

Automatización y Control del Proceso sobre Planta Didáctica de Mezclado Térmico Automatizada mediante un Sistema de Control Distribuido.

Luis C. Parra.^{a,*}, Andrés F. Rodríguez.^a, José J. Carreño.^a, and Deisy C. Paez.^a

Abstract—En los últimos años el control de los procesos se ha incrementado, haciendo presencia en distintos entornos industriales, como en los procesos de control de nivel y temperatura en tanques de mezcla de gases y líquidos con características especiales, dependiendo de la aplicación del proceso. En esta investigación, fueron llevadas a cabo las actividades de mantenimiento, automatización, y el control de nivel y temperatura para un proceso de mezcla industrial. El mantenimiento fue realizado para dar disponibilidad a los equipos de campo, siendo necesaria la limpieza de tuberías, y el reemplazo de los elementos defectuosos. Además, se implementó la automatización del proceso de mezcla a través del DCS Honeywell HC900, permitiendo la implementación de parada en el estado inicial, modo reparación, de producción normal, parada de emergencia, entre otros, mediante el lenguaje de bloque de funciones (FBD). Se implementó un sistema SCADA para la supervisión del sistema en tiempo real y el monitoreo de alarmas por fallas en sensores y actuadores. Por último, se implementó un sistema de control que tiene como objetivo mantener la temperatura y el nivel del agua en los puntos de consigna establecidos. Los controladores fueron diseñados como sistemas SISO (Single Input- Single Output) debido a la fuerte correlación de las variables acopladas establecidas. (H/Q_c y T/Q_h). Los modelos de proceso se establecieron mediante pruebas experimentales por superposición y aproximaciones a los datos obtenidos con la Toolbox "SisoTool" del software Matlab. El proceso industrial se realizó en condiciones reales integrando la automatización del sistema y los controladores de temperatura y nivel diseñados.

Se validó el control del proceso de mezcla mediante su implementación en tiempo real, garantizando los valores de tiempo de asentamiento y sobreimpulso deseados, además de rechazar la perturbación generada por los caudales acoplados. Los datos de control se obtuvieron mediante DCS. El DCS se encargó de automatizar el proceso, permitiendo la supervisión a través del sistema SCADA y la operación automatizada en condiciones seguras, siendo clave el mantenimiento correctivo y preventivo al momento de garantizar el funcionamiento de los elementos de la planta y poder supervisar las variables del proceso.

Index Terms—Mantenimiento, Automatización, Control adaptativo, Proceso de mezclado, Proceso dinámico no lineal, Multiple-Input, Multiple-Output process.

I. INTRODUCCIÓN

Los procesos de mezcla se usan comúnmente en aplicaciones industriales. Estos procesos involucran componentes gaseosos y líquidos, los cuales deben ser monitoreados y controlados para poder llevar a cabo el proceso de mezclado deseado. Se puede evidenciar la importancia de los



Fig. 1. Planta de proceso de mezclado térmico.

procesos de mezcla en los procesos industriales de cemento, presurización y mezcla de gases combustibles industriales. El proceso de mezclado comprende la combinación de líquidos o gases con características distintas. Estos procesos dan como resultado una mezcla uniforme. [1]. En la industria, estos procesos de múltiples-entradas y múltiples-salidas (MIMO) generalmente se desarrollan con teorías lineales causadas por las características específicas de los requerimientos de las aplicaciones, como puntos de ajuste de temperatura y nivel específicos. Así, el modelo de linealización permite valores de operación cercanos al punto de ajuste deseado. Para esta linealización se utilizan diferentes métodos como los modelos de caja negra, gris y blanca. En la literatura se han realizado pocos estudios sobre el proceso de mezcla del agua, con la interacción entre las entradas (agua fría y caliente) y las salidas (nivel y temperatura). A. Rojas-Moreno y J. J. Hernandez-Garagatti han desarrollado una planta modelo de depósito de

^aMechatronic Engineering Faculty, Santo Tomas University, Bucaramanga, Colombia. luisCarlos_2214@hotmail.com; andresfer1105@gmail.com; jose.carreno01@ustabuca.edu.co; deisy.paez@ustabuca.edu.co

agua multipropósito [2]. Además, el control de temperatura y nivel de agua en un proceso de múltiples entradas y múltiples salidas que utiliza un controlador neuro-fuzzy se enfoca solo en el tanque de mezcla [3].

En este proyecto, cuatro tanques acoplados entre sí requieren el modelado MIMO para el control de temperatura y nivel, no solo del tanque de control (Proceso de mezcla) sino también de los tanques de suministro para proporcionar temperaturas constantes y evitar los excesos o limitaciones en el nivel, garantizando el control y la seguridad del proceso. Es importante destacar que este proceso industrial integra diferentes controladores con el fin de proporcionar el caudal de agua fría y caliente en los puntos de consigna deseados. Estos controladores incluyen los modelos de tanques de reserva y suministros. No obstante, el controlador principal se desarrolla en el tanque de mezcla (TK-003). El tanque de mezcla de la planta utilizada en este proyecto se muestra en la Figura 1. Para realizar el control con métodos MIMO, se diseñaron cuatro modelos experimentales con una prueba por superposición y aproximación con el software Matlab. Los controladores del proceso se diseñaron como controladores SISO, estableciendo los pares de variables con mayor correlación (H/Q_c y T/Q_h). Este proceso involucra la implementación de un Sistema de Control Distribuido (DCS) y la metodología GEMMA, proporcionando un Sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA) para garantizar un proceso de control, de seguridad y automatización.

En este trabajo se presenta en el apartado 2 el proceso de reparación de la planta (mantenimiento correctivo, preventivo y mejoras de calidad). En la sección 3 se presenta el proceso de automatización compuesto por la programación del DCS a través de Diagramas de Bloques Funcionales y basado en la directriz GEMMA, el SFC-GRAFCET, la metodología y los mapas de Karnaugh. La sección 4 expone el comportamiento dinámico del proceso, la metodología implementada para determinar el modelo experimental del sistema y el diseño del controlador utilizando el software SISOTOOL de Matlab. Los resultados obtenidos en tiempo real se presentan en la sección 5, evidenciando el comportamiento de las variables controladas bajo las especificaciones establecidas. Por último, las conclusiones de la investigación se presentan en la sección 6.

II. REPARACIÓN DE LA PLANTA DE PROCESOS

El término “automatización” fue acuñado por D.S. Harder en 1936, establecido como la transferencia de piezas de trabajo entre máquinas en un proceso de producción sin intervención humana [4]. Para potenciar el proceso industrial, la evolución de la automatización garantizó menores costos, efectividad del proceso, flujos continuos de producción y el uso asertivo de los recursos humanos, para competir en el ambiente industrial, además, contribuye con el mantenimiento industrial mediante la prevención y predicción de fallos. Este mantenimiento es importante para garantizar la producción, la calidad y mantener el buen funcionamiento de las máquinas, alargando su vida útil. Esta práctica se ha incrementado con el tiempo,

surgiendo en la década de 1970 el mantenimiento productivo total desarrollado por el japonés Seichi Nakajima. [5]. El Mantenimiento total productivo (TPM) integra los diferentes tipos de mantenimiento (correctivo, preventivo) con el personal humano de producción, garantizando la operación segura del proceso a largo plazo.

En esta investigación se aplicó mantenimiento correctivo y preventivo, trabajando de la mano con la automatización, satisfaciendo el objetivo de garantizar el desarrollo seguro del Proceso de Mezcla Industrial, garantizando la efectividad del proceso y el buen funcionamiento de los dispositivos instalados.

La planta de proceso de mezcla había estado fuera de uso durante mucho tiempo y tenía dispositivos que no funcionaban bien. Por ello, en primer lugar, se realizó la verificación del funcionamiento de sensores y actuadores para conocer cualquier daño en la planta de proceso y realizar el respectivo mantenimiento correctivo. Además, para garantizar la operación segura del proceso, se realizó un mantenimiento preventivo que consiste en la limpieza de tuberías y tanques de la planta mezcladora. Por último, fue necesaria la instalación de nuevos sensores y la adecuación del sistema de evacuación de fluidos.

A. Mantenimiento correctivo

En la industria se debe garantizar la confiabilidad del proceso utilizando las estrategias existentes para reparar o prevenir fallas como el mantenimiento correctivo [6]. El mantenimiento correctivo está enfocado a las fallas y la identificación de las causas de estas, para repararlas y permitir el trabajo seguro del proceso. En primer lugar, para cumplir con el mantenimiento correctivo, se realizó un diagnóstico de sensores y actuadores para clasificar los diferentes elementos probados de acuerdo con los resultados obtenidos. Se encontraron varias fallas en los componentes probados, lo que obligó a la sustitución de estos componentes. Además, las pruebas evidenciaron la necesidad de realizar cambios de cableado debido a una incorrecta implementación de los sensores o actuadores que componen la planta de proceso de mezcla. A continuación, se muestran los resultados obtenidos del diagnóstico realizado a los componentes de la planta de proceso en base a la ficha técnica del fabricante.

B. Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo se utiliza para mejorar el rendimiento de un sistema y reducir la probabilidad de falla. Se realizan mantenimientos preventivos a elementos en condiciones de funcionamiento, para minimizar las consecuencias de la falla del equipo, incluidos los cambios de elementos y las tareas de limpieza. [7]. Por ello, tras el diagnóstico y sustitución de los diferentes sensores y actuadores, se procedió a probar la planta, evidenciándose la obstrucción de las tuberías por material sedimentado, que imposibilitaba, en ocasiones, el paso adecuado del fluido a través de las mismas. Por este motivo, se soltaron las tuberías y se limpiaron. Las válvulas fueron removidas, desarmadas y limpiadas, removiendo

TABLE I
ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO

Componente	Actividad	Observaciones
Tuberías y tanques	Limpieza	Limpieza de sedimentos presentes en superficies y tuberías
Válvulas	Cambio de dispositivos	Sustitución de válvulas defectuosas sin reparación.
Sensores capacitivos	Cambio de dispositivos	Remplazo y recableado de sensores defectuosos en TK-003.
Transmisores de temperatura	Recableado	Recableado para un funcionamiento óptimo con DCS
Controlador de calor	Recableado	Adición relé de estado sólido para controlador de resistencia térmica.
Sensor ultrasónico LTI	Configuración	Calibración y recableado del sensor ultrasónico LTI.
Interruptor indicador de nivel	Instalación	Implementación de indicadores multipunto a TK-001, TK-002 y TK-004
bomba de extracción de agua	Instalación	Adecuación de la planta para una bomba de extracción de agua

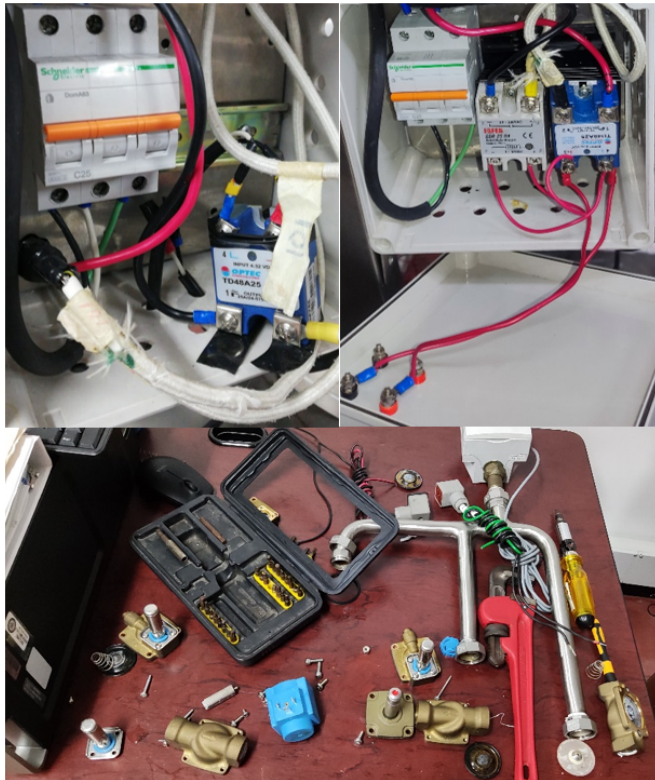


Fig. 2. Mantenimiento correctivo de la planta de proceso. Orden e idoneidad de dispositivos y reparación de sensores y actuadores.

cualquier sedimento que pudiera obstruir el flujo, reduciendo la probabilidad de falla. Los resultados se muestran en la figura 3.

Además, se encontraron sedimentos en los tanques que componen la planta provocados por la resistencia térmica, que libera el precipitado de óxido al calentar el fluido. Debido a esto, para evitar futuras obstrucciones en las tuberías y fallas en los elementos, se procedió a la limpieza de los tanques, eliminando los sedimentos.

C. Ajustes para prevención de fallas

La seguridad de un proceso debe abordarse en previsión de aquellos factores que pueden causar una falla en el sistema o proceso, como se describe en la literatura de gestión [8]. Por ello, y de acuerdo con las pruebas realizadas, se instalaron tres sensores interruptores de nivel multipunto en los tanques de

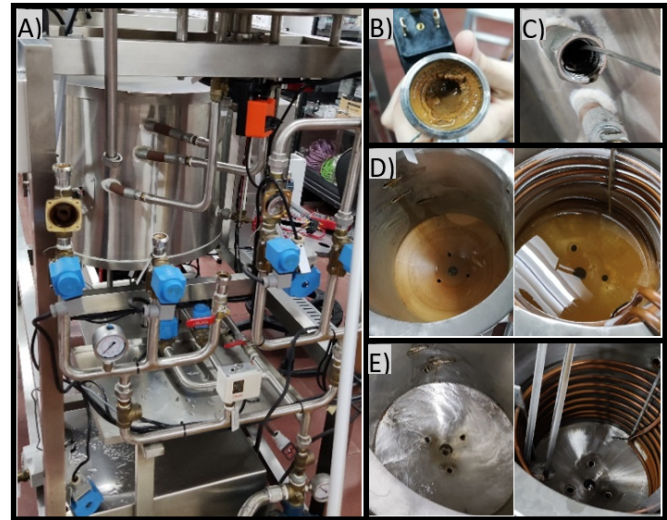


Fig. 3. Mantenimiento preventivo de la planta de proceso. A) Reparación del sistema de tuberías. B) Estado inicial de las tuberías por sedimentación y falta de mantenimiento. C) Limpieza de tuberías obstruidas. D) Superficies de tanques sucias por falta de mantenimiento. E) superficies del tanque después del mantenimiento.

alimentación y reserva para evitar derrames de fluido, daños en la bomba de retorno por cavitación, y daños en la resistencia térmica y condensador por una insuficiencia de líquidos.

El tanque depósito (tanque 4) tiene un desagüe de difícil acceso, lo que imposibilita la fácil extracción del fluido de la planta de proceso, para realizar el mantenimiento preventivo. Por ello, se diseñó un sistema de evacuación de agua, en el que se puede instalar una bomba hidráulica a dos alturas diferentes, para extraer el fluido en su totalidad, obteniendo como resultado una planta mezcladora de funcionamiento funcional y seguro.

III. AUTOMATIZACIÓN

Los sistemas de automatización industrial son de gran importancia en el proceso debido a que la probabilidad de fallas se mitiga con el monitoreo, ejecución y control de las variables del proceso, por lo que la automatización del proceso de mezclado es fundamental en este proyecto. La automatización se realizó con un Honeywell HC900 DCS integrado con "Software Designer" para programar el HC900, "HMI web display builder" para el SCADA y "Configuration studio" para vincular el HC900 con la ventana SCADA, trabajando



Fig. 4. Sensores de nivel multipunto instalados en tanques TK-001, TK-002 y TK-004.

en conjunto con estrategias o industriales metodologías de programación, como la guía GEMMA, GRAFCET, FBDs y mapas de Karnaugh.

A. Programación del DCS

En este proyecto, con el objetivo principal de programar el Honeywell DCS HC900, se aplicaron algunas etapas de la directriz GEMMA (Guide des Modes d'Etude et d'Arrets Marches) para garantizar la seguridad y autonomía del proceso. Para los sistemas de automatización industrial, la guía GEMMA proporciona un enfoque general del vocabulario y las prácticas de seguridad en el proceso industrial. No obstante, la directriz GEMMA no está muy extendida en la práctica industrial actual de programación de PLC, y es adaptable a las necesidades del proceso [9]. La directriz GEMMA es producto de una investigación realizada por la Agencia Nacional Francesa para el Desarrollo de la Producción Aplicada a la Industria (ADEPA) e incluye diferentes etapas para procedimientos de parada (A), procedimientos operativos (F) y procedimientos de emergencia (D) [10]. En este trabajo se aplicaron los procedimientos A1, F1, F2, F3, F5 y D1 (Ver 6). Al mismo tiempo, se aplicó la directriz GEMMA integrada con el SFC (Sequential Function Control) y el modelo de representación gráfica GRAFCET (Graphe Fonctionnel de Commande des Etapes et Transitions).

1) *SFC-GRAFCET*: El programa SFC está compuesto por etapas interconectadas con transiciones, donde las etapas corresponden a diferentes condiciones de proceso, permitiendo en este caso la ejecución automatizada del proceso de mezcla. A continuación, se explican las etapas del GEMMA y se muestra la programación del GRAFCET-SFC para cada tipo de procedimiento [10].

- Parada en estado inicial (A1): El estado inicial establece los diferentes valores del proceso en condiciones cero

o condiciones iniciales, dependiendo de los diferentes requerimientos. El DCS Honeywell HC900 permanece en este estado después de que el operador o usuario establezca las condiciones correctas para iniciar el proceso.

- Modo de verificación por orden (F5): Con el objetivo principal de garantizar la operación segura del proceso, el procedimiento F5 fue indispensable para el proceso, permitiendo la validación de los sensores y actuadores presentes en la planta mezcladora. Sin embargo, este procedimiento se puede omitir si el operador conoce de antemano el correcto comportamiento de la planta. De lo contrario, se recomienda realizar este proceso antes de iniciar la operación.
- Modo de preparación (F2): De acuerdo con los requisitos establecidos, el proceso debe comenzar siempre en las mismas condiciones, llenando los tanques de suministro y reserva, y el tanque de control debe estar vacío. Con el fin de lograr el correcto funcionamiento del proceso, el procedimiento F2 consiste en suministrar el fluido requerido a los tanques y calentar y enfriar el fluido en los puntos de consigna deseados.
- Modo de producción (F1): El estado F1 es donde se establece el control. Este estado de GEMMA permite el funcionamiento normal del proceso, supervisando todas las variables del proceso y como resultado, el nivel y la temperatura deseada en el tanque de control.
- Modo de cierre (F3): Al final de la producción normal, o en este caso, luego de obtener los resultados de temperatura y nivel deseados, el operador debe cerrar el proceso, lo que lleva inicialmente a deshabilitar la resistencia de calentamiento para recircular el fluido por un tiempo. Además, el proceso debe terminar en condiciones seguras, evitando la liberación del fluido.
- Parada de emergencia (D1): A lo largo del proceso, el sistema verifica las condiciones de seguridad y si detecta alguna anomalía, se activa un estado de alarma y, en consecuencia, se activa también el procedimiento D1. Además, se apagan los elementos críticos y se detiene el proceso.

2) *Mapas de Karnaugh*: La directriz GEMMA utilizada para la automatización del proceso de mezcla integra las condiciones de la transición para pasar de una etapa a otra, siendo un resultado booleano el criterio de esta. Sin embargo, podría ser difícil establecer una ecuación corta para optimizar el cronograma y asegurar el correcto funcionamiento del proceso. El mapa de Karnaugh fue el método utilizado para establecer las condiciones de transición de la guía GEMMA. La técnica del mapa de Karnaugh fue introducida por Karnaugh en [11], [12] y es una estrategia para simplificar funciones lógicas de acuerdo con los valores 1 y 0 de las variables asociadas, reduciendo la función de costo en términos mínimos correspondientes a un grupo de puertas AND que alimentan una sola puerta OR. De acuerdo con [11] La técnica de Karnaugh comprende 2^n entradas, donde n son los números de las variables. Después de establecer los valores 1 y 0 según las

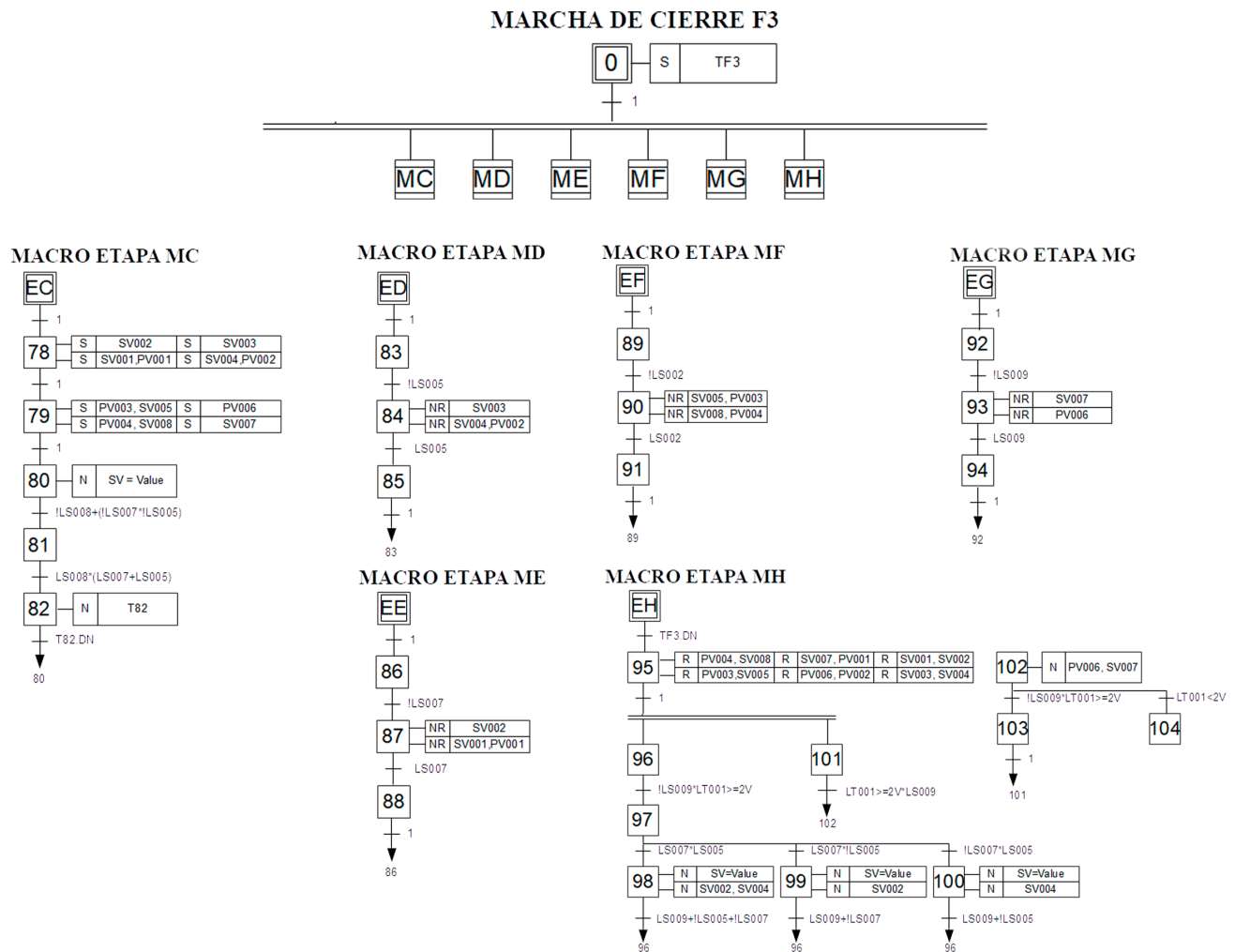


Fig. 5. Programación GRAFCET de la etapa F3.

condiciones de las variables. Se deben establecer cuadrados de 1 valor de 2^m dimensiones, obteniendo como resultados puertas AND para cada cuadrado y como función final el OR de las funciones ANDs. En el proceso de mezcla, las principales condiciones establecidas con la técnica de Karnaugh consisten en las condiciones de emergencia, considerando posibles fallas de los sensores y niveles críticos de agua.

3) *Diagrama de bloques de funciones:* El lenguaje de programación del diagrama de bloques de funciones (FBD) descrito en [13] es una representación gráfica restringida de la lista de instrucciones (IL) del lenguaje orientado a la máquina con operadores de bloques lógicos comunes (AND, OR, NOT...). [14], [15]. Se utilizó para programar el HC900 Honeywell DCS mediante Designer Software, adaptando la lógica realizada en Grafcet y dividiendo el FBD en diferentes secciones (Entradas, salidas, A1, F1, F2...), facilitando su lectura.

B. SCADA

El sistema SCADA es una tecnología utilizada en la industria para la supervisión, control y adquisición de datos de procesos industriales. Por lo tanto, este software comunica la HMI con los controladores lógicos programables (PLC) u otros módulos de hardware comercial, en este caso, comunica el DCS con la interfaz de monitoreo diseñada (HMI).

Los beneficios que se pueden esperar de la implementación de un sistema SCADA para el control de procesos industriales se pueden resumir de la siguiente manera:

- Gran funcionalidad y amplias facilidades de desarrollo.
- La cantidad de desarrollo específico que debe realizar el usuario final es limitada, especialmente con la ingeniería adecuada.
- Fiabilidad y robustez. Estos sistemas se utilizan para procesos industriales de misión crítica donde la confiabilidad y el rendimiento son primordiales. Además, el desarrollo específico se realiza dentro de diseños seguros, basados

GRAFNET GEMMA

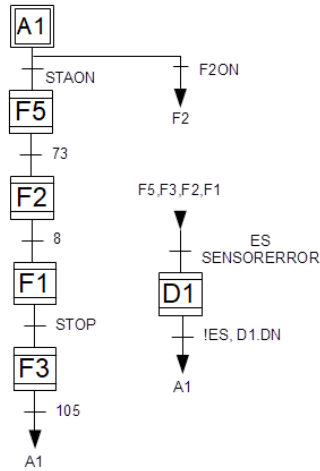


Fig. 6. Grafnet del procedimiento GEMMA.

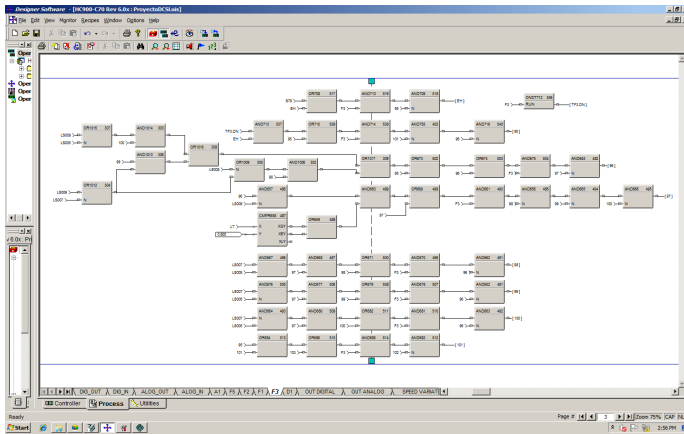


Fig. 7. Parte del FBD del estado F3.

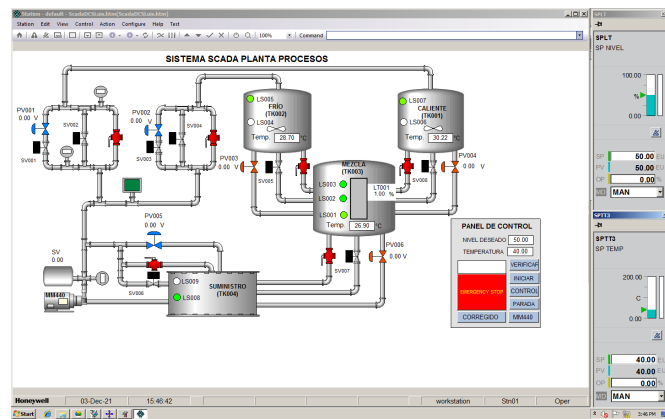


Fig. 8. HMI-SCADA Diseño de la planta de proceso, presentando su sistema de tuberías, los tanques y sensores y actuadores.

en estándares, que logran una mejora en la fiabilidad y la robustez.

Al usar HMI Web Display Builder, se diseñó una HMI para monitorear todos los sensores y actuadores de la siguiente manera:

- Visualización de la activación de válvulas ON-OFF a través de indicadores.
- Visualización de los indicadores de nivel de agua Bajo y Alto y valor de temperatura en grados Celsius de los TK-001 y TK-002 para evitar derrames o falta de agua y monitorear una correcta temperatura de proceso en estos.
- Visualización del porcentaje de apertura de válvulas proporcionales en un rango de 0-100.
- El nivel de agua y la temperatura en TK-003, que son las variables controladas.
- Alarmas.

Además, permite controlar el nivel y la temperatura de TK-003 e incluye algunos botones para configurar el proceso, incluido un botón de parada de emergencia.

C. Configuration Studio

Configuration Studio proporciona una ubicación central para las herramientas necesarias para configurar, verificar el estado y acceder a la información del sistema. Esto permite administrar todos los aspectos de la configuración del sistema, incluidos, entre otros, la configuración del hardware, el historial, el OPC, las estrategias de control, los controladores e incluso los dispositivos de campo. Aquí, los sensores y actuadores se vincularon a las pantallas HMI y se configuraron las alarmas de nivel. Este software también permite el almacenamiento de datos adquiridos, como variables controladas de temperatura y nivel.

IV. MODELADO Y CONTROL

A. Modelo dinámico

La mayoría de los controles de procesos industriales involucran diferentes entradas (variables manipuladas) y salidas (variables controladas), refiriéndose a estos procesos como MIMO (múltiples entradas-múltiples salidas). La figura 9 muestra el comportamiento del proceso de mezcla MIMO, compuesto por dos flujos de entrada (w_c, w_h) asociados con temperaturas, T_c y T_h , respectivamente, consideradas como perturbaciones. El nivel H y la temperatura T del tanque de mezcla deben controlarse [16].

El análisis de las variables manipuladas, las variables controladas y las perturbaciones del proceso permiten establecer un modelo dinámico del proceso, los cuales representan el comportamiento de un sistema, siendo fundamentales para determinar el control de un proceso. Por otra parte, los diferentes modelos de procesos se basan en leyes de conservación tales como la conservación de la masa y la energía, presentes en este proceso debido a las correspondientes variables de los flujos de entrada (Q_h, Q_c, T_h, T_c) y el flujo de salida.

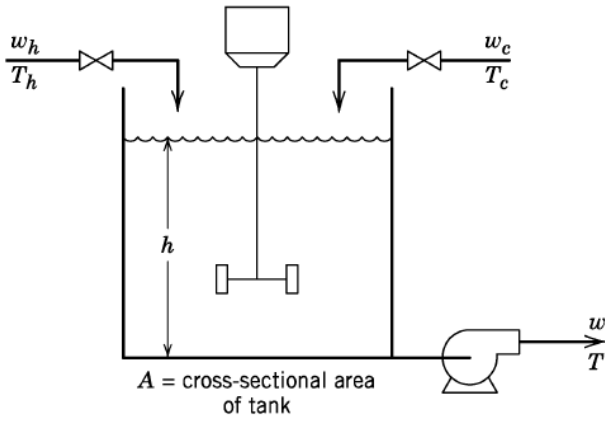


Fig. 9. Esquema del proceso de mezcla de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO), Copyright© 2011, 2004, 1990 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

1) *Conservación de la masa:* El proceso de mezcla tratado en este proyecto está compuesto por dos caudales de entrada y uno de salida. Considerando el caudal de salida como constante, los caudales de entrada son las variables manipuladas para obtener el valor deseado de la variable controlada H . Para establecer la dinámica del modelo correspondiente a la variación de altura del tanque controlado, se parte de la tasa de acumulación de masa Δw descrita en la siguiente expresión:

$$\Delta w = w_{in} - w_{out} \quad (1)$$

Donde w_{in} corresponde a la suma de los flujos masicos de entrada. $w_{in} = w_c + w_h$. Además, la tasa de acumulación de masa se puede expresar como la tasa de volumen por densidad, considerando para este análisis el valor de la densidad como una constante [16].

$$\frac{d(V\rho)}{dt} = w_c + w_h - w_{out} \quad (2)$$

Finalmente, debido a que el proceso de mezclado industrial tratado en este proyecto tiene un área constante del tanque agitado, la tasa de altura (variable controlada) se puede expresar en términos de flujos volumétricos.

$$\frac{dH}{dt} = \frac{1}{A} [q_h + q_c - q] \quad (3)$$

2) *Conservación de la energía:* El proceso de mezcla industrial tiene dos variables controladas debido a su naturaleza como sistema MIMO. La dinámica del modelo de temperatura está determinada por la ley de conservación de la energía, también llamada Primera Ley de la Termodinámica. La energía total de un sistema termodinámico se compone de energía interna, energía cinética y energía potencial. No obstante, debido a cambios más pequeños en la energía cinética y potencial en comparación con la energía interna, se desprecian. Además, las temperaturas del líquido en el tanque agitado no

se ven afectadas por la temperatura, lo que establece el balance de energía como [16].

$$\frac{dU_{int}}{dt} = -\Delta(w\hat{H}) \quad (4)$$

Donde w es el flujo másico y $\hat{H}$ es la entalpía por unidad de masa. Asimismo, para líquidos puros a presiones bajas y moderadas, la energía interna por unidad de masa se puede aproximar como la entalpía por unidad de masa y H depende solo de la temperatura [16].

$$d\hat{H} = CdT \quad (5)$$

Donde C es la capacidad calorífica a presión constante. Suponiendo que el tanque de mezcla tiene una condición de temperatura T y entalpía $\hat{H}$, se puede integrar la ecuación 5 a una temperatura de referencia (T_{ref}), dando como resultado:

$$\hat{H} - \hat{H}_{ref} = C(T - T_{ref}) \quad (6)$$

Con base en lo anterior, el término de convección $-\Delta(w\hat{H})$ de (4) se puede escribir como:

$$-\Delta(w\hat{H}) = w_c[C(T_c - T_{ref})] + w_h[C(T_h - T_{ref})] - w[C(T - T_{ref})] \quad (7)$$

Considerando que el líquido varía con el tiempo y la energía interna total del líquido en el tanque se puede expresar como el producto entre la masa y la energía interna por unidad de masa en el tanque ($U_{int} = \rho V \hat{U}_{int}$) [16]. El balance de energía para este proceso es el siguiente:

$$\rho C \frac{dV(T - T_{ref})}{dt} = w_h C(T_h - T_{ref}) + w_c C(T_c - T_{ref}) - w C(T - T_{ref}) \quad (8)$$

Expandiendo por la regla de la cadena, la derivada presentada en (8) da:

$$\rho C \frac{dV(T - T_{ref})}{dt} = \rho C(T - T_{ref}) \frac{dV}{dt} + \rho CV \frac{dT}{dt} \quad (9)$$

Finalmente, sustituyendo (7) en el lado izquierdo de (9), la ecuación gobierna el comportamiento dinámico de la temperatura controlada del proceso:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{AH} [q_h T_h + q_c T_c - (q_h + q_c) T] \quad (10)$$

B. Identificación del modelo

La identificación del modelo teórico puede no ser práctica en varios procesos industriales debido a la complejidad de obtener los parámetros desconocidos. Una alternativa a estos modelos teóricos son los enfoques de modelado en aplicaciones de control a través de los datos experimentales. Los modelos empíricos se conocen como modelos de caja negra cuando se desconocen todos sus parámetros y se obtienen mediante aproximaciones basadas en pruebas experimentales, a este proceso se le conoce como identificación de proceso o de sistema. [16].

El ajuste empírico del modelo de proceso se realiza a través del análisis de la respuesta transitoria del sistema ante un cambio en el flujo de entrada. En este trabajo, el proceso de mezcla está compuesto por dos variables de entrada y dos variables de salida, por lo que se requieren cuatro modelos empíricos para determinar el comportamiento de cada variable controlada con respecto a cada variable manipulada. Para ello se aplicó el principio de superposición, observando el comportamiento de las salidas al cambiar un valor de entrada (variable manipulada) mientras las demás entradas se mantienen constantes [16]. Los modelos de plantas se obtuvieron mediante la aproximación realizada por la herramienta de identificación del sistema del software Matlab, a partir de los datos experimentales. Los modelos de nivel de tanque se presentan a continuación:

$$\frac{H}{Q_c} = \frac{0.91366}{(1 + 968.66s)(1 + 23.464s)} \quad (11)$$

$$\frac{H}{Q_h} = \frac{0.74744}{(1 + 968.66s)(1 + 23.464s)} \quad (12)$$

Asimismo, los modelos obtenidos a partir de la temperatura con respecto a los caudales de entrada son:

$$\frac{T}{Q_c} = \frac{-0.0076082}{(1 + 17643s)(1 + 519.16s)} \quad (13)$$

$$\frac{T}{Q_h} = 0.48153 \cdot \frac{1 - 4057.3s}{(1 + 16232s)(1 + 3.1402s)} \cdot e^{-2.598s} \quad (14)$$

Como se puede observar, los modelos experimentales obtenidos mediante la identificación del sistema tienen características lineales de segundo orden. Sin embargo, el sistema de mezcla MIMO tiene características no lineales. Sin embargo, este sistema puede ser ajustado a través de modelos lineales en un punto de operación específico, garantizando una aproximación adecuada bajo esas características definidas, siendo en este proyecto un nivel de 62% y una temperatura de 65 °C.

C. Diseño del controlador

Con base en los modelos ajustados, se diseñaron los controladores del sistema. Debido a su correlación entre una variable de salida y una de entrada, este proceso puede llevarse a cabo como un sistema SISO (single-input, single-output). Para el control de nivel, se estableció como variable de entrada del sistema la altura de agua en términos de tensión ($H_{max} = 10V$; $H_{min} = 0V$). La salida del controlador corresponde a un valor de tensión proporcional a la apertura de la válvula de suministro del tanque frío. Los requisitos de este proyecto para el control de nivel corresponden a un valor de sobre impulso inferior al 16% y un tiempo de estabilización de 1200 segundos. El controlador de nivel del sistema fue diseñado con Matlab SISOTOOL Toolbox, estableciendo un control PI, debido a su sencillez de implementación y eliminación del error en estado estacionario. el control de nivel establecido se puede expresar como:

$$C_H = K_p(1 + \frac{1}{T_i s}); K_p = 5, T_i = 300[s] \quad (15)$$

Asimismo, para el controlador de temperatura, un valor de tensión suministrado por el transmisor de temperatura representa la entrada del sistema. La salida del controlador está dada por una tensión proporcional a la apertura de la válvula del tanque de suministro de agua caliente. Se diseñó un controlador PI basado en un sobreimpulso inferior al 16% y un tiempo de establecimiento inferior a 8000 segundos (según criterio de autores). El controlador obtenido a través del SISOTOOL se puede expresar como:

$$C_T = K_p(1 + \frac{1}{T_i s}); K_p = 7.5, T_i = 3750[s] \quad (16)$$

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se muestran los resultados experimentales obtenidos en el proceso de mezclado industrial. El primer paso está enfocado a la operación del sistema, validando la correcta implementación del mantenimiento de la planta. Se realizó la automatización del proceso, permitiendo validar su funcionamiento y el mantenimiento realizado. En este trabajo se configuró el sistema SCADA implementado para presentar el esquema del proceso físico, representando el estado de los elementos digitales con un código de colores. En el caso de señal digital, la ausencia de señal eléctrica se mostrará en negro en el actuador y en blanco en el sensor, mientras que la presencia de señal se indicará en verde. Las señales analógicas, por otro lado, mostrarán su valor en la pantalla al lado del dispositivo respectivo.

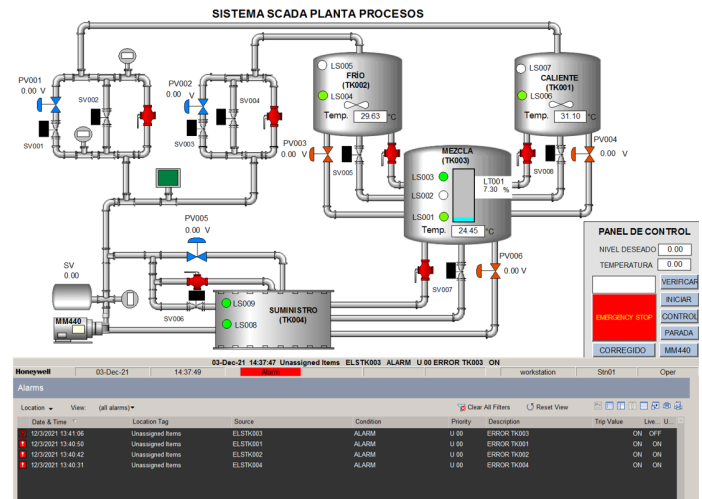


Fig. 10. Sistema scada de procesos con activación de alarmas en caso de errores en los sensores de medida del sistema

En este trabajo, para garantizar la seguridad del proceso de mezclado, se implementó el procedimiento de parada de emergencia por fallas en los sensores. Las fallas de los sensores generan la parada de todos los actuadores del sistema y presentan una alarma en el sistema SCADA, como se muestra

en la Figura 10. En consecuencia, la representación del sistema SCADA, presentada en este trabajo, valida adecuadamente el funcionamiento de los sistemas de mantenimiento y automatización realizados.

El proceso de control de la planta de proceso fue validado experimentalmente en condiciones reales, implementando simultáneamente los dos controladores en la planta mezcladora hasta alcanzar los valores de consigna deseados. El acoplamiento de los controladores presenta una perturbación para cada uno de ellos debido a que los controles fueron diseñados por separado como sistemas SISO. El gráfico de la variable controlada por nivel y la variable manipulada (Q_c) con respecto al tiempo se presentan en la figura 11. La respuesta del sistema para garantizar el nivel satisface las condiciones de sobreimpulso y tiempo de establecimiento.

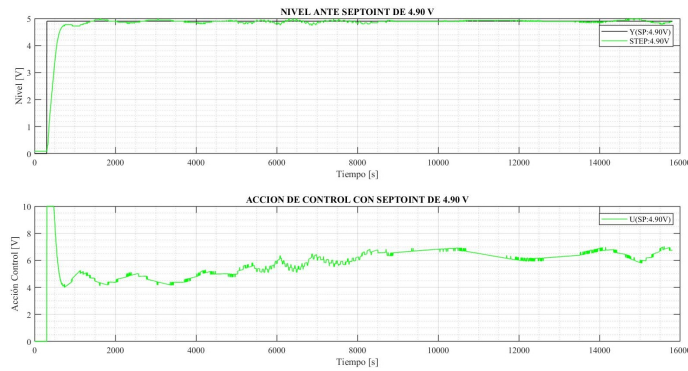


Fig. 11. Control de nivel

A su vez, la gráfica de la variable controlada por temperatura y la variable manipulada (Q_h) referente al tiempo, se presentan en la figura 12. El proceso controlado por temperatura presenta una constante de tiempo más lenta que el proceso nivelado, debido al diseño de los controladores como sistemas SISO. Debido a esto, la variable de nivel alcanza el valor deseado más rápido que la temperatura. Una vez que se alcanza el nivel de referencia, el sistema continúa generando cambios en la variable manipulada rechazando la perturbación del flujo caliente en el sistema.

Asimismo, debido a la lenta constante de tiempo de la temperatura, el sistema no presenta cambios bruscos en la acción de control del controlador de temperatura con respecto al controlador de nivel. El sistema alcanza el estado estacionario de nivel y temperatura, garantizando compensar el efecto de las perturbaciones provocadas por la dinámica acoplada del sistema (caudales de agua fría y caliente). Por otro lado, pueden ocurrir diferencias entre la simulación y el proceso real debido a las características no lineales del sistema y su aproximación a un proceso modelo lineal. Sin embargo, los resultados obtenidos garantizan un control preciso de las variables del proceso, y su implementación es adecuada. Finalmente, no se puede obtener un tiempo de establecimiento de respuesta de circuito cerrado más corto, porque los actuadores no permiten un calentamiento o enfriamiento más rápido del

fluido. En consecuencia, estas características de los actuadores son una limitación en el diseño de controladores de sistemas.

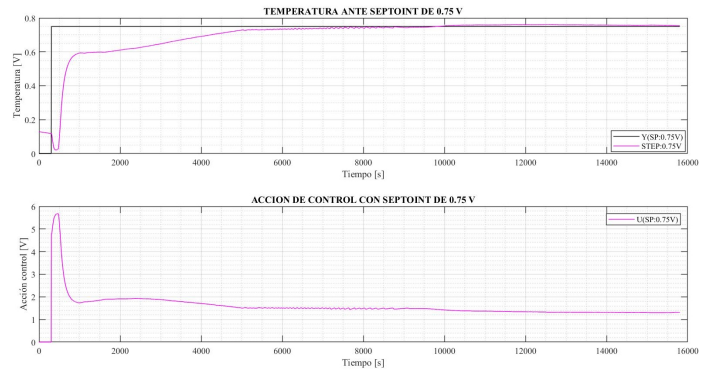


Fig. 12. Control de temperatura

VI. CONCLUSIONES

En esta investigación se presenta el mantenimiento, automatización y control de un proceso industrial de mezcla. La seguridad de un proceso industrial comienza con el mantenimiento de los componentes del sistema, como se evidencia en este trabajo. Los sedimentos en las tuberías y la falla de diferentes elementos (sensores y actuadores) del proceso son consecuencia de la ausencia de mantenimiento preventivo periódico, el cual es necesario para optimizar un proceso industrial. Por otra parte, se realizó un sistema de automatización utilizando un DCS Honeywell HC900. En la automatización se implementó la guía GEMMA y la metodología GRAFCET, garantizando un proceso seguro. Además, se evidencia que estas metodologías pueden adaptarse a las necesidades del proceso, utilizando procedimientos específicos (A1, F1, F2, F3, F5, D1) como en este trabajo. El diagrama de bloques de funciones (FBD) fue la metodología de programación implementada debido a las características de los DCS, no siendo un impedimento por la adaptabilidad de las metodologías SFC. Asimismo, se diseñaron y validaron en condiciones reales los controladores de temperatura y nivel. En consecuencia, se encontró que un proceso no lineal puede controlarse mediante técnicas lineales para puntos operativos específicos. Una fuerte correlación de las variables seleccionadas permitió el diseño de dos controladores PI utilizando técnicas SISO con resultados bajo los parámetros deseados. A su vez, los resultados de las pruebas experimentales de control de temperatura y nivel del tanque de mezcla validaron el control del sistema y el rechazo de la perturbación presente por el acoplamiento del sistema. Finalmente, debido a las características de los actuadores instalados usados en la planta en el proceso de calefacción y refrigeración, el sistema no puede actuar más rápido, siendo una limitación en el diseño de controladores para este proceso.

Acknowledgment: Este trabajo ha sido apoyado y parcialmente financiado por la Universidad Santo Tomás (Colombia).

Conflictos de interés: Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

REFERENCES

- [1] A. Klimenko, What is mixing and can it be complex?, *Physica Scripta* 2013 (T155) (2013) 014047.
- [2] A. Rojas-Moreno, J. J. Hernandez-Garagatti, Modeling a multipurpose water tank plant, in: 2017 IEEE XXIV International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON), IEEE, 2017, pp. 1–4.
- [3] M. Akbariza, D. Handoko, P. Prajitno, Temperature and water level control in a multi-input, multi-output process using neuro-fuzzy controller, in: *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1816, IOP Publishing, 2021, p. 012022.
- [4] K. Hitomi, Automation—its concept and a short history, *Technovation* 14 (2) (1994) 121–128.
- [5] E. D. Villanueva, J. F. D. Pérez-Tagle, C. L. de León, La productividad en el mantenimiento industrial, *Compañía Editorial Continental*, 1989.
- [6] Y. Wang, C. Deng, J. Wu, Y. Wang, Y. Xiong, A corrective maintenance scheme for engineering equipment, *Engineering Failure Analysis* 36 (2014) 269–283.
- [7] C. H. Lie, Y. H. Chun, An algorithm for preventive maintenance policy, *IEEE Transactions on Reliability* 35 (1) (1986) 71–75.
- [8] G. I. Rochlin, Safe operation as a social construct, *Ergonomics* 42 (11) (1999) 1549–1560.
- [9] G. Barbieri, D. A. Gutierrez, A gemma-grafcet methodology to enable digital twin based on real-time coupling, *Procedia Computer Science* 180 (2021) 13–23.
- [10] D. Jovanny, Structured design of automatic systems: Applying the gemma/sfc approach to a mechatronics teaching system, in: 2014 III International Congress of Engineering Mechatronics and Automation (CIIMA), IEEE, 2014, pp. 1–5.
- [11] M. Karnaugh, The map method for synthesis of combinational logic circuits, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics* 72 (5) (1953) 593–599.
- [12] C. Wang, Y. Tao, Karnaugh maps of logical systems and applications in digital circuit design, *Circuits, Systems, and Signal Processing* 39 (5) (2020) 2245–2271.
- [13] I.-I. E. Commission, et al., *Iec 61131-3-programmable controllers—part 3: Programming languages*, CH Geneva.
- [14] O. Pavlovic, H.-D. Ehrich, Model checking plc software written in function block diagram, in: 2010 Third International Conference on Software Testing, Verification and Validation, IEEE, 2010, pp. 439–448.
- [15] T. Ausberger, K. Kubíček, P. Medvecová, T. Myslivec, M. Štětina, Model checking application on function block diagram model, in: 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Vol. 1, IEEE, 2020, pp. 1807–1814.
- [16] D. E. Seborg, T. F. Edgar, D. A. Mellichamp, F. J. Doyle III, *Process dynamics and control*, John Wiley & Sons, 2016.