura ya que están dedicados sólo a salidas. En la Tabla 3 muestra los pines utilizados, así como la salida del PLC a leer.

Tabla 3. Entradas al microcontrolador

Identificador de entrada	Pin de conexión
CargarPieza	2
ExtenderA	15
RetraerA	34
ExtenderB	35
RetraerB	32
ExtenderT	33
RetraerT	25
ExtenderC	26
RetraerC	27
ExtenderD	36
RetraerD	12
Motor	13
AlarmaSonora	23

### 3.4 Interfaz Gráfica

La interfaz gráfica es un entorno visual que permite al usuario interactuar con alguna máquina o computador. Para este proyecto se realizó la interfaz con el software MATLAB específicamente con la herramienta denominada *App Designer*, el cual proporciona al usuario la capacidad de realizar aplicaciones en ambiente gráfico de manera rápida y sencilla. *App Designer* posee un entorno intuitivo y todos los elementos que se necesitan para esta aplicación, esto es: botones, indicadores, selectores, switches, etc. La interfaz gráfica diseñada para este proyecto se presenta en la Fig. 6. El panel de control industrial diseñado, cuenta con los siguientes elementos: *Botón de marcha*, *botón de condiciones iniciales*, *selector*, *modo automático*, *modo ciclo (semi automático)*, *modo Etapa a Etapa (de intervención)*, *botón C y (botón de validez al modo Etapa a Etapa)*, *botón D y (botón de validez al modo Ciclo)*, *botón de paro (congelamiento)*, *botón de paro de emergencia*, *botón de rearme*, *indicador de puesta en marcha*, *indicador de paro (congelamiento)* e *indicador de paro de emergencia*. Adicional a estos elementos, es necesario mostrar de manera visual las salidas del proceso en todo

momento, por lo que se creó un *Tab group* que permite cambiar el panel de control por una ventana donde se muestre las salidas en tiempo real a través de diversos indicadores y un botón que da la orden de obtener el estado de las salidas del PLC vía el módulo ESP32. Cabe mencionar que a la ventana del panel de control se le añadió un botón indicador que informa al usuario que la conexión con el Broker se estableció. Esto permite al usuario saber en qué momento puede utilizar la interfaz gráfica, ya que en caso de que no se conecte apropiadamente, el sistema completo no funcionará de manera correcta, es decir, el microcontrolador ESP32 no recibirá las señales de la interfaz y, en consecuencia, el PLC tampoco. En la Fig. 6 se muestra la interfaz diseñada, con los nombres de las salidas del proceso industrial. En cuanto a los indicadores, éstos tienen un color definido como se observa en la Fig. 6(a); el color verde indica funcionamiento, el segundo indicador es de color amarillo

4 e indica paro por congelamiento (ver Fig. 6(b)) y, por último, el indicador de rojo mostrado en la Fig. 6(c) que alerta sobre el paro de emergencia. Para el arranque del proceso, se tiene que presionar tanto el botón de marcha como el de condiciones iniciales. En la Fig. 6(d) se observan las opciones del *Tab group*.

## 4 PRUEBAS Y RESULTADOS

### 4.1 Prototipo del sistema

Para comprobar el funcionamiento del sistema se construyó un prototipo del proceso de la estación de taladrado, este se muestra en la Fig. 7. En el prototipo se utilizaron 5 motores de CD, cada uno con las siguientes funciones: para la primera secuencia se utilizó un motor para posicionar la pieza. En la segunda secuencia se usó un motor para el taladro de banco y el descenso se realizó de manera manual. En la tercera secuencia se utilizó un motor para el testador y otro para el pistón que evacúa la pieza. Finalmente, el quinto motor se usó para la rotación del plato.



Fig. 6: Interfaz gráfica creada en *App Designer* de MATLAB.

Para que los motores funcionen como cilindros se le agregó al eje un tornillo y una tuerca que al girar el motor se mueva la tuerca

haciendo que el vástago avance, de esta forma se posiciona la pieza en la primera secuencia. De forma análoga para que se retraiga el vástago, se invierten las polaridades. Este mismo proceso se utilizó para el cilindro del testador y del evacuador adicionalmente cada salida tenía su respectivo botón. El plato gira al accionar un motor de CD de 12V y se debe mantener presionado el botón de marcha hasta obtener la posición deseada y después soltarlo.

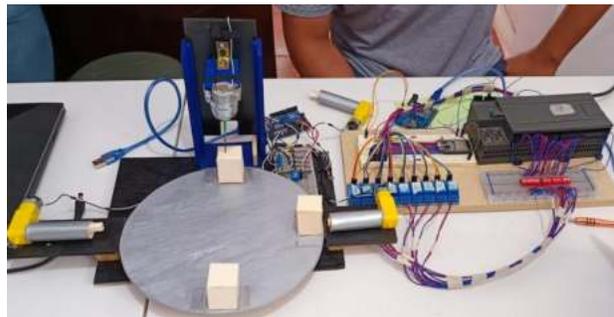


Fig. 7: Prototipo del proceso automatizado

### 4.2 Comunicación inalámbrica

Siguiendo la lógica de la sección anterior solo resta realizar la programación de la interfaz y que ésta transita al Broker y del Broker al ESP32. Como ya se planteó en secciones anteriores se utilizó el protocolo MQTT para realizar la conexión entre MATLAB y el módulo antes mencionado. En la Fig. 8 se muestra el esquema conceptual del sistema de comunicación. Para este proyecto se utilizó el broker gratuito EMQX. Cabe mencionar que los tópicos de publish y subscribe deben ser diferentes de acuerdo con lo que se muestra en el esquema de conexión de la Fig. 8. Para facilitar este proceso y enviar a cada momento los datos del estado del sistema, se optó por utilizar el formato JSON y enviar solo una trama de datos que al llegar a su destino (ESP32 o Interfaz Gráfica) se aplica una máscara para ser decodificados.

### 4.3 Resultados obtenidos

Una vez realizado el programa en *Ladder*, se simuló y posteriormente en el laboratorio se cargó el programa hecho en MicroWin 3.2 al PLC CPU 226. Una vez que se corroboró que todas las conexiones estuvieran en orden se verificó que el voltaje que requerían todos los componentes fuera el correcto. Una vez establecidas la conexión con el módulo ESP32 se continuó a manipular y monitorear las entradas del PLC CPU 226 utilizando de por medio un relé para obtener 24 V de CD requeridos para las entradas. Para verificar que existiera comunicación entre la interfaz creada en *App Designer*, el módulo ESP32 y el PLC CPU 226, se validaron las entradas y su respuesta de salida utilizando los leds del PLC. Al comprobar que la comunicación se ejecuta correctamente, se probó el proceso de taladrado. Se realizaron varias pruebas para comprobar que los resultados que proporcionaba el PLC fueran correctos. Las salidas,

además de visualizarse por medio de los leds del PLC también se podían observar en la interfaz gráfica a través de la comunicación del módulo ESP32. Un factor importante en las pruebas y obtención de resultados fue tener una buena conexión Wi-Fi, en ese sentido se verificó que los resultados fueran satisfactorios para el sistema en cuestión cuando el *delay* en las comunicaciones era menor de 1s.

## 5 CONCLUSIONES

Para realizar esta propuesta de solución fue necesario tomar en cuenta diversos factores que afectan el funcionamiento y comunicación entre los dispositivos de control y los actuadores. Como ya se comentó anteriormente, un factor decisivo en la comunicación entre el sistema basado en microcontrolador (ESP32) y la interfaz gráfica alojada en la PC, fue la estabilidad de la conexión Wi-Fi. Esto se debe principalmente a que el microcontrolador debe conectarse a un Broker por medio del cual se realiza el enrutamiento de instrucciones hacia la interfaz gráfica que se ejecuta en la PC y ello incrementa los retardos en las transacciones de manera directamente proporcional a la velocidad de la red donde se integra el sistema. Por otra parte, la representación de un automatismo por Grafcet ayuda a una comprensión sencilla entre técnicos de diferentes formaciones gracias a la estructura de nivel 1 (descriptivo), el cual es independiente a la tecnología empleada para la solución de la automatización. En nuestra propuesta de solución se puede observar que por medio de la aplicación de los grafcets se obtuvo un análisis más profundo de los diferentes comportamientos del automatismo (modos de producción, seguridad y de marcha/paro), así como facilidad de diseño, modificación, mantenimiento y diagnóstico (detección y localización de fallas) del proceso automatizado, logrando incluso, la incorporación de una bifurcación para la detección de fallas.

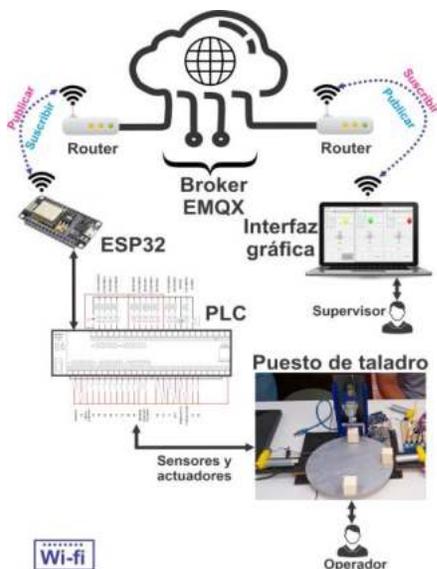


Fig. 8: Esquema conceptual de comunicaciones para el sistema de automatización

La conversión de Grafcet enriquecido a lenguaje Ladder resulta atractiva al querer implementar algunos o todos los modos de funcionamiento de un automatismo en un PLC de gama baja, como es el caso, ya sea en modo automático, semiautomático, paso a paso, estado de pausa o congelamiento y el paro de emergencia a través de acciones de forzado. El proceso automatizado desarrollado en este proyecto permite comprender la importancia de una interfaz de simulación y visualización de las variables de estado del sistema y poder verificar el funcionamiento del Grafcet programado. Para finalizar, una mejora a la propuesta de este trabajo puede consistir en incluir la remanencia en las variables asignadas a cada etapa del sistema, permitiendo que después de un fallo en la alimentación del PLC se pueda retornar a la etapa en que estuvo el programa antes del fallo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores aprecian la colaboración de los siguientes estudiantes de la Universidad Tecnológica de la Mixteca, por su valioso apoyo en la implementación del prototipo del sistema: Bravo Morteo Alejandro, Cruz Reyes Beny Uriel, Hernández Cruz Paola Joselin, Nava Andrés Fredy Uriel, Vásquez Suárez Javier Alberto, Zarate Ruiz Ángel del Rosario.

## REFERENCIAS

- [1] G. Andrade-Salinas, G. Salazar-Chacon, and L. M. Vintimilla, "Integration of IoT Equipment as Transactional Endorsing Peers over a Hyperledger-Fabric Blockchain Network: Feasibility Study," *Commun. Comput. Inf. Sci.*, vol. 1193 CCIS, pp. 95–109, 2020.
- [2] J. Ruan et al., "Agriculture IoT: Emerging Trends, Cooperation Networks, and Outlook," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, no. 6, pp. 56-63, December 2019.
- [3] B. -Y. Ooi and S. Shirmohammadi, "The potential of IoT for instrumentation and measurement," in *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 23, no. 3, pp. 21-26, May 2020.
- [4] Ammar R., Samer S., *Internet of things from hype to reality : the road to digitization*, Springer, Third Edition, 2022.
- [5] G. Tanganelli, C. Vallati and E. Mingozzi, "Rapid Prototyping of IoT Solutions: A Developer's Perspective," in *IEEE Internet Computing*, vol. 23, no. 4, pp. 43-52, 1 July-Aug. 2019.
- [6] Hillar, Gastón C., *MQTT essentials : a lightweight IoT protocol : the preferred IoT publish-subscribe lightweight messaging protocol*, Packt Publishing, 2017.
- [7] Neil C., *Electronics Projects with the ESP8266 and ESP32: Building Web Pages, Applications, and WiFi Enabled Devices*, Apress, 1st ed., 2021.
- [8] Nor Hazlyna H., *MATLAB APP Designer: Learn By Example*, UUM Press, 2017.