

Integración entre MATLAB y STARDOM FCN-RTU para la simulación de algoritmos de control de procesos

MATLAB-STARDOM FCN-RTU integration for process control algorithm simulation

Peña, Andres¹; Mirena, Juan¹; Pittol, José^{2,3*}

¹Departamento de Automatización, Instrumentación y Telecomunicaciones, Controval C.A. Caracas, Venezuela

²Departamento de Ventas y Mercadeo, Controval C.A. Caracas, Venezuela

³Departamento de Procesos y Sistemas, Universidad Simón Bolívar. Caracas Venezuela

[*jpittol@usb.ve](mailto:jpittol@usb.ve)

Resumen

En el sector industrial, el control de procesos representa un aspecto crítico en la operación segura y eficiente de cualquier planta o sistema. El sistema de control basado en redes Yokogawa STARDOM, ofrece una solución para la automatización industrial de gran flexibilidad y bajo costo de implementación. Por otra parte, MATLAB es uno de los software de aplicación más utilizados a nivel académico para la construcción y simulación de modelos dinámicos. Adicionalmente, cuenta con herramientas para diseñar diferentes algoritmos de control como PID, cascada o feed-forward; y estudiar los efectos producidos por su implementación en el comportamiento dinámico de un modelo.

La integración entre estas aplicaciones se logró a través del estándar OPC mediante configuraciones sencillas con el uso de herramientas de Yokogawa y MATLAB. Esta integración permitió realizar la simulación de cuatro procesos típicos industriales en MATLAB y diseñar los algoritmos de control en el STARDOM. Al utilizar las herramientas de diseño de control de MATLAB se logró implementar las mismas en STARDOM y luego modificarlas para obtener mejores respuestas en los procesos, lo que permite en general facilitar el diseño de algoritmos de control y reducir tiempos de sintonización en los arranques de planta. Adicional a esta integración se utilizó la herramienta InfoWell de Yokogawa como HMI para mostrar las simulaciones en un despliegue gráfico y observar las variables de interés. Este artículo detalla la integración mencionada, cuyos resultados muestran su potencialidad en varios campos de la ingeniería de control.

Palabras Clave: RTU, Integración, OPC, Simulink, Control de procesos.

Abstract

In the industrial sector, process control represents a critical aspect in safe and efficient operation of any plant or system. The STARDOM Yokogawa network-based control system offers a solution for high flexibility and low cost industrial automation implementation. On the other hand, MATLAB is one of the most used application software in academic level for dynamic model building and simulation. Furthermore, it's provided with control algorithm design toolboxes for PID, cascade or feed-forward; which can be used to study the implementation effects in the dynamic behavior of a plant model.

The integration between MATLAB-STARDOM applications was achieved by OPC standard. This integration allowed the simulation of four typical industrial processes in MATLAB and the design the control algorithms in STARDOM. By using the MATLAB control design toolboxes, it was possible to implement the algorithms in STARDOM and then modify them to obtain better dynamic performance, which allows to ease the control algorithm design and reduce tuning time in plant startup. In addition to this integration, the Yokogawa InfoWell was used as a Human-Machine-Interface to show the simulations in a graphic display and monitor variables of interest. This article details the mentioned integration, whose results show its potentiality in various control engineering fields.

Keywords: RTU, Integration, OPC, Simulink, process control.

1 Introducción

El controlador STARDOM FCN-RTU de Yokogawa es un sistema de control basado en redes capaz de operar bajo condiciones severas de proceso, manejar múltiples señales I/O integradas y varios protocolos de comunicación. Este sistema cuenta con varios algoritmos de control integrados, como control PID, control en cascada, control Feed-Forward, entre otros. Estos permiten un adecuado control de cualquier proceso, capaz de disminuir el impacto de distintas perturbaciones (Yokogawa 2014). Además de las aplicaciones relacionadas al control de procesos, STARDOM posee la licencia InfoWell que le añade funciones de supervisión de datos y HMI (Interfaz Hombre-Máquina) (Yokogawa 2015).

OPC (OLE (Object Linking and embedding) for Process Control) es el estándar de interoperabilidad para el intercambio seguro y confiable de información en el espacio de automatización industrial y otras industrias. Es una plataforma independiente que asegura el sinfín de flujo de información entre dispositivos de múltiples vendedores, con la característica de poseer compatibilidad con programas en Windows. Un servidor de acceso a datos OPC está conformado por varios objetos: el servidor, el grupo y el elemento. El servidor ofrece sirve como contenedor de grupos de objetos OPC. El grupo mantiene información acerca de sí mismo y proporciona los mecanismos para contener y organizar lógicamente los elementos OPC. Los elementos representan conexiones a fuentes de datos dentro del servidor (OPC Foundation 2017).

MATLAB es un software matemático computacional que ofrece un entorno de desarrollo integrado con lenguaje de programación propio, utilizado para el desarrollo de soluciones computacionales a problemas de ingeniería en una amplia variedad de sectores industriales (Mathworks 2017). MATLAB dispone además de una poderosa herramienta de simulación llamada Simulink; la cual permite, a través de un entorno de programación basada en objetos, la construcción del modelo de un proceso o sistema. Adicionalmente, Simulink facilita el estudio del comportamiento temporal del modelo a través de una simulación dinámica, funcionando como un entorno de programación visual, el cual es comúnmente usado como una herramienta de simulación de modelos, sistemas o procesos (Mathworks 2017).

Debido a que Simulink es la herramienta de MATLAB para ejecutar simulaciones de procesos, ella dispone de bloques dedicados para configurar una comunicación OPC y realizar la integración deseada. Cuenta con los siguientes cuatro bloques de funciones (Mathworks 2017):

- *OPC Configuration*: Permite establecer la conexión OPC entre Simulink y el STARDOM.
- *OPC Quality Parts*: Permite verificar la calidad de la comunicación de los ítems en el servidor OPC.
- *OPC Read*: Permite la lectura de un ítem OPC en el servidor.
- *OPC Write*: Permite la escritura de un ítem OPC en el servidor.

Una de las funciones beneficiosas de MATLAB es que éste posee varias herramientas de control de procesos, entre las cuales permite el diseño sencillo y rápido de controladores, usando Simulink como un simulador para la verificación del diseño de dicho controlador. Esta herramienta es conocida como SISOTool, el cual permite un diseño preliminar de algoritmos de control PID e inclusive esquemas avanzados (Mathworks 2017).

En conjunto, MATLAB y el controlador STARDOM pueden emplearse para el diseño de algoritmos de control y simular, en tiempo real, los efectos de su implementación en la respuesta temporal de un proceso. De esta manera, se puede evaluar el desempeño del controlador de una forma efectiva y segura. En este artículo se detalla la integración OPC entre STARDOM y MATLAB, además de mostrar los resultados obtenidos para diversos casos de aplicación.

2 Metodología de integración

La integración entre MATLAB y STARDOM se realizó mediante el uso de la herramienta “Yokowaga IT Security Tool”, que permitió las configuraciones necesarias de políticas y seguridad para efectuar la conexión de MATLAB con el servidor OPC de STARDOM (Yokogawa 2014).

A su vez, fue obligatorio realizar la instalación de los componentes principales de OPC Foundation en MATLAB. Para realizar dicha instalación, se utilizó el comando “opcregister” en la ventana de comando. Una vez realizada la configuración de la PC, se pudo verificar la conexión de MATLAB con el servidor OPC gracias a un toolbox instalado de fábrica llamado “OPC Data Access Explorer”, cuya ventana principal se muestra a en la figura 1 (Mathworks 2017).

En STARDOM, la declaración de variables OPC se realizó en el programa “Logic Designer” de Yokogawa, que permite la configuración de las lógicas de control en STARDOM (Yokogawa 2014). Una vez declaradas las variables para la comunicación OPC, estas fueron leídas

desde Simulink al usar los bloques OPC Read y OPC Write, lo cual confirmó la integración entre ambos programas.

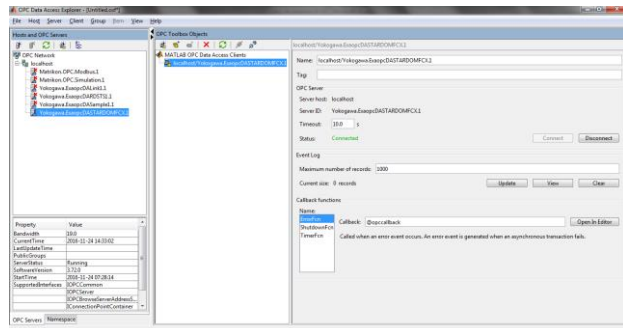


Figura 1. Ventana principal del Toolbox OPC Data Access Explorer.

Con el objetivo de probar la integración entre MATLAB y STARDOM, se propusieron 4 modelos de procesos típicos industriales con distintas estrategias de control, como PID, PID multivariable, Feed-Forward y Cascada. Los modelos planteados se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Estrategias de control implementadas para los modelos seleccionados.

Proceso	Estrategia de control
Planta de neutralización	Control PID multivariable
Intercambiador de calor	Control PID
Horno	Control PID, cascada
Llenado de tanques	Control PID + feed-forward

La planta de neutralización consiste en la producción de acetato de sodio (CH₃COONa) a partir de una reacción de neutralización entre ácido acético (CH₃COOH) y soda cáustica (NaOH), como se muestra en la figura 2 (Fratallone y col., 2012).

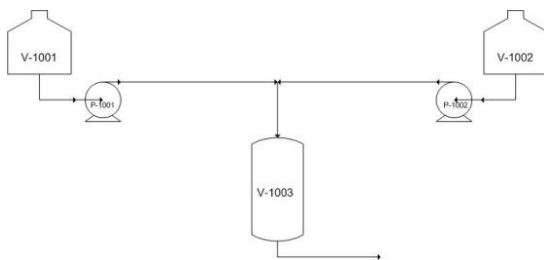


Figura 2. Planta de neutralización de ácido acético y soda cáustica.

Los objetivos de control del proceso son el nivel de producto en el tanque V-1003 (H) y el pH del mismo, manipulando el voltaje de las bombas de alimentación (V₁, V₂). El modelo matemático que describe la dinámica del proceso se muestra en las ecuaciones 1, 2 y 3:

$$\frac{dH(t)}{dt} = \frac{K \cdot V_1(t)}{A_T} + \frac{K \cdot V_2(t)}{A_T} - \frac{A_t}{A_T} \cdot \sqrt{2gH(t)} \quad (1)$$

$$x(t) \frac{dH(t)}{dt} + H(t) \frac{dx(t)}{dt} = \frac{C_{20} \cdot K \cdot V_2(t)}{A_T} - \frac{C_{10} \cdot K \cdot V_1(t)}{A_T} - x(t) \cdot \frac{A_t}{A_T} \cdot \sqrt{2gH(t)} \quad (2)$$

donde

$$pH = \begin{cases} -\log\left(\frac{x}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{4 \cdot Kw}{x^2}} - 1\right)\right) & \text{si } x > 0 \\ -\log\left(-\frac{x}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{4 \cdot Kw}{x^2}} - 1\right)\right) & \text{si } x < 0 \\ -\log(\sqrt{Kw}) & \text{si } x = 0 \end{cases} \quad (3)$$

El significado y valor de cada variable se muestra en el apéndice en la tabla A.1.

El intercambiador de calor consiste en un equipo para enfriar aceite de motor con un refrigerante, como se muestra en la figura 3 (Kern 1965).

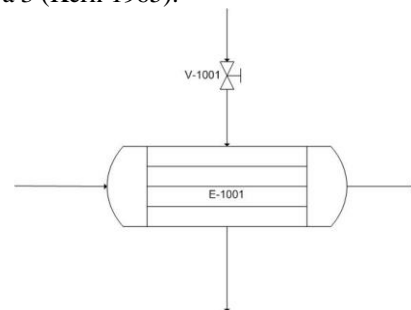


Figura 3. Intercambiador de calor.

El objetivo de control es la temperatura de salida del aceite (T_{ho}) manipulando la apertura de la válvula (x) que permite circular el refrigerante. El modelo matemático que describe la dinámica del proceso se muestra en las ecuaciones 4 y 5:

$$\rho_C \cdot \left(\pi \cdot \frac{D_S^2}{4} \cdot \frac{L_T}{N_p} - \pi \cdot \frac{D_0^2}{4} \cdot L_T \cdot N_t \right) \cdot C_{pC} \cdot \frac{dT_{Co}(t)}{dt} = \dot{m}_C(t) \cdot C_{pC} \cdot (T_{Ci} - T_{Co}(t)) + A_o U(t) \cdot \left(\frac{T_{Ho}(t) - T_{Ci} - T_{Hi} + T_{Co}(t)}{\ln\left(\frac{T_{Ho}(t) - T_{Ci}}{T_{Hi} - T_{Co}(t)}\right)} \right) \quad (4)$$

$$\rho_H \cdot C_{pH} \cdot \pi \cdot \frac{D_i^2}{4} \cdot L_T \cdot N_t \cdot \frac{dT_{Ho}(t)}{dt} = \dot{m}_H(t) \cdot C_{pH} \cdot (T_{Hi} - T_{Ho}(t)) - A_o U(t) \cdot \left(\frac{T_{Ho}(t) - T_{Ci} - T_{Hi} + T_{Co}(t)}{\ln\left(\frac{T_{Ho}(t) - T_{Ci}}{T_{Hi} - T_{Co}(t)}\right)} \right) \quad (5)$$

donde $\dot{m}_C(t) = f(x(t))$ y $U(t) = f(T_{Ho}(t), T_{Co}(t), x(t))$

El significado y valor de cada variable se muestra en el apéndice en la tabla A.2.

El horno consiste en un intercambiador de calor de fuego dirigido utilizado para calentar aceite utilizando metano como gas combustible, como se muestra en la figura 4 (Roffel y col., 1974).

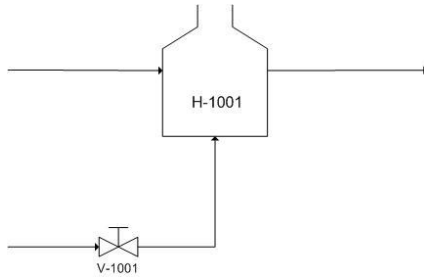


Figura 4. Horno de proceso

El objetivo de control es la temperatura de salida del aceite (T_f) manipulando la apertura de la válvula de gas combustible (x). El modelo matemático que describe la dinámica del proceso se muestra en las ecuaciones 6, 7, 8 y 9:

$$\begin{aligned} \rho_T \cdot V_T \cdot Cp_T \cdot \frac{dT_T(t)}{dt} &= A_o \cdot (\alpha_{W,T}(t) \cdot \varepsilon_{WT} - \alpha_{GW,T}(t) \cdot \varepsilon_W) \\ &\cdot (T_W(t) - T_T(t)) + A_o \cdot (\alpha_{G,T}(t) \cdot \varepsilon_T + h_o) \\ &\cdot (T_G(t) - T_T(t)) - h_i \cdot A_i \\ &\cdot (T_T(t) - T_f(t)) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \rho_f \cdot V_f \cdot Cp_f \cdot \frac{dT_f(t)}{dt} &= h_i \cdot A_i \cdot (T_T(t) - T_f(t)) - \dot{m}_f(t) \cdot Cp_f \\ &\cdot (T_f(t) - T_{in}) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} m_W \cdot Cp_W \cdot \frac{dT_W(t)}{dt} &= \varepsilon_{HEATER} \cdot A_W (\alpha_{G,W}(t) \cdot \varepsilon_W + h_o) \\ &\cdot (T_G(t) - T_W(t)) - A_o \cdot (\alpha_{W,T}(t) \cdot \varepsilon_{WT} \\ &- \alpha_{GW,T}(t) \cdot \varepsilon_W) \cdot (T_W(t) - T_T(t)) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \rho_G \cdot V_G \cdot Cp_G \cdot \frac{\partial T_G(t)}{\partial t} &= \dot{m}_G \cdot \Delta H_{COMB} - A_W (\alpha_{G,W}(t) \cdot \varepsilon_W + h_o) \\ &\cdot (T_G(t) - T_W(t)) - A_o \cdot (\alpha_{G,T}(t) \cdot \varepsilon_T + h_o) \\ &\cdot (T_G(t) - T_T(t)) - \dot{m}_G \cdot Cp_G \cdot (T_G(t) - T_\infty) \end{aligned} \quad (9)$$

donde $\dot{m}_G(t) = f(x(t))$, $\alpha_{W,T}(t) = f(T_W(t), T_T(t))$, $\alpha_{GW,T}(t) = f(T_G(t), T_T(t))$, $\alpha_{G,T}(t) = f(T_G(t), T_T(t))$ y $\alpha_{G,W}(t) = f(T_G(t), T_W(t))$

El significado y valor de cada variable se muestra en el apéndice en la tabla A.3.

El llenado de tanques consiste en tres tanques en cascada, alimentado por dos bombas como se muestra en la figura 5 (McGabe, y col., 1993).

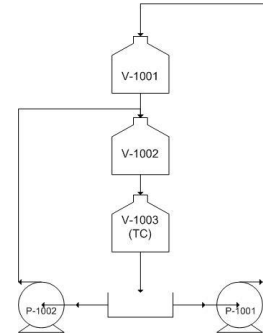


Figura 5. Llenado de tanques.

El objetivo de control es el nivel del tanque V-1003 manipulando el voltaje de la bomba P-1001 y minimizando la perturbación de la bomba P-1002. El modelo matemático que describe la dinámica del proceso se muestra en las ecuaciones 10, 11 y 12 a continuación:

$$\frac{dH_1(t)}{dt} = \frac{K_1 \cdot V_1(t)}{A_{T1}} - \frac{A_{t1}}{A_{T1}} \sqrt{2gH_1(t)} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{dH_2(t)}{dt} &= \frac{K_2 \cdot V_2(t)}{A_{T2}} + \frac{A_{t1}}{A_{T2}} \sqrt{2gH_1(t)} \\ &- \frac{A_{t2}}{A_{T2}} \sqrt{2gH_2(t)} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\frac{dH_3(t)}{dt} = \frac{A_{t2}}{A_{T3}} \sqrt{2gH_2(t)} - \frac{A_{t3}}{A_{T3}} \sqrt{2gH_3(t)} \quad (12)$$

El significado y valor de cada variable se muestra en el apéndice en la tabla A.4.

Las pruebas de los modelos con la integración consistieron en utilizar un servidor OPC integrado con el STARDOM, en el cual MATLAB era el cliente OPC, en donde se realizaba el modelo dinámico del proceso, mientras que STARDOM era el servidor OPC que realizaba los algoritmos de control implementados. En la figura 6 se muestra un esquema de las acciones a ejecutar tanto por el cliente como por el servidor OPC.

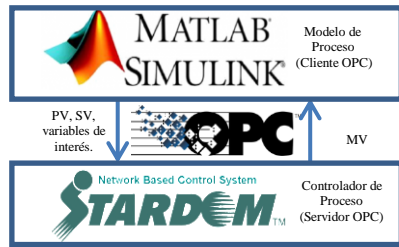


Figura 6. Arquitectura de integración entre MATLAB/Simulink y STARDOM.

En la arquitectura descrita, Simulink tiene la función de leer la MV (variable manipulada) del servidor OPC para simular el proceso y transmitir las salidas requeridas del proceso al servidor OPC para el funcionamiento de los lazos de control y la supervisión de los parámetros necesarios. Adicional a esto también envía al servidor OPC el SV (valor de setpoint) y una señal de encendido para activar la acción de control automático. En la figura 7 se muestra un esquema del modelaje descrito en Simulink.

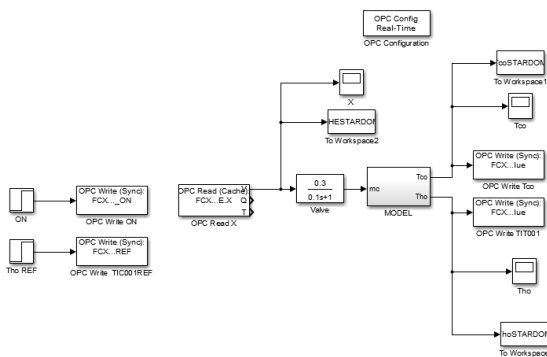


Figura 7. Modelo en Simulink de la integración vía OPC.

El STARDOM tiene la función de leer las salidas y la PV (variable de proceso) del cliente OPC para ejecutar los algoritmos de control de control programados, transmitiendo la señal de control de la MV al cliente OPC para la simulación del proceso. Adicional a esto también recibe del cliente OPC la señal de encendido para activar la acción de control automático, realizado por un diagrama escalera. En la figura 8 se muestra un esquema del algoritmo de control descrito en STARDOM.

Los algoritmos de control programados en Logic Designer fueron realizados con la ayuda de la herramienta SISOTool de MATLAB, los cuales permitieron un diseño preliminar de los algoritmos PID. Los parámetros P, I y D del bloque de control PID en STARDOM parten de este diseño preliminar y fueron modificados hasta que se obtuvo una respuesta aceptable del sistema. Con el fin de verificar la eficiencia del algoritmo de control implementado en STARDOM, se realizó una comparación de las respuestas de las PV y MV entre los algoritmos preliminares en Simulink y los implementados en STARDOM.

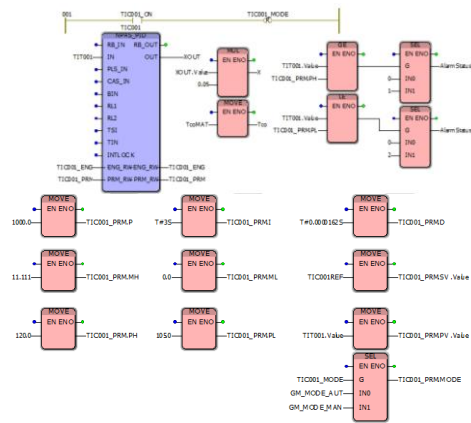


Figura 8. Lazo de control PID en STARDOM de la integración vía OPC.

A su vez, se utilizó la herramienta InfoWell como un HMI para mostrar la respuesta de la simulación en un despliegue gráfico. Entre los parámetros mostrados se encuentran los valores de la MV, PV y otras variables de interés, además, de indicar estados de alarma (por baja y alta) a través de cambios de color en las imágenes. Por otra parte, un registro de la simulación del proceso es guardado por MATLAB, el cual posee una herramienta graficadora capaz de representar las tendencias de las variables de interés en las simulaciones.

Por último, se desarrollaron e implementaron diversos esquemas de control avanzados en esta investigación. Se utilizó un esquema de control en cascada en el modelo del horno para disminuir perturbaciones de presión en la línea de gas de combustión y se empleó un esquema de control Feed-Forward en el modelo de llenado de tanques para disminuir el efecto de la perturbación externa. Los esquemas y su integración se muestran en las figuras 9 y 10. Se puede observar que para el esquema de control en cascada se utilizaron dos bloques de control PID, en el cual la salida del primero es la entrada del segundo, haciendo uso de las funciones de cascada diseñadas en STARDOM; mientras que el esquema de control Feed-Forward se utilizaron las funciones VN y VNGAIN para aplicar el esquema de control mencionado.

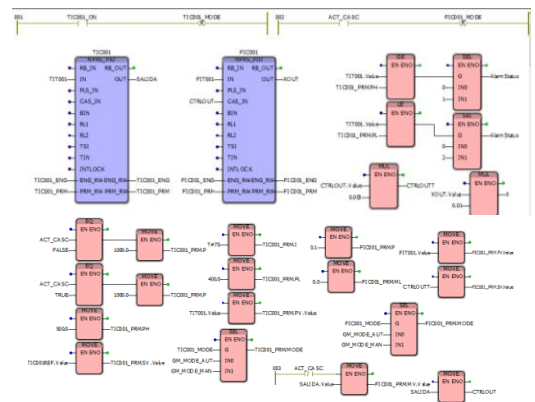


Figura 9. Lazo de control cascada en STARDOM de la integración OPC.

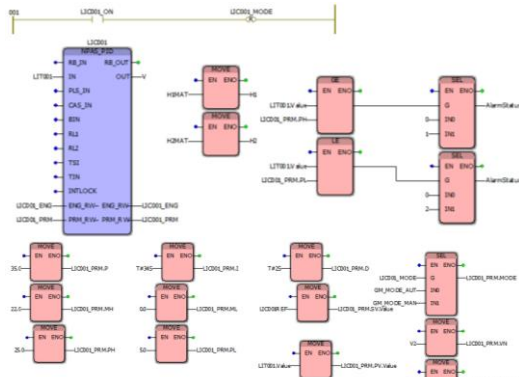


Figura 10. Lazo de control Feed-Forward en STARDOM de la integración vía OPC.

3 Resultados y discusiones

La integración se logró de una manera exitosa, en donde se realizaron las simulaciones y el diseño de los algoritmos de control para cada uno de los procesos y estrategias de control asociados, incluyendo su integración con los despliegues gráficos generados por InfoWell, los cuales se muestran en las figuras 11 a 14.

Planta de neutralización

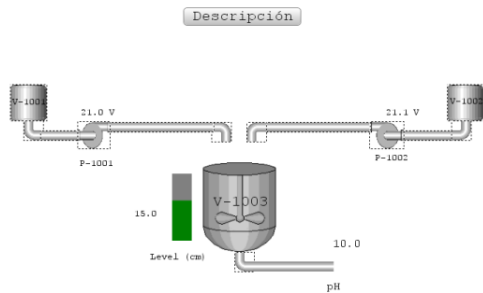


Figura 11. Despliegue gráfico en InfoWell del modelo Planta de neutralización.

Intercambiador de calor

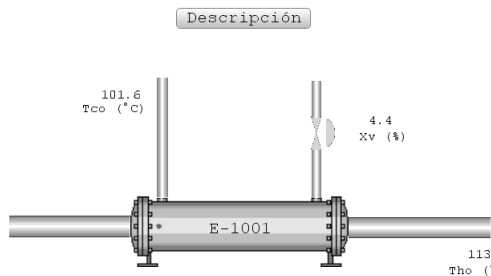


Figura 12. Despliegue gráfico en InfoWell del modelo Planta de neutralización.

Los resultados de las simulaciones se muestran a en las figuras 15 a 19, donde se muestran las respuestas temporales de las PV ante el arranque del proceso, un cambio de SV y, en los casos de cascada y Feed-Forward, una perturbación inducida.

Horno de calentamiento de crudo

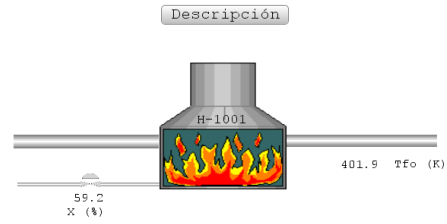


Figura 13. Despliegue gráfico en InfoWell del modelo Planta de neutralización.

Llenado de tanques 1

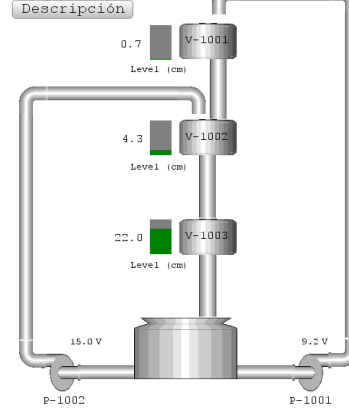


Figura 14. Despliegue gráfico en InfoWell del modelo Planta de neutralización.

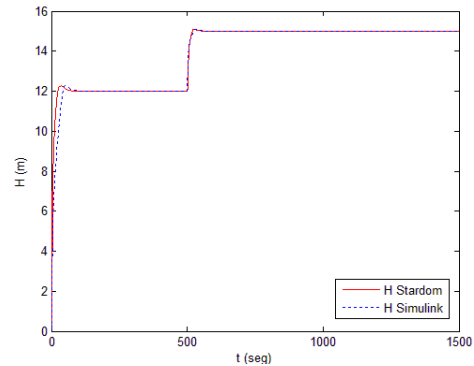


Figura 15. Respuesta temporal de la PV 1 del modelo de Planta de neutralización.

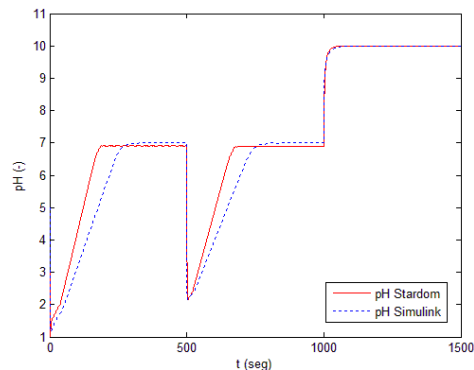


Figura 16. Respuesta temporal de la PV 2 del modelo de Planta de neutralización.

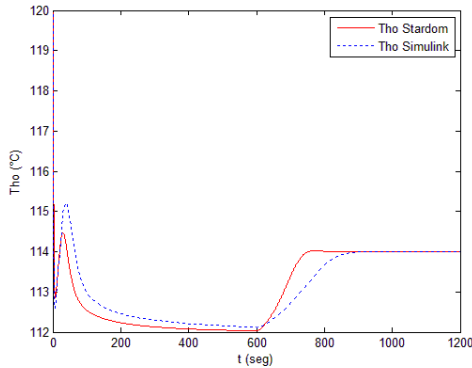


Figura 17. Respuesta temporal de la PV del modelo de Intercambiador de calor.

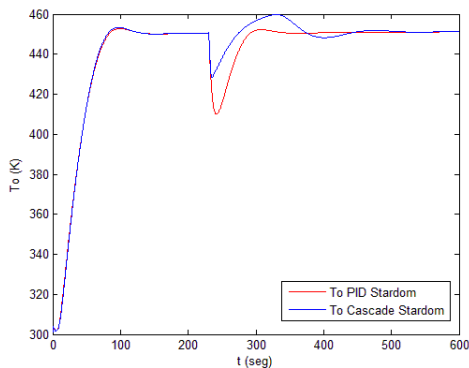


Figura 18. Respuesta temporal de la PV del modelo de Horno.

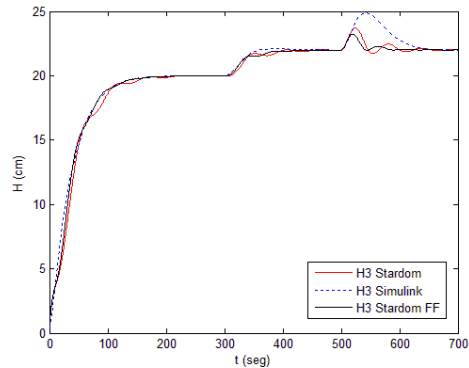


Figura 19. Respuesta temporal de la PV del modelo de Llenado de tanques.

Se observa en las figuras anteriores que el control PID de STARDOM tiene respuestas similares al simulado en Simulink, con pequeñas mejoras en cuanto a la respuesta transitoria, mostrando el excelente desempeño que tiene el algoritmo PID de STARDOM en el control de procesos. La diferencia de las respuestas transitorias se puede deber a la diferencia del algoritmo de cálculo de los bloques PID del STARDOM y de Simulink. Para Simulink el algoritmo PID se muestra en la ecuación 13, mientras que para STARDOM su algoritmo de muestra en la ecuación 14.

$$MV(t) = P \cdot E(t) + I \int E(t)dt + D \frac{dE(t)}{dt} \quad (13)$$

$$\Delta MV_n = k_p \left(\Delta PV_n + \frac{\Delta T}{TI} E_n + \frac{TD}{\Delta T} \Delta(\Delta PV_n) \right) \quad (14)$$

Comparando las ecuaciones de funciones PID, se puede observar que Simulink realiza el algoritmo PID en base al cálculo del error, mientras que Stardom realiza el algoritmo PID en base a la diferencia de la PV con respecto al valor previo de la iteración, lo cual permite que solo haga la acción integral cuando el SV varíe. Este algoritmo se realiza para tener un desempeño de control estable ante cambios abruptos del SV. Esto muestra que la respuesta entre Simulink y Stardom no será idéntica. Por otra parte cabe notar que los parámetros de control no tienen el mismo valor en Simulink y STARDOM para un mismo modelo, puesto que se partió de un diseño de algoritmo PID preliminar en Simulink y se modificaron los parámetros en STARDOM, generando una mejor respuesta en todos los modelos.

En las figuras 14 y 15 se muestra el desempeño de los algoritmos de control avanzados implementados en las pruebas. El algoritmo de control Feed-Forward muestra una disminución del efecto de la perturbación causada por un aumento del caudal de entrada proporcionado por la bomba P-1002, aunque sea en una pequeña proporción en comparación con el lazo PID. El lazo de control en cascada muestra una estabilización de la PV ante una perturbación interna un poco más lenta que el lazo PID, pero con un máximo pico menor, el cual es generalmente el objetivo de este tipo de lazos de control.

4 Conclusiones

La integración entre MATLAB y STARDOM se logró exitosamente mediante comunicación OPC, mediante el cual se realizaron simulaciones de cuatro procesos típicos industriales y diseñar algoritmos de control para los mismos, utilizando Simulink como cliente OPC para modelar los procesos y STARDOM como servidor OPC para ejecutar los algoritmos de control programados.

El uso de la herramienta SISOTool de MATLAB permitió un diseño preliminar de los parámetros de control en STARDOM, los cuales fueron modificados para mejorar el desempeño de los mismos, reduciendo los tiempos de los algoritmos de control y permitiendo facilitar las actividades de sintonización en los arranques de planta.

Los resultados de las pruebas mostraron un éxito en la integración y el excelente desempeño del STARDOM ante los procesos estudiados, tanto para algoritmos de control PID como algoritmos de control avanzados. Esta integración también puede mostrarse en conjunto con InfoWell, en donde se incluye las funciones de un despliegue gráfico a las simulaciones de los procesos.

Finalmente, se logró mostrar que la integración entre MATLAB y STARDOM mediante comunicación OPC tiene grandes potencialidades en varios campos de la ingeniería de control, debido que al conocer la matemática de cualquier proceso se pueden realizar simulaciones del control en tiempo real de dicho proceso con un controlador industrial, en el cual se puede ver su desempeño y riesgos que pueden ocurrir en dicho proceso.

Referencias

- Frattallone M, Peguero D, Villar J, 2012, Diseño de una planta de neutralización de ácido acético y soda cáustica a escala de laboratorio. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Venezuela.
- Kern D, 1965, Process Heat Transfer. McGraw Hill, New York, pp. 674-716.
- Mathworks. Access Data with OPC Data Access Explorer. Disponible en Internet: <https://www.mathworks.com/help/opc/ug/access-data-with-opc-data-access-explorer.html>, consultado el 30 de abril de 2017.
- Mathworks. Diseñador de sistemas de control. Disponible en Internet: <https://www.mathworks.com/help/control/ref/controlsystemdesigner-app.html>, consultado el 30 de abril de 2017.
- Mathworks. MATLAB: El lenguaje del cálculo técnico. Disponible en Internet: https://es.mathworks.com/products/matlab.html?s_tid=hp_products_matlab, consultado el 30 de abril de 2017.
- Mathworks. Simulink: Simulación y diseño basado en modelos. Disponible en Internet: <https://es.mathworks.com/products/simulink.html>, consultado el 30 de abril de 2017.
- McGabe WL, Smith JC, 1993, Unit Operations of chemical engineering. 5th Edition, McGraw Hill, New York, pp 3-5, 27-30.
- OPC Foundation. What is OPC? Disponible en Internet: <http://www.opcfoundation.org>, consultado el 27 de abril de 2017.
- Roffel B, Rijnsdorp JE, 1974, Dynamics and Control of a Gas-Fired Furnace. Chemical Engineering Science, Vol.29, pp. 2083-2092.
- Yokogawa, 2014, FCN-RTU Low Power Autonomous Controller Functions. General Specifications. Yokogawa Electric Corporation, Tokio, pp 1-3.
- Yokogawa, 2015, InfoWell Graphic Portafolio User's Manual. Yokogawa Electric Corporation, Tokio, pp. 13-16.
- Yokogawa, 2014, Logic Designer General Specifications. Yokogawa Electric Corporation, Tokio, pp 1-4.
- Yokogawa, 2014, STARDOM IT Security. Yokogawa Electric Corporation, Tokyo, pp 41-78.

Apéndice

Tabla A.1. Glosario de variables para el modelo de Planta de Neutralización.

Variable	Descripción	Valor
A_t (cm ²)	Área transversal interna del tubo	1.131
A_T (cm ²)	Área transversal del tanque	14.954
C_{10} (mole)	Concentración inicial de ácido acético	0.2
C_{20} (mole)	Concentración inicial de soda cáustica	0.1
g (cm/s ²)	Aceleración de gravedad	980
H (cm)	Altura del tanque	Variable de proceso
K (cm ³ /V.s)	Constante de bomba	4.6
pH (-)	pH	Variable de proceso
K_w (-)	Constante de ionización del agua	1×10^{-14}
t (s)	Tiempo	Variable
V_x (V)	Voltaje suministrado a la bomba x	Variable manipulada/Perturbación
x (-)	Diferencia de iones H ⁺ y OH ⁻	Variable de proceso

Tabla A.2. Glosario de variables para el modelo de Intercambiador de Calor.

Variable	Descripción	Valor
A_o (m ²)	Área externa del intercambiador de calor	0.5244
C_{p_c} (J/kg.°C)	Calor específico del fluido frío	2307
C_{p_H} (J/kg.°C)	Calor específico del fluido caliente	3650
D_o (mm)	Diámetro exterior de tubos	3.175
D_s (mm)	Diámetro interno de carcasa	50.8
L_i (mm)	Longitud de tubos	381
\dot{m}_c (kg/s)	Flujo másico de fluido frío	Variable manipulada
\dot{m}_H (kg/s)	Flujo másico de fluido frío	0.47
N_p (-)	Número de pasos	1
N_i (-)	Número de tubos	138
t (s)	Tiempo	Variable
T_{c_i} (°C)	Temperatura de entrada del fluido frío	90
T_{H_i} (°C)	Temperatura de entrada del fluido caliente	120
T_{c_o} (°C)	Temperatura de salida del fluido frío	Variable de proceso
T_{H_o} (°C)	Temperatura de salida del fluido caliente	Variable de proceso
U (W/m ² .°C)	Coefficiente global de transferencia de calor	Variable dependiente
x (-)	Apertura de válvula	Variable manipulada
ρ_c (kg/m ³)	Densidad de fluido frío	1020
ρ_H (kg/m ³)	Densidad de fluido caliente	828

Tabla A.3. Glosario de variables para el modelo de Horno de Proceso.

Variable	Descripción	Valor
A_i (m ²)	Área interna de tubos	7.7
A_o (m ²)	Área externa de tubos	5
A_w (m ²)	Área de pared	10
C_{p_f} (kJ/kg.°C)	Calor específico del fluido	0.695
C_{p_g} (kJ/kg.°C)	Calor específico del gas	0.9508
C_{p_T} (kJ/kg.°C)	Calor específico de los tubos	0.504
C_{p_w} (kJ/kg.°C)	Calor específico de la pared	0.84
D_i (m)	Diámetro interno de tubos	0.017
h_i (kW/m ² .°C)	Coefficiente de convección interna	0.022
h_o (kW/m ² .°C)	Coefficiente de convección externa	0.014
\dot{m}_g (kg/s)	Flujo másico del gas	Variable manipulada
\dot{m}_f (kg/s)	Flujo másico del fluido	0.025
M_T (kg)	Masa de tubos	81.6
M_w (kg)	Masa de la pared	3273.6
N_t (-)	Número de tubos	200
t (s)	Tiempo	Variable
T_f (°C)	Temperatura de salida de fluido	Variable de proceso
T_g (°C)	Temperatura del gas	Variable de proceso
T_{in} (°C)	Temperatura de entrada de fluido	300
T_T (°C)	Temperatura de los tubos	Variable de proceso
T_w (°C)	Temperatura de la pared	Variable de proceso
T^∞ (°C)	Temperatura del ambiente	25
V_G (m ³)	Volumen de gas	3
V_f (m ³)	Volumen del fluido	6.8096
x (-)	Apertura de válvula	Variable manipulada
$\alpha_{G,T}$ (kW/m ² .°C)	Coefficiente de transferencia de calor por radiación gas-tubos	Variable dependiente
$\alpha_{G,W,T}$ (kW/m ² .°C)	Coefficiente de transferencia de calor por radiación gas a temperatura de pared-	Variable dependiente
$\alpha_{G,W}$ (kW/m ² .°C)	Coefficiente de transferencia de calor por radiación gas-pared	Variable dependiente
$\alpha_{w,T}$ (kW/m ² .°C)	Coefficiente de transferencia de calor por radiación pared-tubos	Variable dependiente
ΔH_{COMB} (kJ/kg)	Calor de combustión	50164
ϵ_T (-)	Emisividad de los tubos	0.87
ϵ_w (-)	Emisividad de la pared	0.82
ϵ_{wt} (-)	Emisividad pared-tubos	0.777
ϵ_{HEATER} (-)	Eficiencia del horno	0.7
ρ_f (kg/m ³)	Densidad del fluido	800
ρ_g (kg/m ³)	Densidad del gas	0.3935

Tabla A.4. Glosario de variables para el modelo de Llenado de Tanques.

Variable	Descripción	Valor
A_{t1} (cm ²)	Área transversal interna del tubo 1	0.2463
A_{t2} (cm ²)	Área transversal interna del tubo 2	0.181
A_{t3} (cm ²)	Área transversal interna del tubo 3	0.0804
A_{T1} (cm ²)	Área transversal del tanque 1	15.5528
A_{T2} (cm ²)	Área transversal del tanque 2	15.5528
A_{T3} (cm ²)	Área transversal del tanque 3	15.5528
g (cm/s ²)	Aceleración de gravedad	980
H_x (cm)	Altura del tanque x	Variable de proceso
K (cm ³ /V.s)	Constante de bomba	3.3
t (s)	Tiempo	Variable
V_x (V)	Voltaje suministrado a la bomba x	Variable manipulada/Perturbación

Recibido: 22 de agosto de 2016

Aceptado: 04 de septiembre de 2017

Peña Peña, Andrés Mauricio: Ingeniero Químico, Universidad Simón Bolívar (USB). Ingeniero de Proyectos, Controval C.A.

Mirena, Juan: Ingeniero Químico, Universidad Simón Bolívar (USB). Estudiante de PhD en Ingeniería Química, Universidad de Gent. Correo Electrónico: jmirenas@gmail.com

Pittol Vera, José Antonio: Ingeniero Químico, Universidad Simón Bolívar (USB). Maestría en Ingeniería de Sistemas (USB). Profesor Asistente USB. Gerente de Ventas Controval C.A. Correo Electrónico: jpittol@usb.ve

