

Un entorno virtual con controladores lógicos programables: aplicación en evaluación de estrategias de control

Rogelio E. Rivero-Contreras^{a,b,*}, Alejandro Merino^c, Jesús M. Zamarreño^{a,b}, Carlos Vilas^d, Fernando Tadeo^{a,b}

^aDepartamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Valladolid, Paseo Prado de la Magdalena, 3-5, 47011, Valladolid, España.

^bInstituto de Procesos Sostenibles, Universidad de Valladolid, C/Dr. Mergelina, S/N, 47011, Valladolid, España.

^cÁrea de Ingeniería de Sistemas y Automática / Departamento de Digitalización, Universidad de Burgos, Campus Río Vena Edificio A, 09001, Burgos, España.

^dGrupo de Biosistemas e Ingeniería de Bioprocesos, IIM-CSIC, C/Eduardo Cabello, 6, 36208, Vigo, España.

To cite this article: Rivero-Contreras, R.E., Merino, A., Zamarreño, A.M., Vilas, A., Tadeo, A. 2025. A virtual environment with programmable logic controllers: an application in the evaluation of control strategies. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 22, 69-80. <https://doi.org/10.4995/riai.20224.20881>

Resumen

En este artículo se describe una propuesta de entorno virtual para aplicación en la evaluación de estrategias de control en controladores lógicos programables (PLCs). Para ello, se ha considerado el uso de un gestor de la simulación del proceso, el cual comanda el modelo digital, y de un gestor de comunicación de componentes que integra los elementos del entorno virtual (PLC virtual y modelo digital) a través del protocolo de comunicación industrial OPC UA. El entorno virtual se ha validado mediante un caso de estudio que considera como sistema de proceso una unidad de esterilización de alimentos envasados, el cual requiere de lógicas de control discretas y continuas para llevar a cabo su operación. Esto permite verificar las lógicas de control en el entorno virtual, en un ambiente de simulación, para su posterior escalabilidad al proceso real utilizando protocolos adecuados para dispositivos de campo.

Palabras clave: Controladores lógicos programables, protocolos, sistemas de control, software-in-the-loop, entorno virtual, modelo digital.

A virtual environment with programmable logic controllers: an application in the evaluation of control strategies

Abstract

This article describes a proposal for a virtual environment to be used in the evaluation of control strategies in programmable logic controllers (PLCs). For this purpose, a process simulation manager, which controls the digital model, and a component communication manager, which integrates the elements of the virtual environment (virtual PLC and digital model) through the industrial communication protocol OPC UA, have been developed. The virtual environment has been validated through a case study that considers as a process system a food sterilization unit that requires discrete and continuous control logic to perform its operation. This allows the control logic in the virtual environment to be verified in a simulation environment for subsequent scalability to the real process using protocols suitable for field devices.

Keywords: Programmable logic devices, protocols, control systems, software-in-the-loop, virtual environment, digital model.

1. Introducción

Desde su introducción en la década de 1960, los controladores lógicos programables (PLCs) han representado un hito importante en el avance de la automatización y el

control industrial, lo cual ha revolucionado el diseño y la implementación de los sistemas de manufactura y procesos operativos. A lo largo del tiempo, los PLCs han evolucionado de manera significativa, transformándose desde dispositivos rudimentarios diseñados para reemplazar las lógicas de relés

*Autor para correspondencia: rogelioemilio.rivero@uva.es

a sistemas sofisticados capaces de integrarse con tecnologías de información avanzadas (Alphonsus and Abdullah, 2016).

Con la evolución de la tecnología se han desarrollado diversos sistemas de gestión y automatización de los procesos. Una manera de segmentar y estandarizar los diversos sistemas involucrados en la gestión administrativa y operativa de los procesos industriales es mediante el estándar IEC 62264-1 (International Electrotechnical Commission, 2013b). Este describe la integración entre los sistemas de control industriales y los procesos de gestión empresariales. Además, detalla los elementos que constituyen cada nivel de la jerarquía basándose en la función que desempeñan en la estructura integrada, los metadatos necesarios para el intercambio de información y la escala temporal para el intercambio de información entre los niveles existentes (Figura 1). En esta jerarquía funcional, los autómatas PLCs se incluyen junto con los sistemas de control distribuidos (DCS) (Mehta and Reddy, 2015) y los controladores de automatización programables (PACs) (Stankovski et al., 2022) en el nivel 2.

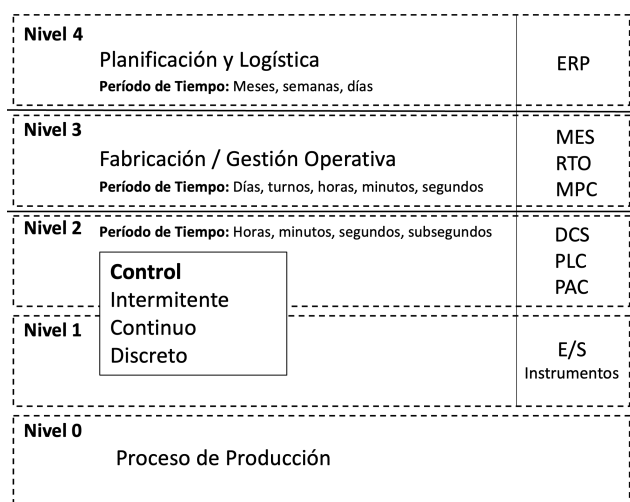


Figura 1: Jerarquía funcional según IEC-62264-1.

En la actualidad, los procesos industriales se dimensionan, diseñan y optimizan mediante el uso de software de simulación de procesos (Zhang et al., 2008). Los simuladores pueden ser desarrollados a partir de herramientas de modelado y simulación de propósito general, como OpenModelica (Modelica Association, 2024), EcosimPro (EA Internacional, 2024) o GProms (Siemens, 2024a), pero también pueden ser construidos a partir de software de simulación específicos como Aspen HYSYS (Aspentech, 2024) para el sector químico o FlexSim (FlexSim Software Products, Inc., 2024) en el sector manufacturero. Los niveles superiores de la jerarquía funcional que establece el estándar IEC 62264-1, correspondiente a la planificación de recursos empresariales (ERP) (Moon, 2007), sistema de ejecución de manufactura (MES) (Saenz de Ugarte et al., 2009), optimización en tiempo real (RTO) (Naysmith and Douglas, 1995) y control predictivo (MPC) (Schwenzer et al., 2021) han tenido su desarrollo, desde sus inicios, en aplicaciones informáticas, con la disponibilidad de ordenadores de altas prestaciones computacionales y de almacenamiento de datos.

Es de destacar que los sistemas de control basados en

PLCs, DCS y PACs se han desarrollado como dispositivos basados en hardware/software como un conjunto y los cuales se encuentran disponibles comercialmente de esta forma. Es decir, los fabricantes de estos sistemas de control diseñan y comercializan de forma unificada el hardware y software que debe ser usado para una correcta configuración y operación de los dispositivos de su propia marca. Además de esto, los proveedores comerciales han desarrollado simuladores de PLCs, que permiten probar y validar la configuración de estos dispositivos y estrategias de control a implementar, dentro del entorno de programación del proveedor. Entre los simuladores de PLCs disponibles destacan: Siemens PLCSIM (Siemens, 2021a), Schneider Control Expert Simulator (Schneider Electric, 2023), Rockwell Logix Emulate (Rockwell Automation, 2024), Yokogawa FA-M3 simulation software (Yokogawa, 2024), CODESYS SoftPLC (CODESYS, 2024). Estos simuladores de PLCs están mejorando su desempeño y están comenzando a ofrecerse como dispositivos virtuales comerciales, prescindiendo del dispositivo físico (Siemens, 2024b).

De forma análoga, los avances en computación y tecnologías de la información han dado lugar al desarrollo de prototipos virtuales (Wang, 2002), dentro de los que se mencionan los entornos virtuales, los cuales están transformando los paradigmas de diseño, simulación y pruebas en el desarrollo de aplicaciones y productos. Los entornos virtuales, en especial aquellos que implementan el concepto de software-in-the-loop (SiL) (Shivanandaswamy et al., 2021), permiten la simulación detallada de sistemas de control en un entorno virtual antes de su implementación real. Esto es relevante y se puede considerar para ser usados con dispositivos PLCs, ya que facilita la evaluación exhaustiva de estrategias de control, optimización de procesos y diagnóstico de fallos sin riesgos asociados a la maquinaria o la producción. Además, la integración de PLCs en entornos virtuales representa un avance significativo en la industria, permitiendo a los ingenieros y diseñadores de sistemas validar y optimizar sus soluciones de control de manera más eficiente y económica.

Desde la comunidad científica se han propuesto distintas alternativas de virtualización de los PLCs. En este sentido, (Cruz et al., 2016) virtualiza la lógica del PLC dentro de lo que denomina un hipervisor en tiempo real, (Liang and Li, 2011) define la base de programación y configuración de lo que hoy es la aplicación SoftPLC, (Lu et al., 1992) describe un método denominado secuencial directo que permite simular PLC codificados en lenguaje de programación ladder, incluido dentro del estándar IEC 61131-3 (International Electrotechnical Commission, 2013a), (Muñoz et al., 2009) presenta una aplicación virtual denominada Programación y Simulación de PLC (PSPLC-PYSAP), orientada a la educación, (Stojadinovic et al., 1998) expone un entorno de PLC virtual enfocado a la manufactura, y (Zhou and Chen, 2009) desarrolla una máquina virtual de un PLC. Estos estudios se desarrollaron en ordenadores de tipo PC con procesadores basados en arquitectura x86.

A raíz de la disponibilidad de los simuladores de PLCs comerciales, la comunidad científica ha redirigido sus estudios en mostrar el uso de estos simuladores en diversas aplicaciones. Así, (Cigánek and Žemla, 2022) define un gemelo digital

mediante el uso de un PLC virtualizado, (Diazgiron-Aguilar et al., 2022) propone un marco para el diseño de un sistema de formación virtual, donde se tiene un entorno 3D de un laboratorio de automatización y control, y la virtualización de la interfaz de un PLC con entradas y salidas digitales y analógicas, basado en Unity y diseño asistido por ordenador, (Khan et al., 2019) presenta un enfoque para pruebas de lógicas de PLCs de seguridad en un entorno virtual, que pueden ser validadas antes de las pruebas de aceptación en fábrica (FAT), (Sobrino et al., 2019) ofrece una visión introductoria de los primeros pasos de una puesta en marcha virtual en un simulador comercial en conjunto con un PLC virtual. Las lógicas de control consideradas en estos estudios fueron de tipo ON-OFF y fueron programadas en lenguaje ladder. Por otro lado, los estudios antes mencionados requieren de un software de diseño de los sistemas de procesos o producción considerados, en los cuales se realiza la simulación del mismo.

Un aspecto importante a considerar en estos desarrollos es la forma en la que se debe realizar el intercambio de información entre los elementos que integran los entornos virtuales. En este caso, (Carlsson et al., 2008) propone un método de sincronización temporal y una arquitectura de simulación entre un PLC y herramientas de producción asistida por ordenador.

La comunicación e integración de algunos de los niveles de la jerarquía definidas en la Figura 1 se puede llevar a cabo mediante el uso de un estándar de interoperabilidad industrial que permita un intercambio eficaz entre ellos. Una opción conveniente es OPC UA (International Electrotechnical Commission, 2020). OPC UA es una arquitectura de comunicación unificada, interoperable y estandarizada desarrollada por la Fundación OPC, que simplifica la comunicación entre componentes industriales en un marco extensible. Esta comunicación garantiza una forma segura y fiable de recopilar datos, modelar información y conectar los distintos elementos entre plantas industriales y aplicaciones. Es de destacar que OPC UA es usado, generalmente, para monitorización y parametrización de los diversos componentes que hacen uso de este estándar.

En este artículo se describe una propuesta de entorno virtual, basado en una implementación de tipo SiL, para aplicación en la evaluación de estrategias de control en PLCs, considerando los niveles 0, 1 y 2 de la jerarquía funcional descrita en la Figura 1. Esta propuesta consiste en la integración de un PLC virtual y un modelo digital del proceso a estudiar mediante el desarrollo y uso de un gestor de la ejecución de la simulación del proceso (GEP) y un gestor de la comunicación entre componentes del entorno (GCC). El PLC virtual permite evaluar estrategias de control continuas y discretas. El modelo digital es una representación simulada de alta fidelidad del proceso. El gestor de la ejecución de la simulación del proceso fija los parámetros de actuación de la simulación del proceso para emular el avance temporal realista de la misma. Finalmente, el gestor de la comunicación es responsable de la ejecución del intercambio sincronizado de variables entre el PLC virtual y el modelo digital, mediante el uso de comunicaciones industriales estándar: OPC UA. El uso de servidores OPC UA, a través de una estructura de programación estandarizada (árbol de

nodos), permite el acceso y lectura/escritura de variables entre los distintos componentes del entorno virtual. Es de mencionar que OPC UA no está definido para ser usado en señales que involucran acciones en lazos de control, y que el entorno virtual propuesto es con fines de simulación, previo a su puesta en operación en la planta real, donde ya se utilizarían protocolos específicos para control. No obstante, esta propuesta puede servir de base para ser escalada a aplicaciones reales, una vez sea definido y se encuentre disponible el protocolo OPC UA Field Exchange (FX) (The OPC Foundation, 2024) realizando las modificaciones pertinentes que conlleve el nuevo protocolo respecto al OPC UA. Para ilustrar el entorno virtual propuesto y sus capacidades para diseñar y evaluar estrategias de control, se ha seleccionado como caso de estudio un proceso de esterilización de alimentos en autoclaves de agua sobrecalentada. Los componentes que integran el ecosistema virtual desarrollado se describen en la sección 2. El caso de estudio y el sistema de proceso considerado se presentan en la sección 3. A continuación, la sección 4 contiene los resultados y la discusión y la sección 5 las conclusiones y trabajo futuro.

2. Componentes del entorno virtual propuesto

El entorno virtual propuesto se compone de una simulación del proceso, embebida en un “EcosimPro Deck”, los componentes de configuración, diseño de esquemáticos HMI y virtualización de PLC (Siemens TIA Portal, WinCC RT y PLCSIM Advanced), un gestor de la ejecución de la simulación del proceso (script de Python) y un gestor de la comunicación entre componentes (script de Python y fichero de configuración) y el propio canal de comunicación entre componentes (OPC UA) (Figura 2).

2.1. Simulación de procesos e instrumentación: EcosimPro y Deck

EcosimPro (EA Internacional, 2024) es una herramienta de simulación desarrollada por Empresarios Agrupados Internacional (EAI), basada en programación orientada a objetos, con su propio lenguaje de modelado, Lenguaje EcosimPro (EL). Es una potente herramienta para modelar procesos continuos y discretos, y permite desarrollar modelos definidos por el usuario basados en ecuaciones algebraicas diferenciales (DAE). Además, incluye varias librerías funcionales que pueden reutilizarse para modelar cualquier sistema de proceso o componente industrial.

Las simulaciones de procesos pueden ejecutarse como modelos de caja negra independientes de la herramienta de diseño, utilizando la aplicación denominada Deck. Esta aplicación incluye interfaces y protocolos de comunicación, entre las que se destacan OPC (Zamarreño et al., 2014) y la interfaz de modelo funcional (FMI). Esta propiedad hace de este software una elección conveniente para una fácil integración con componentes industriales externos.

2.2. PLC virtual: Siemens S7 Suite (PLCSIM Advanced, TIA Portal y WinCC RT)

PLCSIM Advanced (Siemens, 2016) es una aplicación independiente que permite la virtualización de PLCs de la serie 1500 y ET 200SP de Siemens, con posibilidad de habilitar el

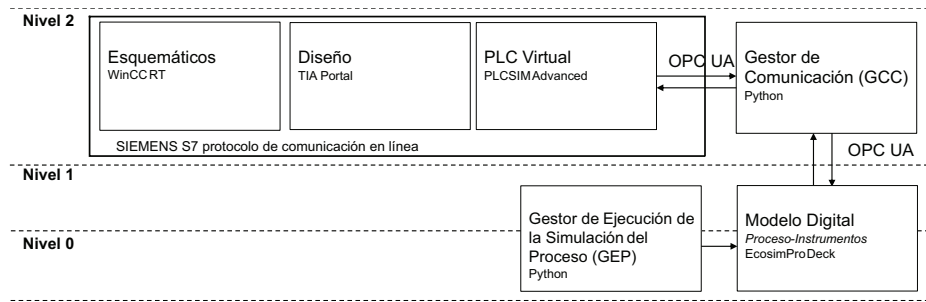


Figura 2: Entorno virtual propuesto.

protocolo OPC UA. Esto permite ejecutar las lógicas de control discretas y continuas en un dispositivo virtual que presenta un desempeño similar a un dispositivo físico. TIA Portal (Siemens, 2024c) es la suite que permite diseñar, configurar y programar las lógicas de control, variables y secuencias necesarias para el correcto funcionamiento de los PLCs de Siemens disponibles en el mercado, utilizando los bloques de librerías existentes o mediante librerías personalizadas. Dependiendo del dispositivo utilizado, TIA Portal también permite el diseño de esquemáticos HMI. Por otro lado, WinCC RT (Siemens, 2021b) es una aplicación independiente para visualizar esquemáticos de procesos en ordenadores PC. Para la comunicación entre las aplicaciones desarrolladas por Siemens se utiliza un protocolo de comunicación en línea propietario de la marca denominado S7 (Siemens, 2023).

El ciclo de scan de un PLC es el tiempo requerido para que el dispositivo ejecute las tareas necesarias para su funcionamiento. Estas tareas incluyen: verificación de la configuración del PLC, lectura de canales de entradas habilitados, ejecución de las acciones de control programadas y escritura en los canales de salida habilitados. PLCSIM Advanced dispone de la posibilidad de escalar el ciclo de scan del PLC, acelerando o retardando el funcionamiento del PLC de acuerdo a los requerimientos y estudios a realizar en el entorno virtual propuesto.

Por otro lado, se debe mencionar el concepto de periodo de muestreo de un controlador. En cada período de muestreo se realiza, a intervalos de tiempo fijo, y de forma ordenada, la adquisición de datos, ejecución del programa, escritura de señales de salida y espera que transcurra el tiempo fijado, para realizar una nueva lectura de datos. Este período de muestreo puede ser el ciclo de scan del PLC configurado de forma adecuada, o se puede definir mediante un componente externo al PLC, siendo este último el que considera el entorno virtual propuesto. El periodo de muestreo debe ser elegido cuidadosamente para asegurar que el sistema pueda responder a cambios en las condiciones de operación de manera oportuna, manteniendo la estabilidad y el rendimiento deseado.

2.3. Gestor de ejecución de la simulación (GEP): script de Python

Este componente se ha desarrollado en Python (Python, 2024b), debido a su flexibilidad y variedad de librerías para realizar tareas de manipulación y comunicación entre datos.

El GEP es el módulo que comanda, de forma temporizada, la simulación del proceso contenida en el Deck (Oliveira-Silva et al., 2023).

El script basado en Python requiere el uso de librerías específicas existentes para definir el funcionamiento de este componente del entorno virtual. En este caso, DATETIME (DATETIME, 2024) para obtener la hora y fecha del momento, NUMPY (NumPy, 2024) para la gestión de los arreglos de información y OPCUA (Olivier Roulet-Dubonnet, 2024) para la gestión de los servidores y clientes OPC UA de los componentes del entorno virtual. La aplicación Spyder IDE (Spyder Website Contributors, 2024) se ha utilizado para codificar el script de Python. En la Figura 3 se muestra un diagrama simplificado del funcionamiento del GEP. El script de python se encuentra disponible en (Zamarreño, 2024b).

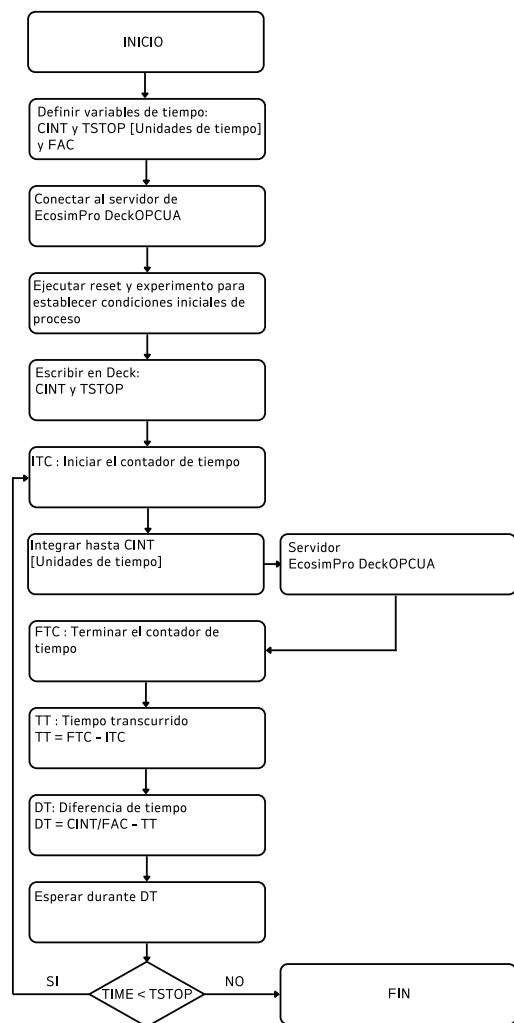


Figura 3: Algoritmo del GEP.

El GEP ejecuta el Deck para que la simulación avance de acuerdo a los parámetros definidos en la Tabla 1. Si es posible y requerido, la simulación del proceso puede ser acelerada. En este entorno virtual propuesto, se asume que el integrador del modelo del proceso simula la dinámica igual o más rápido que el TINT, para evitar inconvenientes en el intercambio de información entre los elementos involucrados. En caso contrario, el algoritmo GEP genera un aviso de advertencia.

Tabla 1: Parámetros del GEP

Parámetro	Descripción
CINT	Valor máximo del paso de integración en el modelo digital proceso (Deck)
FAC	Factor que permite acelerar o ralentizar la simulación del proceso respecto al tiempo definido en el modelo digital
TSTOP	Valor de tiempo de finalización de la simulación del proceso

2.4. Gestor de comunicación (GCC): script de Python y fichero de configuración

El GCC es el módulo que gestiona la comunicación OPC UA (intercambio de variables) entre el PLC virtual y la simulación del proceso (Deck) (Figura 4). Además, permite agregar servidores OPC UA ilimitados para realizar la comunicación e intercambio de información, en función de los elementos que integren el entorno virtual, en cualquiera de los niveles de la jerarquía funcional que define el estándar IEC-62264-1. Las variables que deben intercambiarse, junto con los atributos adicionales, se almacenan en un fichero de tipo XML.

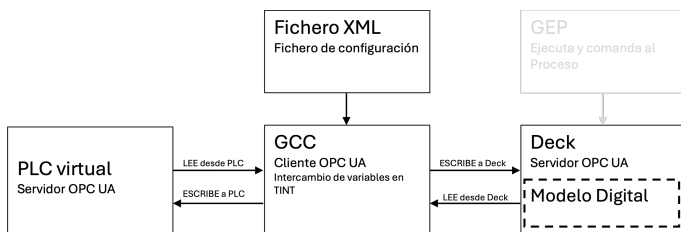


Figura 4: Intercambio de variables en GCC.

Un esquema simplificado del intercambio de variables, de manera aproximada, se muestra en la Figura 5.

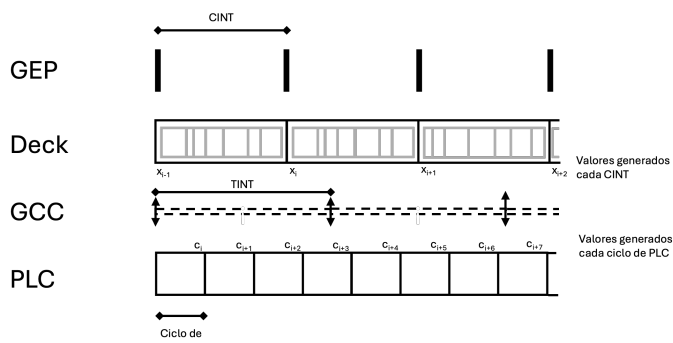


Figura 5: Diagrama aproximado de intercambio de variables, de acuerdo a los parámetros considerados en el entorno virtual.

Como se representa en dicha figura, una vez se encuentran en operación los componentes del entorno virtual, el modelo digital (Deck) genera resultados cada CINT, que pueden ser intercambiados a intervalos de tiempo independientes del paso de integración que ejecuta el método de integración seleccionado. Por otro lado, el PLC genera los valores de las señales de salida en cada ciclo de scan que ejecuta el dispositivo. En este entorno virtual, el parámetro TINT, el cual se encuentra definido en el GCC, se considera como el periodo de muestreo del controlador, ya que es el periodo que se considera para obtener un nuevo valor del proceso (Deck en este caso) y aplicar una nueva acción de control desde el PLC. Como se representa en el diagrama, este es independiente del ciclo de scan del PLC, que normalmente será más rápido.

El fichero de configuración XML establece el TINT el cual es el tiempo en el que se realiza el intercambio sincronizado de variables, identifica los servidores OPC UA con su dirección URL y define las correspondientes variables de origen y destino de los respectivos servidores. El GCC requiere el uso de librerías específicas de Python: el módulo ElementTree XML API (Python, 2024a) para gestionar datos desde ficheros XML, OPCUA y DATETIME. En la Figura 6 se muestra un diagrama simplificado del funcionamiento del GCC.

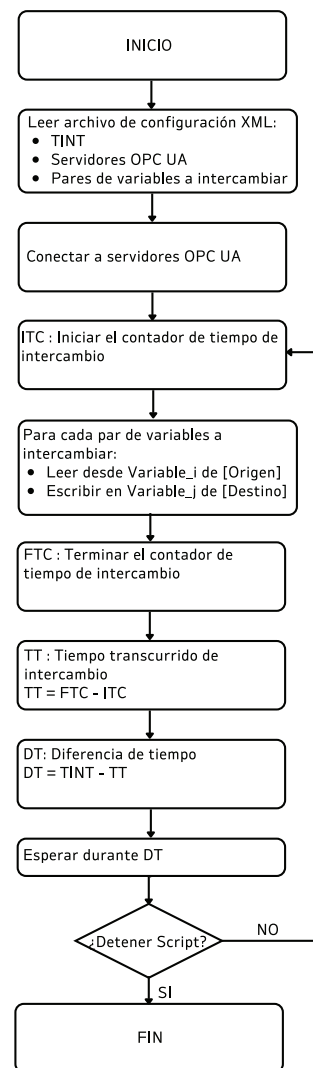


Figura 6: Algoritmo del GCC.

Cabe destacar que en cada iteración de la ejecución del intercambio de variables, a través del gestor GCC, se comprueba el tiempo de cálculo computacional requerido para el intercambio de variables, lo que permite realizar una precisa sincronización temporizada. El script del GCC y el fichero de configuración XML están disponibles en (Zamarreño, 2024a).

2.5. Comunicaciones: Interconexión entre componentes

OPC UA es el protocolo de comunicación utilizado para la comunicación de los elementos del entorno virtual. El PLC Virtual y el Deck tienen asignadas direcciones TCP/IP locales como servidores OPC UA y el gestor GCC actúa como cliente OPC UA.

Asimismo, la interfaz HMI y el PLC virtual tienen asignadas direcciones TCP/IP locales, que permite la comunicación entre las aplicaciones de SIEMENS mediante el protocolo S7. El PLC virtual requiere el uso de un adaptador virtual de ethernet para el PLCSIM Advanced. Este adaptador permite la conexión de la aplicación PLCSIM Advanced con aplicaciones o dispositivos externos a la comunicación S7.

El gestor GCC ejecuta una estrategia de comunicación de tipo Polling. Esta se refiere a un método de control de acceso donde un elemento central (maestro) lee/escribe de manera secuencial a otros (esclavos) para transmitir la información. Este enfoque es común en redes de control industriales y sistemas de comunicación donde se debe gestionar de forma ordenada y garantizar la transferencia confiable de datos (Boon et al., 2011).

2.6. Integración y ejecución del entorno virtual

La ejecución del entorno virtual propuesto debe seguir los siguientes pasos:

1. Iniciar las siguientes aplicaciones: Spyder IDE (GEP y GCC), WinCC RT Loader (HMI), PLCSIM Advanced (PLC).
2. Iniciar la interfaz HMI en WinCC RT Loader.
3. Ejecutar el Deck. El servidor OPC UA del Deck está en ejecución.
4. Cargar y ejecutar el PLC virtual en PLCSIM Advanced. El servidor OPC UA del PLC virtual está en ejecución.
5. Fijar las variables CINT, FAC y TSTOP en el script de Python y ejecutar el GEP.
6. Fijar el TINT, y el origen y destino de las variables de los servidores OPC UA en el fichero de configuración XML, y ejecutar el GCC.
7. Establecer en modo de ejecución la CPU del PLC.
8. Ejecutar las estrategias de control de acuerdo al sistema de proceso considerado.
9. Visualizar el desempeño de las variables del proceso y la eficacia de las estrategias de control consideradas.

3. Caso de estudio

Como caso de estudio para ilustrar el entorno virtual propuesto y sus capacidades para diseñar y evaluar estrategias de control, se ha seleccionado un proceso de esterilización de alimentos en autoclaves de agua sobrecalentada. De esta

manera, se puede comprender el funcionamiento y desempeño durante la integración y operación en el entorno real.

Las pruebas del entorno virtual se ejecutaron en un ordenador con una CPU Intel Core i9-10900 a 2.80 Ghz y 64 GB de RAM. Este procesador está basado en arquitectura x64 y ejecuta el sistema operativo Windows 10.

3.1. Modelo digital: unidad de proceso de esterilización

El sistema de proceso contenido en el modelo digital es una unidad de proceso de esterilización. El proceso de esterilización tiene como objetivo inactivar los microorganismos potencialmente nocivos mediante la acción del calor (Figura 7). En la Figura 8 se muestra el diagrama de tuberías e instrumentación simplificado.

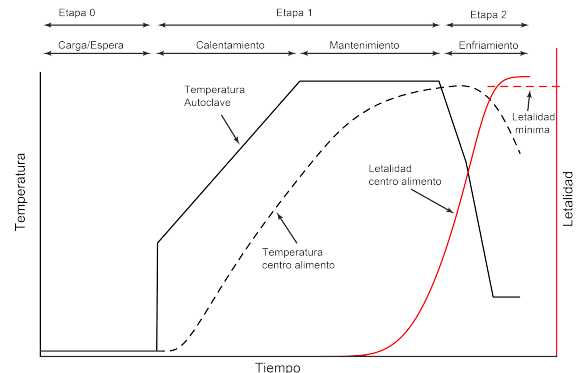


Figura 7: Etapas y fases del proceso de esterilización durante la operación.

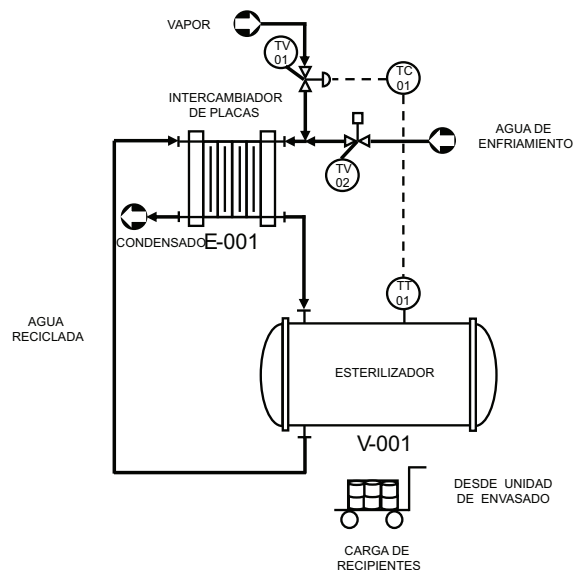


Figura 8: Diagrama de tuberías e instrumentación simplificado.

El producto alimenticio a esterilizar consiste en atún envasado de forma manual, al que se le agrega un líquido de relleno (por ejemplo, aceite, salmuera, agua, entre otros) para crear vacío en el interior de la lata y para potenciar el sabor. Una vez selladas las latas, se introducen con otras similares en carros. En estos carros, se tienen capas de latas separadas por una goma con perforaciones para facilitar la circulación del agua dentro de los carros y la homogeneidad de la temperatura durante el proceso de esterilización.

Durante la carga del esterilizador (V-001), en la etapa de espera (etapa 0), los carros se introducen de forma manual en el equipo. Cada esterilizador puede almacenar hasta 12 carros, y consiste en estructuras cilíndricas metálicas que están equipadas con sistemas de duchas, las cuales suministran agua para calentar o enfriar el producto alimenticio contenido en las latas.

Típicamente, el proceso de esterilización consta de tres fases: calentamiento, mantenimiento y enfriamiento. A su vez, la etapa de calentamiento se divide en las fases de calentamiento y mantenimiento (ver Figura 7). Previo a estas fases hay un periodo de carga del autoclave con los carros que contienen las latas a esterilizar y de espera hasta el momento de la esterilización. Cuando la esterilización se lleva a cabo en autoclaves de agua sobrecalentada, como los considerados en este trabajo, la fase de calentamiento comienza introduciendo agua a una temperatura entre 325 K y 335 K, esto provoca una subida rápida en la temperatura del autoclave (monitorizada por el sensor de temperatura TT-01). El agua acumulada en el fondo se bombea al intercambiador de placas E-001 para calentarla utilizando vapor que entra en el intercambiador a través de la válvula TV-01. El agua caliente que sale del intercambiador se vuelve a introducir en el autoclave. Esto produce un aumento casi lineal de la temperatura del autoclave. La velocidad del aumento de esta temperatura depende del número de autoclaves en funcionamiento que estén conectados a la red que distribuye el vapor con un máximo de 0.05 K/s. Cuando la temperatura del autoclave alcanza el valor deseado, típicamente entre 385 K y 400 K, comienza la segunda fase (mantenimiento), donde dicha temperatura se mantiene el tiempo necesario para garantizar las condiciones de seguridad del alimento. Para evaluar la seguridad se utiliza un indicador llamado Letalidad y que normalmente se mide en el punto más frío del alimento, el centro. La temperatura y el tiempo de mantenimiento depende del tamaño de la lata (a mayor tamaño, mayor tiempo/temperatura) y de la calidad deseada (a menor temperatura, mayor calidad). En este trabajo se considera una temperatura de mantenimiento de 394 K y un tiempo de mantenimiento de 1420 s. Una vez terminada esta fase, el autoclave se enfría rápidamente para evitar pérdidas de calidad en el alimento y reducir el tiempo del proceso. Esto se hace de la siguiente manera: primero se introduce, mediante la válvula TV-02, agua entre 325 K y 335 K (la misma que había sido utilizada al principio de la fase de calentamiento) y luego se introduce agua a temperatura ambiente (285 K - 300 K). Durante todo el proceso el flujo de salida de agua del autoclave es igual al de entrada para evitar que el autoclave se inunde o se quede sin agua.

El control de temperatura durante la etapa 1 (fases de calentamiento y mantenimiento) se realiza mediante la instrumentación asociada al lazo T-01, el cual esta formado por el sensor de temperatura TT-01, la válvula de control TV-01 y un controlador de tipo Proporcional-Integral (PI) TC-01, con una estructura de control simple.

Las ecuaciones matemáticas que describen el comportamiento del proceso, flujos de procesos, parámetros físico-químicos de fluidos y producto alimenticio, dimensiones de equipos, instrumentación utilizada para monitorizar y actuar, y los elementos adicionales requeridos para el sistema de

proceso se describen en (Pitarch et al., 2021). Tanto los modelos matemáticos de los distintos elementos que componen el proceso descrito, excluyendo el sistema de control, como el Deck generado en el que está embebido el modelo del sistema, se encuentran disponibles en (Merino, 2024). La suite de EcosimPro V.6.4.0 se usa para generar el Deck que contiene el modelo digital.

El algoritmo utilizado para integrar el sistema de Ecuaciones Algebraico Diferenciales (DAE) ha sido DASSL, que utiliza un paso de integración variable (Perzold, 1982), el cual lo define de manera interna el Deck, y cuyo valor máximo lo establece el CINT seleccionado. Las lógicas de operación y los controladores se incluyen en el componente PLC virtual, como se muestra en el siguiente apartado.

3.2. PLC virtual: lógicas de control discreto y controlador PI

Las lógicas de control discreto para el sistema de proceso se muestran en la Figura 9. Las variables que se intercambian entre el PLC virtual y el Deck se muestran en la Tabla 2. Las variables TC-01.ModoAuto y TC-01.RampaSP son de tipo booleana y se encuentra contenidas dentro del PLC, las cuales se usan para la habilitación del modo automático del controlador. Es de destacar, que las variables consideradas en las transiciones entre las etapas descritas en la Figura 9, provienen del HMI o del Deck, y no se deben confundir con el direccionamiento del intercambio de información entre el PLC virtual y el Deck que se muestra en la Tabla 2.

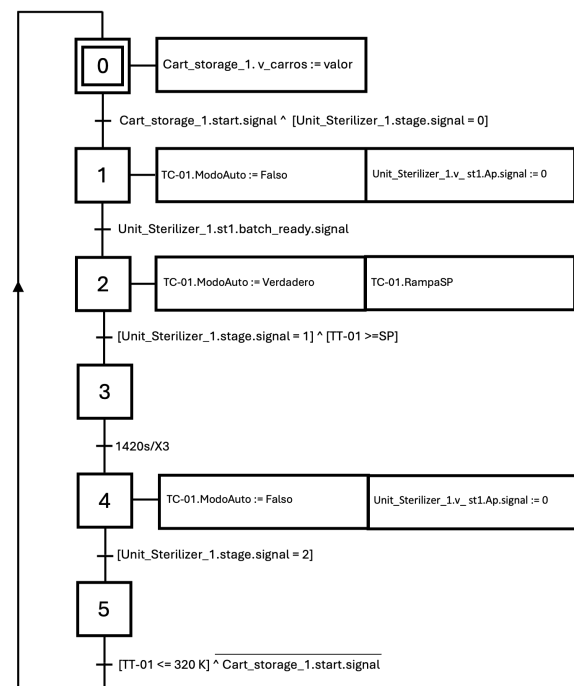


Figura 9: Lógicas de control de las etapas del proceso de esterilización.

En las secuencias que se ejecutan, el controlador PI continuo cambia su modo de funcionamiento de manual a automático, dependiendo de las condiciones definidas en las secuencias establecidas. El cambio de consigna (SP) se ejecuta suavemente mediante el uso de una rampa.

El controlador PI se define y configura utilizando la librería PIDCompact (Siemens, 2022), disponible en TIA Portal y

Tabla 2: Intercambio de variables entre el PLC virtual y el Deck

Variable (*)	Descripción	Tipo de Variable	Deck E/S	Nodo PLC	Nodo Deck
Cart_storage_1.start.signal	Inicio del proceso de carga manual	Booleana	E	ns = 4; i = 3	ns = 4; i = (*)
Cart_storage_1.v.carros	Velocidad de generación de carros [carros/h]	Real	E	ns = 4; i = 4	ns = 4; i = (*)
Unit_Sterilizer_1.st1.batch_in.ster.signal	Carga introducida en V-001	Real	S	ns = 4; i = 5	ns = 4; i = (*)
Unit_Sterilizer_1.st1.batch_ready.signal	V-001 listo para iniciar proceso	Real	S	ns = 4; i = 6	ns = 4; i = (*)
Unit_Sterilizer_1.st1.TR	Temperatura en el esterilizador	Real	S	ns = 4; i = 7	ns = 4; i = (*)
Unit_Sterilizer_1.v.st1.Ap.signal	Apertura TV-01	Real	E	ns = 4; i = 8	ns = 4; i = (*)
Unit_Sterilizer_1.stage.signal	Etapas proceso de esterilización	Real	E	ns = 4; i = 9	ns = 4; i = (*)
Cart_storage_1.n.carts	Números de carros	Entero	S	ns = 4; i = 11	ns = 4; i = (*)

se incluye en un bloque cíclico. El período de muestreo del bloque PIDCompact se configura con el valor de TINT, y es independiente del ciclo de scan del PLC. Los parámetros de ajuste y configuración del controlador PI se muestran en la Tabla 3. Los parámetros de sintonización del controlador se han obtenido al realizar una prueba en lazo abierto en el sistema de proceso, en la cual se realiza un cambio de tipo escalón en la variable manipulada (TV-01), para medir el efecto que tiene este sobre la variable controlada (TT-01) y obtener la ecuación que describe la dinámica del proceso y aplicar el Método de sintonía de (Rovira et al., 1969), considerando el criterio de la integral modificada del error absoluto (MITAE). De esta manera, el proceso tiene un comportamiento de sistema de primer orden con retardo, y se obtienen la ganancia del proceso $K_p = 1.90\%/%$, constante de tiempo del proceso $\tau = 123\text{ s}$ y retardo $d = 4\text{ s}$.

Tabla 3: Parámetros del controlador TC-01

Parámetro	Unidades	Valor
Valor de salida - rango mínimo	%	0.00
Valor de salida - rango máximo	%	100.00
Variable de proceso - rango mínimo	K	300.00
Variable de proceso - rango máximo	K	400.00
Velocidad de la rampa para consigna en modo automático	K/s	0.028
Valor de consigna en modo automático	K	394.00
Valor de salida en modo manual	%	0.00
Ganancia del controlador	%/%	7.10
Constante de tiempo integral	s	120

Las lógicas secuenciales se programan en bloques de funciones, y los valores de las variables del proceso se almacenan en bloques de bases de datos. La suite de TIA Portal V.17.0 se utiliza para programar y configurar el PLC y la interfaz HMI.

El modelo de PLC utilizado es la serie S7-1500, CPU 1512C-1PN, con protocolo de comunicación OPC UA habilitada. La virtualización del PLC se realiza mediante la aplicación PLCSIM Advanced V.4.0 (Figura 10). Esta versión permite que el desempeño en la ejecución de las lógicas implementadas sea similar a los PLC físicos. El ciclo de scan del PLC se configura de manera automática, esto quiere decir que viene definido por el dispositivo, y es el tiempo de duración que contiene las acciones que definen este término.

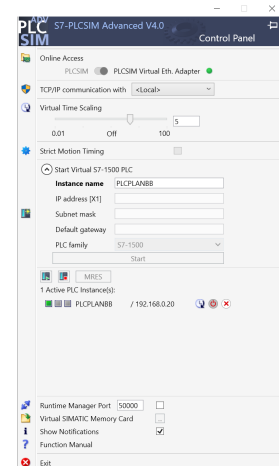


Figura 10: PLC virtual en PLCSIM Advanced.

La interfaz HMI incluye un diagrama de procesos simplificado que permite: (i) la visualización de las principales variables y etapas del proceso, (ii) poner en funcionamiento y detener el PLC, (iii) fijar una velocidad de carga de carros para simular esta operación manual e iniciarla, (iv) iniciar el proceso de esterilización una vez la unidad se encuentra cargada y (v) la visualización del desempeño de las variables del proceso mediante distintos gráficos (Figura 11).

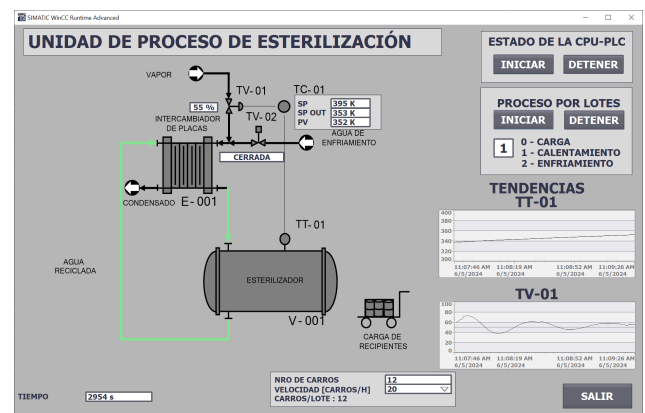


Figura 11: Interfaz HMI para visualización y control.

La configuración y lógicas de control del PLC e interfaz HMI desarrolladas se encuentran disponibles como proyecto de TIA Portal en (Rivero-Contreras, 2024).

3.3. Gestor GCC: fichero de configuración XML

El fichero de configuración contiene las variables cuyos valores se intercambian entre el PLC Virtual y el Deck. Las variables que se intercambian se muestran en la Tabla 2. En esta tabla, se muestra el direccionamiento de las variables respecto al Deck (E: Entrada y S: Salida). Por otro lado, en el nodo del Deck, la variable se identifica como se muestra en la columna Variable.

En el entorno virtual propuesto, el TINT se considera como el periodo de muestreo del controlador. Las mejores prácticas de la industria sugieren que el período de muestreo del controlador debe estar por debajo de la décima parte de la constante de tiempo del proceso (Control Guru, 2015). Como se ha indicado en la sección anterior, la constante de tiempo del proceso es de 123 segundos, lo cual nos sugiere un periodo de muestreo de 12.3 segundos. No obstante, y para resaltar la importancia de una buena elección de este parámetro, se van a considerar diversos valores de TINT para observar el efecto de este en las acciones de control.

Los servidores OPC UA se acceden a través de sus direcciones URL en base a las direcciones TCP/IP y puertos que tengan asignados. En nuestro caso, *opc.tcp://localhost:16701* para el Deck y *opc.tcp://192.168.0.20:4840* para el PLC virtual.

4. Resultados y discusión

4.1. Evaluación del proceso y las lógicas de control

El desempeño del entorno virtual propuesto se ha obtenido considerando los valores de los parámetros mostrados en la Tabla 4. El comportamiento obtenido en el entorno virtual de las variables del proceso se muestra en la Figura 12, para la carga de carros, y en la Figura 13, para el esterilizador.

Tabla 4: Parámetros de los componentes del entorno virtual considerados

Parámetro	Unidad	Valor
CINT	s	1
FAC		1
TINT	s	1
TSTOP	s	8000
Ciclo de scan	ms	Automático (entre 1.003 y 1.835)

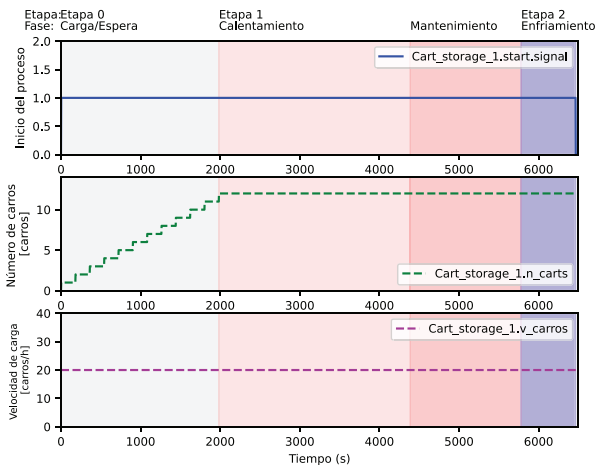


Figura 12: Comportamiento de las variables de carga de carros en el entorno virtual durante las etapas del proceso.

La Figura 12 muestra que la carga manual de carros se ejecuta acorde con las acciones tomadas desde el HMI del entorno. Si se considera que solo se tiene una unidad de esterilización, la carga de carros se detiene para que el proceso de esterilización se ejecute según lo estimado. Por otro lado, la Figura 13 muestra el comportamiento de la temperatura del esterilizador TT-01, la apertura de la válvula de control TV-01, las etapas del proceso y la variable de carga de carros manual completada.

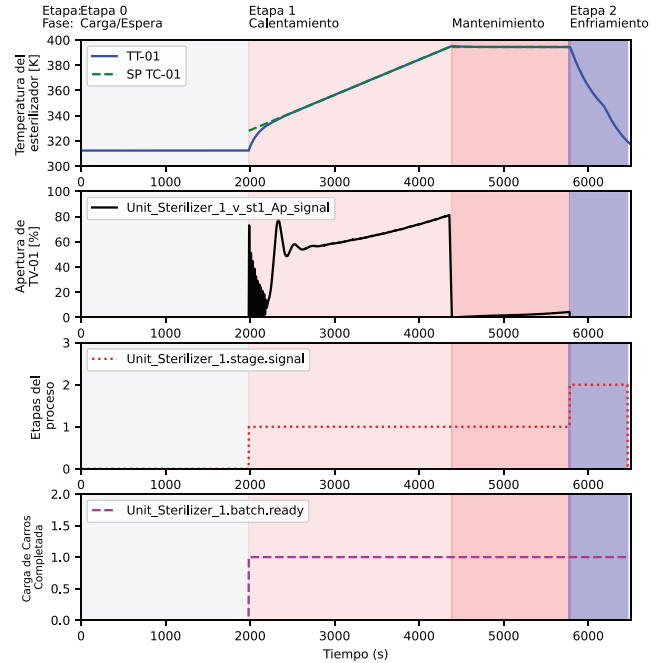


Figura 13: Comportamiento de las variables del esterilizador en el entorno virtual durante las etapas del proceso.

Una vez la carga de carros se ha completado, y se inicia la etapa de calentamiento, las lógicas definidas establecen que la temperatura de inicio de la rampa es superior a la que se encuentra el esterilizador al iniciarse la etapa de calentamiento, y se observan fuertes oscilaciones de la válvula TV-01 para alcanzar el valor deseado de SP. En principio, este comportamiento se debe a que la válvula TV-01 se encontraba cerrada, el valor de TT-01 se encuentra alejado del SP establecido para el inicio de la rampa y los valores de sintonización utilizados funcionan de manera adecuada para cuando el cambio de consigna se realiza en un sistema de control estable. Luego de alcanzado este valor, es decir, cuando la TT-01 se aproxima al valor de SP del controlador, la válvula adquiere un comportamiento normal acorde a la sintonía seleccionada. A partir de este momento se puede observar que el proceso se lleva a cabo sin inconvenientes, de acuerdo a las lógicas configuradas y definidas en la Figura 9 y comparando con las etapas y fases del proceso de esterilización durante la operación, mostradas en la Figura 7.

Además, se realiza una comparación entre el comportamiento de las variables en el entorno virtual respecto a una simulación donde el controlador PI se encuentra embebido en el propio modelo digital. Los resultados se muestran en la Figura 14, para las variables de la carga de carros, y en la Figura 15, para las variables en el esterilizador.

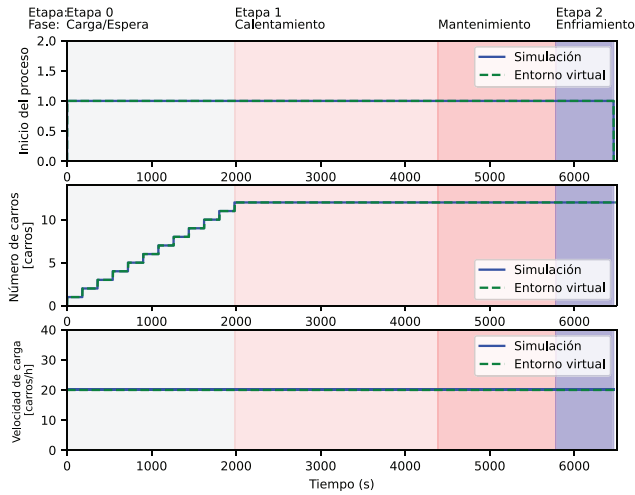


Figura 14: Comportamiento de las variables de carga de carros durante las etapas del proceso, en el entorno virtual y simulación en EcosimPro.

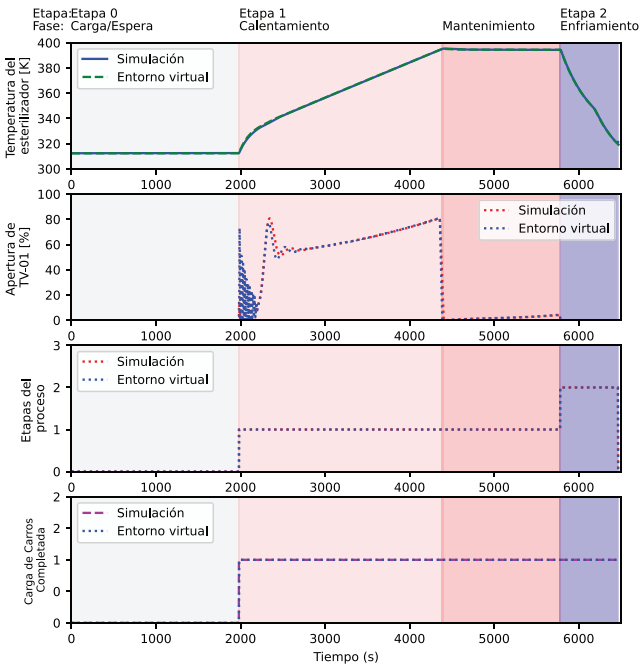


Figura 15: Comportamiento de las variables del esterilizador durante las etapas del proceso, en el entorno virtual y simulación en EcosimPro.

La Figura 14 indica que la carga manual de carros se ejecuta sin presentarse discrepancias de comportamientos en las variables discretas del sistema de proceso, entre el entorno virtual y la simulación. Esto aplica para las variables discretas mostradas en la Figura 15.

Respecto a las variables del esterilizador, en la Figura 15, se observa un comportamiento similar para la temperatura del esterilizador TT-01, con excepción de la apertura de la válvula TV-01, en la cual se observan pequeñas discrepancias en la acción de control entre el entorno virtual y la simulación que contiene el controlador, sin afectar el comportamiento de la misma. Esta discrepancia en la acción de control podría deberse a diferencias en la implementación del controlador PID de Siemens en comparación con la del PLC virtual en EcosimPro. Los detalles de implementación del PID de

Siemens son internos y propietarios, lo que impide conocer las particularidades exactas del algoritmo que podrían explicar la discrepancia. Sin embargo, en opinión de los autores, esta es la única explicación plausible.

4.2. Desempeño de los gestores GEP y GCC

Los gestores GEP y GCC ejecutan de forma satisfactoria la función que deben realizar. El GEP ejecuta el avance de simulación y permite acelerar la simulación del modelo digital en el Deck. Por supuesto, la aceleración que se define en el GEP debe corresponder con el escalado de tiempo virtual que permite ajustar el PLCSIM Advanced para evitar discrepancias en el comportamiento del lazo de control.

Por otro lado, el GCC realiza el intercambio de valores en las variables seleccionadas entre el PLC y el Deck, permitiendo que los elementos involucrados en las acciones de control tengan un desempeño adecuado y el proceso se ejecute de forma satisfactoria. Por supuesto, la selección del tiempo de intercambio en el GCC depende de la dinámica del sistema de proceso que se desee controlar. Para ello, se realizaron estudios modificando el TINT (1 s, 5 s, 10 s, 12.3 s y 20 s), fijando el CINT en 1 s y FAC en 1x. De esta manera, se obtuvieron diferencias en los valores de la apertura de la válvula TV-01 (Figura 16) y en menor medida la temperatura del esterilizador TT-01 (Figura 17).

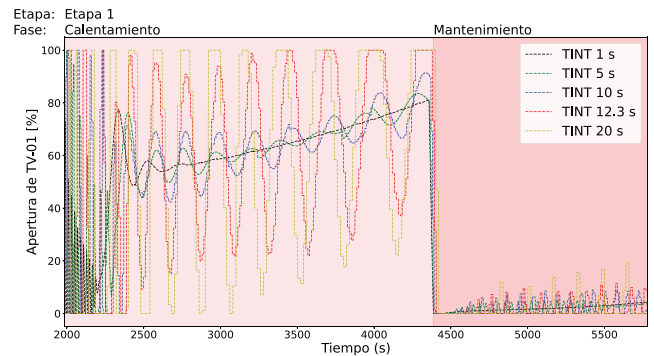


Figura 16: Comportamiento de la apertura de la válvula TV-01 durante el modo automático del controlador en el entorno virtual para diversos valores de TINT.

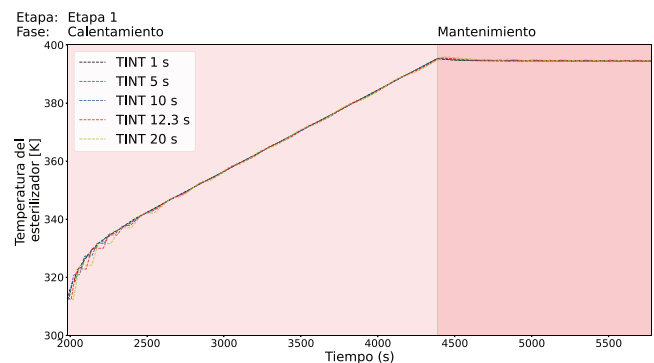


Figura 17: Comportamiento de la temperatura del esterilizador TT-01 durante el modo automático del controlador en el entorno virtual para diversos valores de TINT.

En la Figura 16 se observa que a mayor valor de TINT, la amplitud de la oscilación de la válvula aumenta, y en

algunos casos se satura en los límites superiores durante la etapa de calentamiento y en los límites inferiores en la etapa de mantenimiento. A pesar de que no se observan cambios considerables en la temperatura del esterilizador (Figura 17), el comportamiento de la válvula puede ocasionar desgaste de los componentes de actuación e internos del instrumento. De esta manera, se observa que la selección de un TINT adecuado influye en la dinámica del proceso y comportamiento del lazo de control. Por otro lado, se puede inferir que si no se selecciona un periodo de muestreo (dado por TINT) menor que un décimo de la constante de tiempo del proceso, empiezan a generarse problemas de sincronización entre el controlador y proceso.

Es de destacar que la selección del protocolo OPC UA como estándar de comunicación se debe a que es común a los componentes involucrados en el entorno virtual. Hasta el momento, PLCSIM Advanced admite protocolo Softbus usado dentro de la suite de configuración TIA Portal y TCP/IP que habilita el uso de OPC UA. Respecto al Deck, este admite comunicación mediante FMI y OPC DA/UA. De esta manera, OPC UA se considera un protocolo adoptado por diversos proveedores de elementos involucrados en sistemas de instrumentación y control.

En todo caso, se ha demostrado que es posible construir un entorno virtual que puede ser usado para aplicación en evaluación de estrategias de control y la validación de lógicas de control discretas y continuas, de controladores PLC. En principio, este entorno debe ser usado para simulación hasta que se encuentre disponible el estándar OPC UA FX. El escalado a sistema de procesos reales debe realizarse usando los protocolos de comunicación disponibles para dispositivos de campo. Esto va a permitir optimizar los tiempos y esfuerzos durante el desarrollo de ingenierías, puestas en marcha y operación de procesos industriales, mediante el uso de un gestor de ejecución de la simulación del proceso que comanda el modelo digital, y un gestor de comunicación que integra el PLC y el modelo digital del proceso.

5. Conclusiones y Trabajo Futuro

En este trabajo se ha definido un entorno virtual para integrar un modelo digital del proceso y un PLC virtual, mediante el uso de un gestor de ejecución de la simulación del proceso que comanda la ejecución del modelo digital y un gestor de comunicaciones de componentes que integra los elementos del entorno virtual propuesto. Este entorno virtual puede ser usado para aplicación en evaluación en estrategias de control. En principio, este entorno debe ser usado para simulación previo a su implementación en planta, y su aplicación en sistemas de procesos reales depende de que los protocolos de comunicación usados sean válidos para dispositivos de campo.

Aunque en este trabajo se han utilizado componentes específicos para el PLC virtual y el modelo digital, estos podrían sustituirse por otros, lo cual puede ser considerado como una base para realizar la integración de los diversos componentes presentes en las jerarquías del estándar IEC 62264-1. De este modo, el entorno virtual y su metodología pueden ampliarse y considerar las necesidades o preferencias específicas de cualquier industria.

La comunicación se realiza mediante OPC UA, por ser un protocolo de referencia en la industria.

Respecto a trabajo futuro, se pueden realizar estudios más exhaustivos del efecto que tienen los diversos parámetros temporales (CINT, TINT y ciclo del scan del PLC) en el comportamiento del entorno virtual, y establecer mecanismos fiables para una selección adecuada de estos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo de la Conserjería de Educación de la Junta de Castilla y León y la UE-FEDER (CL-EI-2021-07, UIC 233), y el Ministerio de Ciencia e Innovación de España con el proyecto PID2021-123654OB-C31 (a-CIDit) de MCIN/AEI/10.13039/501100011033/UE-FEDER. El primer autor ha recibido soporte financiero de la convocatoria de contratos predoctorales 2019 de la Universidad de Valladolid y el Banco Santander.

Referencias

- Alphonsus, E. R., Abdullah, M. O., 2016. A review on the applications of programmable logic controllers (PLCs). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60, 1185–1205, DOI: 10.1016/j.rser.2016.01.025.
- Aspentech, 2024. Aspentech performance engineering applications. Visitado en junio de 2024.
URL: <https://www.aspentech.com/en/solutions/performance-engineering>
- Boon, M., Mei, R. V. D., Winands, E., 2011. Applications of polling systems. *Surveys in Operations Research and Management Science* 16 (2), 67–82, DOI: 10.1016/j.sorms.2011.01.001.
- Carlsson, H., Danielsson, F., Lennartson, B., 2008. General time synchronisation method for PLC programs aiming at virtual verification and development with CAPE tools. *IFAC Proceedings Volumes* 41 (2), 4440–4445, DOI: 10.3182/20080706-5-kr-1001.00749.
- Cigánek, J., Žemla, F., 2022. Design of digital twin for PLC system. In: *2022 Cybernetics and Informatics (K&I)*. IEEE, DOI: 10.1109/KI55792.2022.9925961.
- CODESYS, 2024. CODESYS SoftPLC. Visitado en febrero de 2024.
URL: <https://store.codesys.com/en/softplc.html>
- Control Guru, 2015. Exploring deeper: Sample time, parameter scheduling, plant-wide control. Visitado en agosto de 2024.
URL: <https://controlguru.com/sample-time-is-a-fundamental-design-and-tuning-specification/>
- Cruz, T., Simões, P., Monteiro, E., 2016. Virtualizing programmable logic controllers: Toward a convergent approach. *IEEE Embedded Systems Letters* 8 (4), 69–72, DOI: 10.1109/les.2016.2608418.
- DATETIME, 2024. DATETIME V.3.1.1 - basic date and time types for python. Visitado en junio de 2024.
URL: <https://docs.python.org/3/library/datetime.html>
- Diazgiron-Aguilar, D., Gonzalez-Islas, J., Godinez-Garrido, G., Guzman-Alvarado, M., 2022. Virtual lab environment for programmable logic controllers training. In: *2022 XXIV Robotics Mexican Congress (COMRob)*. IEEE, DOI: 10.1109/comrob57154.2022.9962262.
- EA Internacional, 2024. EcosimPro — PROOSIS - modelling and simulation toolkits and services. Visitado en junio de 2024.
URL: <https://www.ecosimpro.com>
- FlexSim Software Products, Inc., 2024. FlexSim. Visitado en junio de 2024.
URL: <https://www.flexsim.com/flexsim/>
- International Electrotechnical Commission, 2013a. IEC 61131-3. Programmable controllers - Part 3: Programming languages. Standard.
URL: <https://webstore.iec.ch/publication/4552>
- International Electrotechnical Commission, 2013b. IEC 62264-1. Enterprise-control system integration – Part 1: Models and terminology. Standard.
URL: <https://webstore.iec.ch/publication/6675>
- International Electrotechnical Commission, 2020. IEC 62541. OPC Unified Architecture. Standard.
URL: <https://webstore.iec.ch/publication/61114>

- Khan, A., Falkman, P., Fabian, M., 2019. Testing and validation of safety logic in the virtual environment. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 26, 1–9, DOI: 10.1016/j.cirpj.2019.07.002.
- Liang, Q., Li, L., 2011. The study of soft PLC running system. *Procedia Engineering* 15, 1234–1238, DOI: 10.1016/j.proeng.2011.08.228.
- Lu, H., Ying, Z., Liao, T., 1992. Simulation of programmable logic controller. *Computers & Industrial Engineering* 23 (1–4), 351–354, DOI: 10.1016/0360-8352(92)90133-5.
- Mehta, B., Reddy, Y., 2015. *Distributed control system*. Elsevier, pp. 75–133, DOI: 10.1016/b978-0-12-800939-0.00006-1.
- Merino, A., 2024. Model sterilizer. Visitado en junio de 2024. URL: https://github.com/Alejandro7c/Model_sterilizer
- Modelica Association, 2024. OPENMODELICA. Visitado en junio de 2024. URL: <https://openmodelica.org>
- Moon, Y., 2007. Enterprise resource planning (ERP): a review of the literature. *International Journal of Management and Enterprise Development* 4 (3), 235–264, DOI: 10.1504/ijmed.2007.012679.
- Muñoz, J. A., Guzmán, J. L., Rodríguez, F., Berenguel, M., Pawlowski, A., 2009. Virtual lab for programmable logic controllers. In: 2009 IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation. IEEE, DOI: 10.1109/etfa.2009.5347124.
- Naysmith, M. R., Douglas, P. L., 1995. Review of real time optimization in the chemical process industries. *Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing* 3 (2), 67–87, DOI: 10.1002/apj.5500030202.
- NumPy, 2024. NUMPY V.1.25 - the fundamental package for scientific computing with python. Visitado en junio de 2024. URL: <https://numpy.org/>
- Oliveira-Silva, E., Zamarreño, J. M., de Prada, C., Navia, D., Marmol, S., Gonzalez, R., 2023. A virtual environment of an industrial splitter to test dynamic real time optimization. *Simulation Modelling Practice and Theory* 129, Article ID 102821, DOI:10.1016/j.simpat.2023.102821.
- Olivier Roulet-Dubonnet, 2024. Python OPC-UA Revision 131ad8ce documentation. Visitado en junio de 2024. URL: <https://python-opcua.readthedocs.io/en/latest/>
- Perzold, L. R., 1982. A description of DASSL: a differential/algebraic system solver. *Scientific Computing* (1), 65–68.
- Pitarch, J., Vilas, C., de Prada, C., Palacín, C., Alonso, A., 2021. Optimal operation of thermal processing of canned tuna under product variability. *Journal of Food Engineering* 304, Article ID 110594, DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2021.110594.
- Python, 2024a. The ElementTree XML API. Visitado en junio de 2024. URL: <https://docs.python.org/3/library/xml.etree.elementtree.html>
- Python, 2024b. Python. Visitado en junio de 2024. URL: <https://www.python.org>
- Rivero-Contreras, R., 2024. TIA Portal V17. PLC Project: Logic and HMI. Visitado en junio de 2024. URL: <https://github.com/rerc86/RIAIPLCProject>
- Rockwell Automation, 2024. Studio 5000 Logix Emulate. Visitado en junio de 2024. URL: <https://www.rockwellautomation.com/es-es/products/software/factorytalk/designsuite/studio-5000/studio-5000-logix-emulate.html>
- Rovira, A. A., Murrill, P., Smith, C. L., 1969. Tuning controllers for set-point changes. *Instruments and Control Systems*. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:117665122>
- Saenz de Ugarte, B., Artiba, A., Pellerin, R., 2009. Manufacturing execution system – a literature review. *Production Planning and Control* 20 (6), 525–539, DOI: 10.1080/09537280902938613.
- Schneider Electric, 2023. EcoStruxure Control Expert - PLC Simulator. URL: <https://www.se.com/es/es/download/document/EI00000001714/>
- Schwenzer, M., Ay, M., Bergs, T., Abel, D., 2021. Review on model predictive control: an engineering perspective. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 117, 1327–1349, DOI: 10.1007/s00170-021-07682-3.
- Shivanandaswamy, K. K., Sarkar, C., Rajagopal, S., Ramachandra, L. P., Chayakumar, C. M., 2021. Emphasis on evaluative prerequisites for decisive Software-in-the-Loop (SiL) environments. In: 2021 8th International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom). IEEE, pp. 450–457.
- Siemens, 2016. SIMATIC S7-1500. S7-PLCSIM Advanced. Function Manual. URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/153/109739153/att_895955/v1/s7-plcsim_advanced_function_manual_en-US_en-US.pdf
- Siemens, 2021a. SIMATIC Engineering Tools S7-PLCSIM V17. URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/780/109797780/att_1067574/v1/S7-PLCSIMenUS_en-US.pdf
- Siemens, 2021b. WinCC (TIA Portal) Referencias para la programación Manual del Sistema. URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/202/109794202/att_1069764/v1/WCC_ProgRef_es-ES.pdf
- Siemens, 2022. SIMATIC S7-1200, S7-1500. Regulación PID. Manual de funciones. URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/036/108210036/att_74030/v1/s71500_pid_control_function_manual_esES_es-ES.pdf
- Siemens, 2023. S7 communication with PUT/GET. Visitado en junio de 2024. URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/115/82212115/att_108330/v2/82212115_s7_communication_s7-1500_en.pdf
- Siemens, 2024a. gPROMS Process simulation for the digital age. Visitado en junio de 2024. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/industry-software/gproms-digital-process-design-and-operations/gproms-modelling-environments/gproms-process.html>
- Siemens, 2024b. SIMATIC S7-1500V familiar functionalities, completely virtual. Visitado en febrero de 2024. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/plc/simatic-s7-1500/virtual-plc.html>
- Siemens, 2024c. TIA portal. Visitado en junio de 2024. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/industry-software/automation-software/tia-portal.html>
- Sobrino, D. R. D., Ružarovský, R., Holubek, R., Velíšek, K., 2019. Into the early steps of virtual commissioning in tecnomatix plant simulation using S7-PLCSIM Advanced and STEP 7 TIA portal. *MATEC Web of Conferences* 299, Article ID 02005, DOI: 10.1051/mateconf/201929902005.
- Spyder Website Contributors, 2024. Spyder V.5.2.2 - the scientific python development environment. Visitado en junio de 2024. URL: <https://www.spyder-ide.org>
- Stankovski, S., Ostojic, G., Baranovski, I., Tegeltija, S., Smirnov, V., 2022. Robust automation with PLC/PAC and edge controllers. *IFAC-PapersOnLine* 55 (4), 316–321, DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.06.052.
- Stojadinovic, A. V., Pilipovic, M. D., Spasic, Z., 1998. Development of virtual PLC for simulation and education in manufacturing. *IFAC Proceedings Volumes* 31 (15), 785–790, DOI: 10.1016/s1474-6670(17)40648-3.
- The OPC Foundation, 2024. The OPC Foundation releases the OPC UA Field eXchange (UAFX) Specifications. Visitado en febrero de 2024. URL: <https://opcfoundation.org/news/press-releases/the-opc-foundation-releases-the-opc-ua-field-exchange-uafx-specifications/>
- Wang, G. G., 2002. Definition and review of virtual prototyping. *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 2 (3), 232–236, DOI: 10.1115/1.1526508.
- Yokogawa, 2024. FA-M3 Simulation Software Virtual-M3. Visitado en junio de 2024. URL: <https://www.yokogawa.com/es/solutions/products-and-services/control/control-devices/programmable-logic-controllers-plc-pac/fa-m3/#Descargas>
- Zamarreño, J. M., 2024a. A python script that exchanges values between different OPC UA servers based on the configuration stored on the file `opcua.exchange.conf.xml`. Visitado en junio de 2024. URL: https://github.com/jmzama/Exchange OPCUA_Servers
- Zamarreño, J. M., 2024b. Python script that simulates a Deck OPC UA in real time or with the desired speedup factor. Visitado en junio de 2024. URL: <https://github.com/jmzama/DeckOPCUAMgt>
- Zamarreño, J. M., Mazaeda, R., Caminero, J. A., Rivero, A. J., Arroyo, J. C., 2014. A new plug-in for the creation of OPC servers based on EcosimPro© simulation software. *Simulation Modelling Practice and Theory* 40, 86–94, DOI: 10.1016/j.simpat.2013.09.003.
- Zhang, H., Kitchenham, B., Pfahl, D., 2008. Software process simulation modeling: Facts, trends and directions. In: 2008 15th Asia-Pacific Software Engineering Conference. IEEE, DOI: 10.1109/apsec.2008.50.
- Zhou, C., Chen, H., 2009. Development of a PLC virtual machine orienting IEC 61131-3 standard. In: 2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. IEEE, DOI: 10.1109/icmtma.2009.422.