

Evaluación de factibilidad de mejoras empleando control predictivo basado en modelos en reactores de biodiésel

Por M. Gamalero¹, P. Luppi^{1,2} y M. Basualdo^{1,2,3*}

¹Facultad de Cs. Exactas Ingeniería y Agrimensura (UNR)

²CIFASIS (CONICET-UNR-AMU)

³Facultad Regional Rosario (UTN)

Introducción

Actualmente en Argentina funcionan veintiséis plantas productoras de biodiésel, la mayoría, ubicadas en la provincia de Santa Fe, cerca de Rosario, y el resto, distribuidas en diferentes provincias. Generalmente, reconocidas empresas de ingeniería venden las plantas de biodiésel con la característica de ser “llave en mano”. La mayoría de ellas cuenta solo con instrumentación mínima para su operación, por tanto se genera un interesante mercado consumidor de sistemas comerciales de control para estos procesos. Por otra parte, la actual crisis energética, tanto en Argentina como a nivel mundial, condujo a la aparición de un importante número de plantas productoras de biocombustibles que necesitan contar con tecnología adecuada para garantizar la calidad de sus productos. Esto implica una oportunidad de negocio interesante, y el rol de las universidades es generar recursos humanos aptos para responder a estas necesidades.

El presente trabajo consiste en el desarrollo de la ingeniería conceptual que permita delinear las etapas necesarias para generar un estudio de factibilidad y toma de decisiones sobre la tecnología a implementar en reactores de biodiésel. Esto implica desarrollar una metodología sistemática para definir qué módulos disponibles en los controladores comerciales resultarán más eficientes para alcanzar los objetivos propuestos. Para este fin, el empleo de herramientas computacionales como soporte para el diseño y ajuste de la mejor estructura de control resultan fundamentales. Los principales objetivos de un sistema de control son garantizar la calidad de los productos, maximizar beneficios económicos, preservar el medioambiente, la seguridad de las personas y de los equipos. Es decir, el diseño y tipo de estructura de control que se implemente debe ser capaz de mantener al proceso en un punto operativo rentable y seguro.

Por otra parte, la producción de biocombustibles, en especial de biodiésel, es un proceso

costoso y que requiere especial cuidado en el control de cada una de las etapas de obtención del mismo. Es una práctica habitual el uso de controladores convencionales como el PID, sin embargo los sistemas comerciales hoy ofrecen la oportunidad de incorporar otros controladores que mejoran notablemente el desempeño del comportamiento a lazo cerrado del sistema. En este contexto, se presentarán los ensayos preliminares realizados con diferentes estructuras de control sobre el reactor tales como *feedforward*, cascada, compensador de tiempo muerto (compensador Smith) y con particular énfasis, control predictivo basado en modelos (*Model Based Predictive Control, MPC*).

La primera etapa requiere disponer del modelo dinámico de un reactor de biodiésel que se implemente para simular los diferentes escenarios en que deberá funcionar. El concepto es que el mismo sea capaz de adaptarse a las condiciones operativas específicas de plantas con diferente capacidad operativa. Es importante explotar la ca-

pacidad de simulación que poseen los controladores comerciales para disponer de una herramienta eficiente para la toma de decisiones. Se mostrarán los resultados alcanzados empleando plataformas académicas de diseño y su posterior configuración en el controlador comercial PCS7 de Siemens.

Formulación del modelo matemático dinámico de un reactor de biodiésel

La construcción del modelo dinámico riguroso que aquí se presenta se basó en los datos experimentales presentados por Benavides y Diwekar (2012). Se formula a través de un balance de masa total, por componentes y de energía. Teniendo en cuenta que el biodiésel se obtiene a partir la transesterificación de los triglicéridos de aceite vegetal y metanol con un catalizador alcalino siguiendo el siguiente esquema de reacciones que permiten formular el balance de masa por componentes. En la figura 1 se muestra un esquema general del reactor tipo tanque agitado continuo con camisa de calefacción.

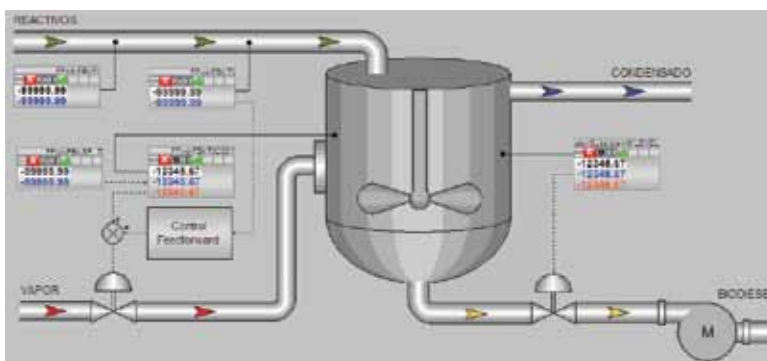
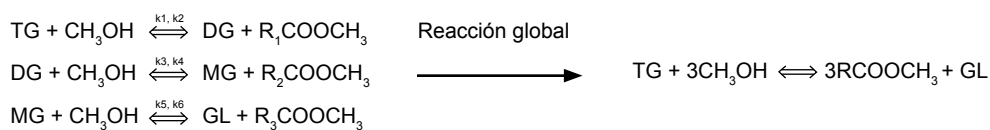


Figura 1:
esquema del reactor
de biodiésel

Esto genera un conjunto de ecuaciones diferenciales que se implementaron con programación en bloque primeramente en la plataforma del software de simulación Matlab/Simulink desarrollado por la empresa Mathworks. Una vez validado el modelo se implementa en el software de simulación disponible en la plataforma de PCS7 de SIEMENS. Esta potente herramienta presenta librerías que permiten implementar las ecuaciones diferenciales provenientes de la formulación del modelo riguroso del reactor. La herramienta PLCSim de Siemens (simulador de controlador lógico programable) es la que permitió simular el proceso bajo estudio. Las respuestas obtenidas mediante ambos programas comerciales fueron completamente coincidentes. En la figura 2 se presenta un esquema de implementación con ambos programas.

En la práctica, la variable objetivo a controlar es la concentración de salida del reactor de biodiésel. Sin embargo, la medición en línea de concentraciones suele presentar ciertos inconvenientes. En ciertos casos la medición de

temperatura puede presentar una buena correlación concentración/temperatura dentro del reactor (T) y resulta una buena opción como variable a controlar. Para el ajuste de controladores *feedback* convencionales se aplicó el método basado en la teoría de control por modelo interno, conocido por sus siglas en inglés IMC (*Internal Model Control*) basado en el trabajo de D. Rivera. En este caso particular la función de transferencia aproximada entre la temperatura en el reactor y flujo de vapor que va a la camisa corresponde a un sistema primer orden con retardo. Por otra parte el PCS7 posee su propio procedimiento de ajuste denominado *“autotuning”* que permite realizar el ajuste robusto del controlador.

Todos los procesos reales se encuentran afectados por perturbaciones externas que impactan en mayor o menor medida en las variables que se desean controlar. Cuando éstas pueden medirse, es factible de aplicar una estructura de control *feedback-feedforward*. El objetivo es compensar la perturbación antes de que llegue a afectar a la variable controlada.

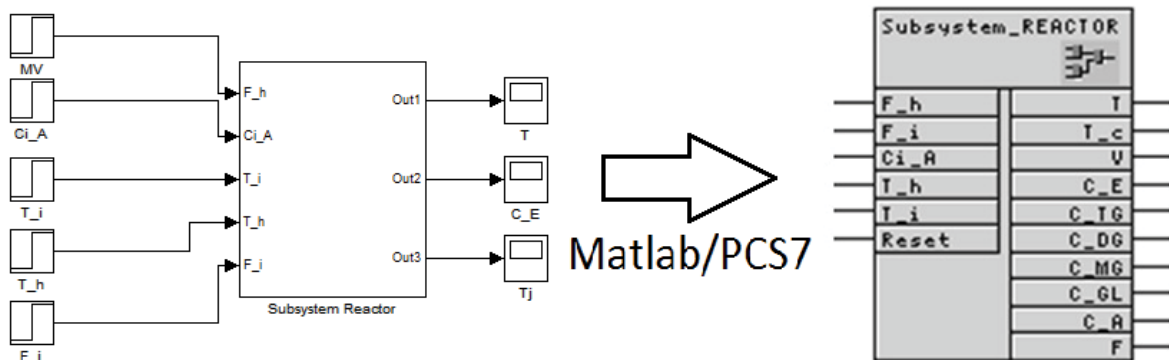


Figura 2: formulación del modelo en ambos programas

Para ello, apenas se produce la perturbación, el módulo *feedforward* debe adicionar cambios sobre la variable manipulada para rechazar la perturbación y que la salida del sistema no sufra cambios significativos. Al aplicar esta estructura de control sobre el reactor, se obtuvieron notables beneficios comparados con la estructura *feedback* convencional en el momento de atenuar el efecto que producen dichas perturbaciones. No obstante el *feedforward* requiere medir las perturbaciones y además, la obtención de un modelo de función de transferencia para calcular la componente que debe adicionarse a la variable manipulada. Otra alternativa eficiente para el rechazo de perturbaciones es la implementación del control en cascada. Este requiere definir un proceso primario y uno secundario (esclavo), que recibe del controlador principal la señal de *set point*. El objetivo del lazo secundario es atenuar el efecto de las perturbaciones que afectan mayormente al subproceso menos importante antes de que llegue a afectar significativamente la variable de salida de mayor peso. El control en cascada también presentó excelentes resultados comparativamente con la respuesta del sistema controlado con *feedback* tradicional considerando perturbaciones en la temperatura del vapor de calefacción de la camisa.

En el caso particular del MPC, fue concebido en la década de los '70 para dar solución al control de plantas químicas y de potencia aunque actualmente puede encontrarse en diversas otras áreas. Se trata de un algoritmo que computa una secuencia temporal discreta de las variables manipuladas con el fin de optimizar el

comportamiento futuro de la planta a controlar gracias a que posee un modelo de la misma. MPC se caracteriza por hacer uso explícito de un modelo para predecir la salida del proceso en futuros instantes de tiempo delimitado por un horizonte de predicción. El cálculo de las señales de control generalmente las realiza minimizando una cierta función objetivo. Se trata de una estrategia deslizante, de forma que en cada instante el horizonte se va desplazando hacia el futuro, lo que implica aplicar la primera señal de control en cada instante y desechar el resto, repitiendo el cálculo en cada período de muestreo. Debe destacarse que aún en Argentina no se han detectado un gran número de aplicaciones industriales de MPC.

Análisis comparativo mediante implementaciones computacionales

En esta sección se presentan los resultados comparativos obtenidos al aplicar una estructura con control convencional retroalimentado versus la misma con el agregado de una estructura de tipo *feedforward*. Análogamente, se incluyen los resultados para una estructura en cascada. Finalmente se detallan y evalúan los resultados de aplicar MPC. Se adoptó como índice indicativo del mejor desempeño la integral del error absoluto, IAE.

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$

En las tablas 1 y 2 se presentan los resultados comparativos de las diferentes estrategias de control ensayadas.

	IAE
Feedback tradicional	31.54
Feedback-Feedforward	3.557

Tabla 1: Comparación frente a un escalón de perturbación de +1% en la temperatura con que ingresan los reactivos al reactor

	IAE
Feedback tradicional	65,56
Cascada	2.899

Tabla 2: Comparación frente a un escalón de perturbación de -1% en la temperatura con de ingreso del flujo de vapor de calefacción

La etapa más importante del diseño del MPC es la realización del test de planta para la obtención del modelo mediante técnicas de identificación como se muestra en la figura 3.

Resultados de aplicación del MPC obtenidos vía simulación dinámica

Una vez que se ha programado y configurado la estructura del control MPC, se realizaron los ensayos pertinentes utilizando una herramienta que incorpora el software de Siemens, llamada PLCSim.

En un primer ensayo se estudió la respuesta del MPC utilizando una estructura que le permite controlar la temperatura en el interior del reactor y se la comparó con la implementación de un controlador *feedback* convencional con el mismo fin, ante un cambio de *set point*. En la figura 4 se presenta una captura de pantalla de PCS7 donde se evidencian las ventajas de incluir un esquema avanzado de control.

Luego se consideraron otras pruebas donde la variable controlada es la concentración de biodiésel. En este caso, el tiempo muerto que

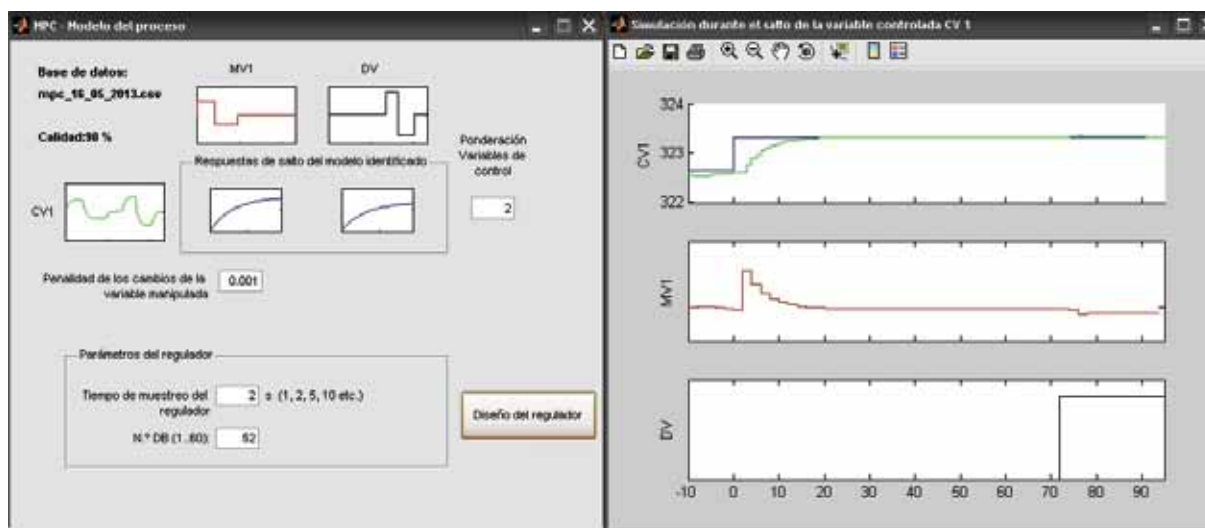


Figura 3: Identificación del modelo para MPC

introduce el instrumento que mide esta variable provoca que la respuesta del controlador, en la estructura clásica de control, sea lenta. El MPC, incorpora esta información en su modelo matricial y ejecuta los movimientos en la variable manipulada necesarios para llevar al sistema donde el *set point* le indique. En la figura 5 se aprecia cómo mejora la respuesta del sistema ante un cambio de *set point* de concentración comparando MPC y control convencional aplicados al modelo del reactor de biodiésel.

Conclusiones

En este trabajo se ha presentado una metodología para el diseño de estructuras de control avanzado sobre reactores de biodiésel dada la importancia económica y estratégica que revisten en la actualidad. La técnica presenta una primera etapa que es generalmente conocida por los estudiantes de Ingeniería Electrónica. Esto es, realizar todas las pruebas preliminares del diseño de controladores vía simulación dinámica del reactor a lazo cerrado

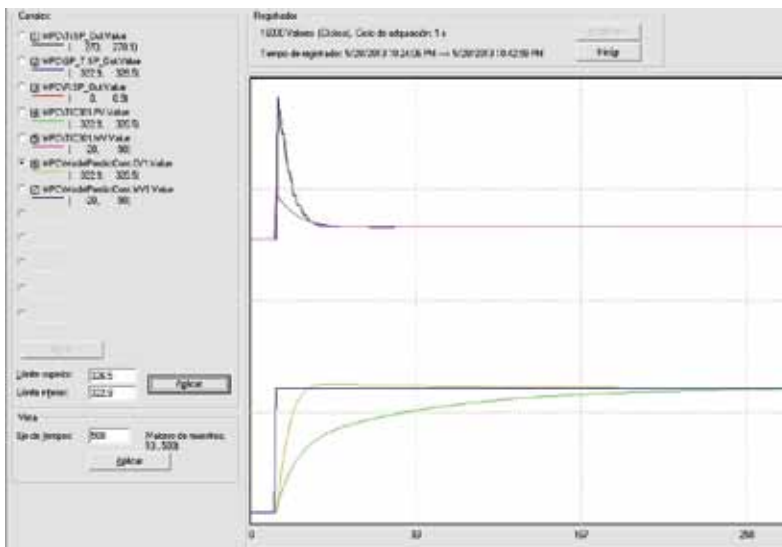


Figura 4: Variable controlada (abajo) y manipulada (arriba) del sistema ante cambio de *set point* de temperatura de +1%

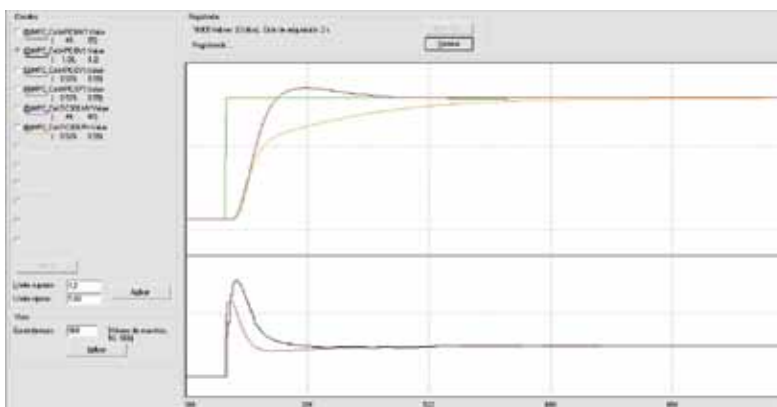


Figura 5: Variable controlada (arriba) y manipulada (abajo) del sistema ante un cambio de *set point* C_e de +1%

empleando el programa Matlab/Simulink. Se consideró que una adecuada interacción con las herramientas que suponen los controladores comerciales que se encuentran hoy en el mercado resultaría una estrategia didáctica valiosa. Por otra parte, se forman recursos humanos altamente capacitados en el manejo de tecnologías claves para mejorar el desempeño de los procesos de gran interés industrial. En tal sentido se prosiguió con el estudio de los manuales de implementación de esquemas de control avanzado tradicional aptos para el rechazo de perturbaciones como el *feedforward* y cascada. Los resultados demuestran una clara ventaja al incorporarlos a la estructura *feedback* convencional. Además, se enfatizó muy especialmente el análisis del control predictivo. Dado que se requiere la obtención de modelos para su diseño, el modelo riguroso del reactor jugó un papel importante como proceso virtual sobre el cual experimentar. Esta técnica no es novedosa para las empresas dedicadas a control avanzado pero sí lo es como metodología didáctica para nuestros futuros ingenieros de control. Más allá que efectivamente se puede demostrar la superioridad del desempeño alcanzado por el control avanzado también se dispone de una secuencia de pasos que constituyen un servicio profesional jerarquizado y con amplias posibilidades de inserción en el mercado laboral. Esta propuesta se pudo llevar a cabo gracias a que la empresa Siemens de Argentina nos concedió el equipamiento de PCS7 para el Laboratorio de Control de la carrera de Ingeniería Electrónica de la Facultad de Ingeniería de la Univer-

sidad Nacional de Rosario. Esta propuesta le permitió al Sr. M. Gamalero, alumno avanzado de la mencionada carrera, ser merecedor de una beca TIC que otorga el FONSOFT perteneciente a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) por presentar un proyecto tecnológico en áreas de interés. Los tutores de este proyecto final son el Ing. P. Luppi y la Dra. M. Basualdo.

Los autores agradecen a las instituciones FCElyA-UNR, CIFASIS (CONICET), UTN FRRo y ANPCyT y a la empresa Siemens de Argentina por el apoyo brindado para realizar este trabajo.

- Referencias
- Benavides P. T y U. Diwekar (2012). "Optimal control of biodiesel production in a batch reactor Part I: Deterministic control" Revista Fuel N° 94 pp.211–217.
- D. Rivera (2007). Una metodología para la identificación integrada con el diseño de controladores IMC-PID. RIAI Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, 4(4):5/18.

•
*contacto: basualdo@cifasis-conicet.gov.ar