

SUPERVISIÓN Y CONTROL DE PROCESOS

Enrique E. Tarifa^{1,4}, Sergio L. Martínez¹, Samuel Franco Domínguez¹,
Susana A. Chalabe¹, Luis E. Ituarte¹, Álvaro F. Núñez¹,
Jorgelina F. Argañaraz¹, Adolfo N. Riveros Zapata², Julieta Martínez²,
Juan P. Gutierrez^{2,4}, Lara V. Lescano Farias³, Ubaldo J. M. Aramayo¹

⁽¹⁾ Facultad de Ingeniería / Universidad Nacional de Jujuy / CONICET
Ítalo Palanca N° 10 / S. S. de Jujuy / Provincia de Jujuy

⁽²⁾ Facultad de Ingeniería / Universidad Nacional de Salta
Av. Bolivia 5150 / Salta Capital / Provincia de Salta

⁽³⁾ Facultad de Agronomía y Agroindustrias / Universidad Nacional de Santiago del Estero
Avda. Belgrano (Sud) N° 1912 / Capital / Provincia de Santiago del Estero

⁽⁴⁾ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

eetarifa@fi.unju.edu.ar; smartinez@fi.unju.edu.ar; sfdominguez@yahoo.com.ar;
susana.chalabe@gmail.com; luisituarte@hotmail.com; afnunez@fi.unju.edu.ar;
jfarganaraz@hotmail.com; ariveros@unsa.edu.ar; julemartinez@unsa.edu.ar;
gutierrezjp@unsa.edu.ar; lescanolaravaleria@gmail.com; uba.aramayo@gmail.com

Área temática: Agentes y Sistemas Inteligentes (ASI)

RESUMEN

El actual contexto productivo exige la optimización tanto del diseño como de la operación de las plantas industriales. Basados en ese enfoque, en el proyecto “Supervisión y Control de Procesos”, se desarrollarán, adaptarán y aplicarán herramientas propias de la Operabilidad de Procesos (flexibilidad, controlabilidad, confiabilidad, robustez). Los procesos que tendrán prioridad son los que están implementados en la planta piloto de la Facultad de Ingeniería de la UNSa (extracción líquida-líquida, absorción gas-líquida, producción de vapor, pasteurización, reacción, entre otros), y los procesos vinculados al gas, al petróleo, al litio y a las energías no convencionales —especialmente a la energía solar—. Para alcanzar los objetivos del proyecto, se emplearán técnicas del campo de la Ingeniería de Procesos (simulación, optimización, control, diseño) y de la Inteligencia Artificial (sistemas expertos fuzzy, redes neuronales, minería de datos).

Palabras clave: Operabilidad, Flexibilidad, Controlabilidad, Confiabilidad, Robustez.

CONTEXTO

El grupo responsable de la realización del proyecto “Supervisión y Control de Procesos”, es el grupo de investigación *IngProAr* (Ingeniería de Procesos Argentina), con lugar de trabajo en la Facultad de Ingeniería de la UNJu (Universidad Nacional de Jujuy). El grupo *IngProAr* fue creado en 1995 por el Dr. Enrique Tarifa (investigador de CONICET y de la UNJu), y está constituido por docentes investigadores, profesionales y estudiantes de diversas áreas disciplinares.

El proyecto al que hace referencia este trabajo, es continuación del proyecto anterior denominado “Desarrollo de Herramientas para la Operación de Procesos”. En el presente proyecto, se propone continuar con la línea de investigación emprendida en el proyecto anterior, concentrándose en la supervisión y el control de procesos. Para ello, se desarrollarán, adaptarán y aplicarán herramientas propias de la Operabilidad de Procesos (flexibilidad, controlabilidad, con-

fiabilidad, robustez). Estas herramientas serán aplicadas en los procesos implementados en la planta piloto de la Facultad de Ingeniería de la UNSa. Por otra parte, debido a la importancia que tienen los sistemas de energía no convencionales para Jujuy y para la UNJu, en este proyecto se considerarán también los sistemas de aprovechamiento de energía solar.

Para cumplir con las actividades educativas propuestas en el proyecto, se incorporó al grupo a la Dra. Jorgelina Argañaraz, Profesora en Ciencias de la Educación y Doctora en Ciencias Sociales. En cuanto a la parte experimental del proyecto, estará a cargo de los siguientes investigadores de universidades de otras provincias: Adolfo Néstor Riveros Zapata (UNSa), Julieta Martínez (UNSa), Juan Pablo Gutierrez (UNSa) y Lara Valeria Lescano Farias (UNSE).

El proyecto de referencia es financiado por la Secretaría de Ciencia y Técnica y Estudios Regionales (SeCTER) y la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Jujuy, y fue reconocido por la SeCTER-UNJu con el código D/0164 y por el Programa de Incentivos de la Secretaría de Políticas Universitarias del Ministerio de Educación de la Nación.

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto de referencia, propone el desarrollo, adaptación y aplicación de herramientas propias de la Operabilidad de Procesos. La operabilidad de un proceso productivo comprende las siguientes propiedades:

Flexibilidad: Implica la capacidad de un sistema de operar en estado estacionario estable para un rango de condiciones inciertas que pueden encontrarse durante la operación de la planta [1].

Controlabilidad: Puede ser definida como la capacidad de la planta para alcanzar y mantener un estado deseado [2].

Confiabilidad: Hace referencia a la capacidad de todos los elementos que conforman la planta de funcionar continuamente satisfaciendo un conjunto de especificaciones o condiciones [3].

Robustez: Es la capacidad de la planta de hacer mínima la variación de la medida de calidad de los productos ante variaciones de las condiciones de operación [4].

Los actuales estudios de operabilidad involucran cada vez más el uso de técnicas de Inteligencia Artificial (redes neuronales, sistemas expertos con lógica fuzzy, entre otras), siendo los sistemas de control inteligentes los mejores exponentes de esta situación [5].

Para poder desarrollar herramientas destinadas a la operación de un proceso, es necesario contar con un conocimiento acabado del comportamiento estacionario y dinámico que el mismo presenta. Por ello, se desarrollará un modelo estacionario y otro dinámico para cada proceso a estudiar. Para lograr esto, se modelará el proceso escogido utilizando HYSYS —un simulador dinámico de propósito general— o, cuando sea necesario, se desarrollarán modelos orientados a ecuaciones por medio de utilitarios matemáticos apropiados como MATLAB, Simulink, Mathcad, Berkeley Madonna. En los casos que se justifique, se programará utilizando el lenguaje de programación más adecuado: Delphi, Visual Basic, C++.

Las licencias de las aplicaciones citadas tienen un costo considerable; por ese motivo, se hará un esfuerzo por sustituirlas con las opciones libres y de código abierto que brinden funcionalidades equivalentes: Lazarus, Octave, Julia, wxMaxima. La evaluación de aplicaciones libres con código abierto es un tema que está cobrando importancia por sí mismo [6] y será un tema a analizar en el proyecto propuesto.

Una vez que se cuente con el simulador del proceso seleccionado, se procederá a realizar un conjunto de estudios con el fin de evaluar la operabilidad del proceso (flexibilidad, controlabilidad, confiabilidad y robustez). También, se llevarán a cabo estudios de estabilidad y de optimización. Los modelos de optimización serán implementados en LINGO. La información obtenida de los estudios realizados se empleará para determinar las modificaciones que deberán efectuarse en el diseño, en la operación y en la gestión del proceso con el fin de optimizar su desempeño.

Para la supervisión del proceso, se diseñará el sistema de instrumentación y de procesamiento de datos que permita proveer al operador toda la información necesaria para la correcta operación del proceso. El método que se empleará para diseñar el sistema de instrumenta-

ción fue desarrollado por el grupo *IngProAr*. Otro método que se empleará también será la reconciliación de datos.

En cuanto a los sistemas de control, se desarrollarán sistemas de control avanzado empleando técnicas de Inteligencia Artificial (e.g., sistemas expertos fuzzy, redes neuronales, redes neuronales wavelets). Un punto importante a desarrollar serán los controladores MIMO (Multiple-input, Multiple-output) y los controladores predictivos. Para la implementación de técnicas de Inteligencia Artificial, se empleará preferentemente MATLAB con licencia académica y, eventualmente, sus alternativas libres y abiertas.

2. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

El proyecto de referencia se enmarca en las siguientes líneas prioritarias de la UNJu (Res. CS N°168/93):

Desarrollo Económico–Social Regional Sustentable: Las herramientas a desarrollar en el proyecto servirán para aumentar la operabilidad de los procesos productivos de la región. En consecuencia, se favorecerá el desarrollo económico de la región.

También, el proyecto se enmarca principalmente en la siguiente línea prioritaria de la Facultad de Ingeniería (Res. CAFI N°393/13):

Línea 3 - El estudio de procesos específicos o integrados que contribuyan a la cadena de valor de los productos obtenidos: Esta línea comprende los siguientes temas: Análisis, diseño y síntesis óptima de procesos; Simulación y optimización de procesos; Operación y mantenimiento de procesos; Supervisión y control de procesos; Sistemas de apoyo a la toma de decisiones en procesos; Integración de masa y energía; Análisis de la Performance de procesos. Los resultados a obtener con el proyecto propuesto están vinculados a todos los temas citados.

El proyecto en consideración además está vinculado con las siguientes líneas prioritarias de la Facultad de Ingeniería:

Línea 1 - La exploración, manejo, valorización, obtención, transformación y aprovechamiento de recursos naturales renovables, no renovables y energéticos. La Gestión ambiental relacionada:

La vinculación con esta línea se presenta debido a que las herramientas a desarrollar en el presente proyecto pueden ser aplicadas a cualquier tipo de proceso productivo. Por ejemplo, en un proyecto anterior, las herramientas desarrolladas se aplicaron en la gestión óptima de fincas en la cuenca de la Quebrada de Humahuaca. Además, entre los procesos a estudiar, están los que involucran petróleo, gas, energía solar y litio; los cuales son los recursos energéticos más ampliamente utilizados en la actualidad.

Línea 5 - El desarrollo de la Informática, los sistemas y la tecnología derivados de ésta: Algunos de los productos del proceso son aplicaciones informáticas —simuladores, optimizadores, sistemas de control—, para las cuales se deben desarrollar nuevos algoritmos numéricos o técnicas de Inteligencia Artificial.

Línea 6 - El desarrollo de la calidad educativa y el estudio de los procesos de enseñanza y aprendizaje: Algunos productos del proyecto —simuladores, optimizadores, sistemas de control, publicaciones, apuntes— tienen impacto directo sobre la calidad educativa.

3. OBJETIVOS Y RESULTADOS

El proyecto en cuestión, tiene como objetivo general desarrollar herramientas para la operación de procesos. Para ello se diseñarán, desarrollarán, adaptarán y aplicarán herramientas propias de la Operabilidad de Procesos.

Los objetivos particulares del proyecto propuesto son los siguientes: 1) Desarrollar métodos para determinar y aumentar la flexibilidad de procesos; 2) Desarrollar sistemas de supervisión; 3) Desarrollar sistemas de control avanzados; 4) Desarrollar material para la enseñanza de Ingeniería Química (simuladores, optimizadores, sistemas de control, publicaciones y apuntes).

A continuación, se comentan los principales resultados obtenidos en este último año. En el caso de los sistemas de control avanzado, se han realizado modelado y pruebas de sistemas de control inteligentes, a partir de arquitecturas fuzzy, como así también con arquitecturas neuronales. Los modelos bajo prueba se aplicaron a un sistema industrial de mezcla de caudales, donde las simulaciones realizadas mostraron resultados satisfactorios en ambas arquitecturas. La arquitectura

neuronal, cuyo desempeño es estrictamente numérico, fue trabajada con una nueva estrategia de generación de datos de aprendizaje —diferente a la configuración tradicional—, consistente en la implementación de un entorno reducido y dinámico de datos, que simplifica sustancialmente el proceso de entrenamiento. A publicarse en el libro del *VI Simposio Internacional de Investigación (en prensa)*.

Dentro del mismo contexto, también se han desarrollado simulaciones y pruebas con modelos de control más avanzados, en este caso controladores inteligentes híbridos. Dada la amplia variedad de modelos que pueden ser implementados, las primeras pruebas estuvieron orientadas a la hibridización de un modelo tradicional y un modelo inteligente, aplicado a un proceso industrial. Los resultados preliminares fueron prometedores, por lo que se sigue trabajando en esta línea. Resumen publicado en los anales de las *XIV Jornadas de Ciencia y Tecnología de Facultades de Ingeniería del NOA*.

En la publicación mencionada también están contenidos los siguientes trabajos directamente vinculados con los objetivos del proyecto: *Análisis comparativo de entornos numéricos gratuitos para simulación*; *Optimización de un tren contracorriente de unidades mezcladoras-decantadoras*, y *Propagación de errores en simulación estacionaria*.

En 2020, las especiales condiciones sanitarias han orientado a los investigadores de *IngProAr* a la investigación y desarrollo de un equipo especial; se trata de un equipo esterilizador eficiente de aire, diseñado particularmente para la esterilización de aire de un cuarto de aislamiento de un paciente con COVID-19. El equipo consta de un soplador, un economizador y una celda de calentamiento. El aire que ingresa al economizador es precalentado por el aire que egresa. La celda de calentamiento es la responsable de alcanzar la temperatura de esterilización. Para realizar el diseño, se desarrolló un modelo estacionario de simulación y se obtuvo la solución analítica. Los resultados de las simulaciones realizadas muestran que el equipo cumple con su objetivo y mantiene un bajo consumo de electricidad en el punto de diseño. El análisis de flexibilidad muestra que el desempeño del equipo sigue siendo satisfactorio cuando es sometido a condiciones diferentes a

las del punto de diseño. Este trabajo será publicado en el N°6 la revista *CODINOA (en prensa)*.

Los aspectos académico-docentes tampoco han sido descuidados durante el tiempo que lleva de ejecución este proyecto, como se ha contemplado en uno de sus objetivos secundarios.

Considerando que la emergencia sanitaria obligó a las universidades a adaptarse rápidamente al dictado remoto de emergencia. En un trabajo realizado sobre este tema, se presentó la experiencia de la cátedra *Simulación y Optimización*, del último año de la carrera Ingeniería Química que se dicta en la Facultad de Ingeniería de la UNJu. En ese trabajo, se analizaron todas las decisiones tomadas para implementar el dictado virtual de la materia, como así también el impacto que tuvieron esas decisiones en los resultados del dictado virtual. Este trabajo será publicado en el N°6 la revista *CODINOA*.

En otro trabajo, se analizó la incorporación del aula virtual al modelo pedagógico de la citada materia. Esta incorporación demandó un gran esfuerzo de la cátedra, pero los resultados de la experiencia fueron destacables. El análisis y descripción completa del proceso se puede conocer en libro *La Educación en Prospectiva. Prácticas Disruptivas mediadas por Tecnologías*, editado por RUEDA (Red Universitaria de Educación a Distancia Argentina) y la UNJu en 2020.

Finalmente, se desarrolló un sistema de asignación óptima de aulas para la toma de parciales para la asignatura *Introducción a la Informática* (primer año de las carreras de informática de la Facultad de Ingeniería de la UNJu). Esta materia cuenta con una matrícula promedio superior a 900 estudiantes, por lo que la organización de las evaluaciones es compleja. A fin de hacer más eficiente la organización de los exámenes parciales, se planteó un modelo matemático de optimización para minimizar la cantidad de aulas requeridas durante la evaluación, con lo que se logró reducir el tiempo de preparación y control preliminar de una hora a un poco más de cinco minutos. El planteo del modelo y la simulación del proceso se puede conocer en libro *La Educación en Prospectiva. Prácticas Disruptivas mediadas por Tecnologías*, editado por RUEDA y la UNJu en 2020.

4. FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS

El equipo de trabajo que forma el grupo de investigación *IngProAr* cuenta con profesores, auxiliares, graduados y pasantes de la Facultad de Ingeniería, quienes desarrollan diversas actividades en la formación de recursos humanos, durante la ejecución del proyecto. Particularmente, los docentes investigadores del grupo *IngProAr* están a cargo de diversas cátedras en distintas carreras de la Facultad de Ingeniería de la UNJu: *Simulación y Optimización de Procesos, Ingeniería de Procesos, Electricidad y Electrónica e Introducción a la Informática* —en Ingeniería Química—; *Métodos de Simulación, Inteligencia Artificial, Técnicas y Estructuras Digitales, Metodología de la Programación* —en Ingeniería Informática—; *Electrotecnia* en Ingeniería Industrial; *Geología Ambiental y Cartografía especial* en Ingeniería de Minas. Es de destacar que los contenidos de dichas materias están directamente vinculados con los temas considerados en este proyecto. Como actividades de formación de recursos humanos, se pueden destacar:

Tesis de posgrado

- Tarifa E. E., codirección de la tesis doctoral *Secado en lecho de chorro bidimensional para la deshidratación de proteínas del plasma y porción globina de sangre bovina*, Ing. Lara Valeria Lescano Farías, Directora: Dra. Eve Liz Coronel. Res. F.A.A. N°641/2013, UNSE.
- Tarifa E. E., dirección de la tesis doctoral *Control Inteligente con Algoritmos Híbridos Optimizados aplicados a Modelos de Procesos Productivos*, Ing. Sergio L. Martínez, Codirector: Dr. Juan P. Gruer (UNT), Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, UNT, Res. FACET 620/2017, desde may/2017.
- Tarifa E. E., dirección de la tesis doctoral *Diseño óptimo de un lecho fluidizado cónico para la inactivación y deshidratación del grano entero de soja*, Ing. Gustavo Salcedo, UNSE, beca doctoral de CONICET, desde abr/2020.

- Martínez S. L., dirección del trabajo final de especialización *Modelo de espacio de estados*, Dr. Enrique E. Tarifa, Facultad de Humanidades y Ciencias Sociales, UNJu, desde 2020.

Tesis de grado

- Martínez S. L., Dirección de la tesis de grado *Desarrollo de una Herramienta con Interfaz Gráfica para Implementación de Redes Neuronales Feedforward*. Tesista: David Llusco, codirector Ing. Jorge J. Gutiérrez, Carrera de Ingeniería Informática, UCSE-DASS, San Salvador de Jujuy. En ejecución.

5. BIBLIOGRAFÍA

1. Reay D., Ramshaw C.; Harvey A., *Process Intensification: Engineering for efficiency, sustainability and flexibility*. Butterworth-Heinemann, 2013.
2. Ramos W. B., Figueirêdo M. F., Brito K. D., Cianella S., Vasconcelos L. G. S., Brito R. P., Effect of Solvent Content and Heat Integration on the Controllability of Extractive Distillation Process for Anhydrous Ethanol Production, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 55 (43), pp 11315–11328, 2016.
3. Roy A., Srivastava P., Sinha S., Risk and reliability assessment in chemical process industries using Bayesian methods, *Reviews in Chemical Engineering*, 40(5), 479-499, 2014.
4. Kharrazi A., Kumar P., Saraswat C., Avtar R., Mishra B. K., Adapting Water Resources Planning to a Changing Climate: Towards a Shift from Option Robustness to Process Robustness for Stakeholder Involvement and Social Learnings, *Journal of Climate Change*, vol. 3, no. 2, pp. 81-94, 2017.
5. Santos M., Aplicaciones Exitosas de Control Inteligente a Casos Reales, *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, V0-0, pp. 1–8. 2011.
6. Sharma N., Gobbert M. K., A comparative evaluation of Matlab, Octave, FreeMat, and Scilab for research and teaching. Technical Report HPCF–2010–7, *UMBC High Perform-*

mance Computing Facility, University of Maryland, Baltimore County, 2010.