

# Emulación de una columna de destilación binaria continua para propósitos de formación en control

---

## Emulation of Binary Continuous Distillation Column for Training Purposes in Control

**DIEGO FERNANDO FRANCO-OCAMPO**

M.Sc.

Universidad del Valle

diego.franco@correounivalle.edu.co

Cali, Colombia

**EDINSON FRANCO-MEJÍA**

Ph.D.

Universidad del Valle

edinson.franco@correounivalle.edu.co

Cali, Colombia

*Fecha de recibido: 31/10/2014*

*Fecha de aceptado: 13/04/2015*

*Forma de citar/How to cite:* FRANCO-OCAMPO, Diego y FRANCO-MEJÍA, Edinson. Emulación de una columna de destilación binaria continua para propósitos de formación en control. Rev. UIS Ingenierías, 2015, vol. 14, no 2, p.p. 7-17.

DOI: <http://dx.doi.org/10.18273/revuin.v14n2-2015002>



### RESUMEN

La emulación o simulación en tiempo real en los procesos de enseñanza-aprendizaje o para el desarrollo de investigaciones en diseño de controladores permite la experimentación controlada sin disponer del sistema real. Este artículo presenta la emulación de una de las operaciones más importantes en procesos de plantas químicas: las columnas de destilación. El desarrollo del emulador es realizado a partir del modelo de la columna en una plataforma de aplicación en tiempo real basada en Linux, compuesta por los proyectos RTAI, RTAI-Lab y RTAI-XML. En la emulación se obtiene la respuesta de la composición del producto bajo perturbaciones en la alimentación. Los resultados de las emulaciones son comparados con los resultados de las simulaciones obtenidas en MATLAB y muestran que la respuesta de la composición a cambios en las entradas o cambios en las perturbaciones se acerca a la respuesta obtenida con la simulación en MATLAB.

**PALABRAS CLAVE:** Emulación, Columnas de destilación binaria, Control tiempo real, Educación en control, Plataforma.

### ABSTRACT

The emulation and real-time simulation in the teaching and learning processes or the development of process control research, allows controlled experimentation without having the real system. This paper shows the emulation of one of the most significant operations in chemical plant operations: distillation columns. The emulator development is performed on the columns model in an application platform based on real-time Linux composed of RTAI, RTAI-Lab, and RTAI-XML projects. In response, emulation product composition under disturbances in the supply is obtained. Emulation results are compared with the simulation results obtained in MATLAB and show that the response of change composition inputs or the perturbation changes are close to the response obtained with MATLAB simulation.

**KEYWORDS:** Emulation, Binary Distillation Columns, Real-Time, Control Education, Platform.

## 1. INTRODUCCIÓN

Para los procesos de enseñanza-aprendizaje o para el desarrollo de investigaciones en control de procesos tecnológicos industriales, como por ejemplo los generadores de vapor y columnas de destilación, se presenta la dificultad de experimentación debido a la indisponibilidad total o parcial del sistema real; *e.g.* para el diseño del control, para observar la respuesta del mismo ante cambios paramétricos o ante perturbaciones, o para operar el sistema en regiones de riesgo resulta impráctico por los altos costos de la experimentación sobre el sistema real e incluso por la posibilidad de poner en riesgo las vidas humanas.

Para el desarrollo académico en instituciones de educación superior es común implementar plantas prototipo o procesos reales en laboratorios de universidades o centros de investigación, pero estas opciones también representan altos costos. Lo anterior se ha tratado y hace parte de diversas reflexiones sobre la educación en ingeniería de control y los reportes correspondientes: *e.g.* (Antsaklis et al., 1999), contiene las reflexiones del “NSF/CSS Workshop on New Directions in Control - Engineering Education”, mientras que (Kheir et al., 1996) presenta una visión general sobre la educación en los sistemas de control en ingeniería y ofrece ideas sobre el papel importante de este campo en la formación de futuros ingenieros, considerando relevante el tema de laboratorios en el proceso de formación, el papel de la simulación en el mismo y las ventajas que ofrece la simulación en tiempo real. Esto ha mostrado que una tendencia importante en el campo de la práctica de la ingeniería de control es el aumento del empleo de sistemas de simulación y de instrumentos virtuales (Dormido, 2004).

La emulación (simulación en tiempo real) de un proceso permite la experimentación controlada y evita incurrir en los altos costos y riesgos mencionados. Por otra parte, para el desarrollo académico en instituciones de educación superior es importante que los estudiantes puedan validar sus trabajos y diseños relacionados con el tema.

La columna de destilación (CD) es considerada como una de las operaciones más importantes en ingeniería química y en el estudio del control de procesos. Skogestad hizo una revisión crítica de la literatura sobre dinámica y control de columnas de destilación hasta 1991 (Skogestad, 1997). Por otra parte, en (Truong et al., 2010) se revisan algunas de las técnicas de modelado y simulación de una CD y se describe un modelo para una CD continua binaria a escala de laboratorio. En este documento se presenta la emulación de una columna de destilación binaria (CDB).

En las últimas dos décadas se encuentran trabajos que emplean la simulación convencional para analizar el comportamiento de CD. Entre otros trabajos, se tienen los siguientes: ‘Planteamiento de la importancia de la simulación como una herramienta académica en la enseñanza de los problemas de control real’ (Basualdo, 1995); ‘La simulación dinámica y control difuso de CD’ (Arbildo López et al., 2002), y ‘Desarrollo de un modelo de simulación por computador integrando el diseño de la dinámica de fluidos con la descripción fisicoquímica clásica de la destilación (Gorrinoa et al., 2002).

Una revisión de la bibliografía existente sobre emulación de CD —simulación en tiempo real— entrega información limitada. Se encuentra más información referente a otros tipos de procesos, lo que muestra que es un área abierta para el desarrollo de investigaciones. En (Chang et al., 2008) se exponen las ventajas de la simulación en tiempo real frente a la simulación convencional en una aplicación sobre el estudio de armónicos en sistemas de potencia industriales.

Una técnica de modelado basado en Control *Fuzzy* para la emulación de sistemas de generación de energía eléctrica con celdas de combustible es presentada por (Ramos-Paja et al., 2009). Asimismo, (Ramos-Paja et al., 2011) presentan un emulador de celdas de combustible donde evalúan la conmutación y los estados de potencia, diseñado para probar dispositivos y cargas destinadas a interactuar con prototipos reales.

La simulación en tiempo real se ha convertido en una herramienta de apoyo y su implementación con fines académicos ha ganado fuerza, por lo que algunos trabajos plantean su relevancia. Por ejemplo, (Dixit et al., 2009), establece su importancia en el diseño de sistemas electrónicos de potencia, especialmente en el contexto de la simulación de *Hardware in the Loop* (HIL), pero dirigen el trabajo hacia la implementación en un laboratorio de educación, presentando en forma clara los componentes que en su consideración requiere en términos generales un ambiente de simulación en tiempo real.

(Carvalho et al., 2010) presentan el desarrollo de una plataforma como un recurso para la enseñanza de la ingeniería de control. Esta plataforma combina el potencial educativo del *software* de diseño y simulación de sistemas de control con la conexión de este *software* y una columna de destilación real de laboratorio, que realiza simulación y no emulación. Asimismo, diseñan un experimento basado en la teoría constructivista y el interaccionismo social para detectar el desarrollo del estudiante y capturar sus impresiones respecto del estudio con la plataforma.

(Téllez-Anguiano et al., 2009) presenta el desarrollo de un Sistema Interfase de Control de Procesos (PCIS) para una planta piloto de destilación basado en el protocolo de comunicación Modbus.

Otra implementación que utiliza una columna de destilación real a escala con fines académicos es propuesta por (Huyck et al., 2014), quienes utilizan un modelo de control predictivo en línea y controladores automáticos. Los últimos ejemplos implican altos costos a nivel de *Hardware* y *Software*.

Desde este contexto, en este documento se presenta la emulación de una columna de destilación binaria continua sobre una plataforma experimental, partiendo del modelo matemático, con la posibilidad de experimentar cambios en los parámetros que permitan analizar el comportamiento en estado estable sin disponer de la columna original.

El documento está estructurado de la siguiente manera: en la sección 2 se presentan una síntesis y un modelado matemático de la columna de destilación binaria utilizada en la emulación; en la sección 3 se presentan el diseño y la implementación; en la sección 4 se muestran los resultados de la emulación y en la sección 5 se presentan las conclusiones y observaciones finales.

## 2. MODELADO DE LA COLUMNA DE DESTILACIÓN BINARIA

Un diagrama esquemático de la columna de destilación se presenta en la figura 1. El flujo de alimentación entra en el plato  $i$ . Dentro de la columna el líquido empieza a deslizarse de platos superiores a inferiores. Esta a su vez contiene un flujo de vapor en contra de la dirección del líquido teniendo así una transferencia de materia, dando como resultado la evaporación del componente más ligero y la condensación del componente más pesado (Schmitz, 1999). De acuerdo a la ubicación del alimento en la columna, esta se divide en dos zonas principales: zona de despojamiento o agotamiento y zona de enriquecimiento o rectificación (Truong et al., 2010). En la primera zona se requiere extraer el componente más volátil para evitar pérdidas en la corriente que se retira en el fondo de la columna conocida con el nombre de “fondos”.

El vapor de la cima de la columna se condensa en un condensador total (todo el producto de tope se condensa), de manera que el destilado es recuperado en fase líquida y se divide generalmente en dos corrientes: reflujo y destilado.

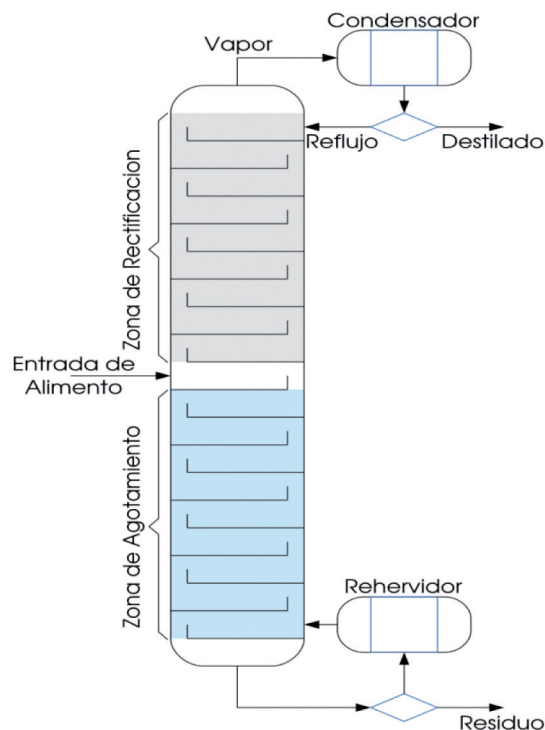


Figura 1. Configuración general de una columna de destilación.

El rehervidor se encarga de entregar la energía térmica al proceso para la vaporización de la mezcla y de esta forma realizar la separación de los componentes. Para el desarrollo del emulador se escogió el modelo de columna Tipo A planteada por Skogestad Postlethwaite (1996).

### 2.1. Suposiciones y consideraciones

Dada la complejidad que representa el modelado completo del proceso, se establecieron las siguientes suposiciones y consideraciones:

- Separación binaria.
- Flujos molares constantes.
- Volatilidad relativa constante.
- Presión constante a lo largo de la columna.
- Dinámica de flujo de líquido linealizada.
- Todos los flujos de entrada y salida de la torre se encuentran en estado líquido.
- La alimentación se hace a través de un solo plato.
- Equilibrio vapor-líquido y perfectamente mezclada en todas las etapas.
- No hay retención de vapor.

- Condensador total (no hay retención de vapor en el condensador).

Las ecuaciones del modelo se presentan en las siguientes subsecciones.

## 2.2. Balance total de materia en la etapa 'i'

Es la primera ecuación que se describe, la cual, cuando no hay reacciones químicas, puede expresarse en unidades molares. El balance total de masa en el plato  $i$  es:

$$\frac{dM_i}{dt} = L_{i+1} - L_i + V_{i-1} \quad (1)$$

Donde:

$M_i$  es la retención de líquido en la plato  $i$  (líquido residual) en Kmol.

$L_i$  es el flujo de líquido que sale del plato  $i$  en Kmol/min.

$V_i$  es el flujo de vapor que sale del plato  $i$  en Kmol/min.

$L_{i+1}$  es el flujo de líquido procedente del plato superior en Kmol/min.

$V_{i-1}$  es el flujo de vapor procedente del plato inferior en Kmol/min.

## 2.3. Balance de materia para el componente ligero en el plato $i$

La ecuación que representa el balance del componente  $i$  es:

$$\frac{dM_i x_i}{dt} = L_{i+1} x_{i+1} + V_{i-1} y_{i-1} - L_i x_i - V_i y_i \quad (2)$$

Donde:

$x_i$  es la fracción molar del componente ligero en el líquido en la etapa  $i$  (composición molar).

$y_i$  es la fracción molar del componente ligero en el vapor en la etapa  $i$  (composición molar).

Lo cual da la siguiente expresión para la fracción molar de líquido:

$$\frac{dx_i}{dt} = \frac{\left( \frac{dM_i x_i}{dt} - x_i \frac{dM_i}{dt} \right)}{M_i} \quad (3)$$

## 2.4. Ecuaciones algebraicas

Asumiendo equilibrio vapor-líquido en cada etapa, la relación de equilibrio que existe entre las concentraciones de fase líquida y vapor se calcula a partir de la ecuación algebraica de equilibrio vapor-líquido:

$$y_i = \frac{\alpha x_i}{1 + (\alpha - 1)x_i} \quad (4)$$

Donde  $\alpha$  es la volatilidad relativa.

Asumiendo flujos molares constantes y la no existencia de dinámica de vapor, se tiene la expresión para los flujos de vapor,

$$V_{NF} = V_{NF-1} + (1 + q_F)F \quad (5)$$

$$V_i = V_i - 1 \quad (6)$$

Los flujos de líquido dependen de la retención de líquido en la etapa superior y el flujo de vapor bajo la siguiente relación:

$$L_i = L_{O_i} + \frac{M_i - M_{O_i}}{\tau_i} + (V - V_{O_{i-1}}) * \lambda \quad (7)$$

Donde:

$L_{O_i}$  [Kmol/min] es el valor nominal de reflujo y

$M_{O_i}$  [Kmol] es el valor nominal de la retención en la etapa  $i$ .

## 2.5. Etapa de alimentación

$i = NF$ , se asume que la alimentación es mezclada directamente en el líquido de la etapa de alimentación.

### 2.5.1. Balance de masa global y balance por componente

$$\frac{dM_i}{dt} = L_{i+1} - L_i + V_{i-1} - V_i + F \quad (8)$$

$F$  es el flujo molar de alimentación (tasa de flujo de alimentación).

### 2.6. Balance de masa por componente

$$\frac{dM_i x_i}{dt} = L_{i+1} x_{i+1} + V_{i-1} y_{i-1} - L_i x_i - V_i y_i + F z_F \quad (9)$$

Donde:

$z_F$  la composición molar de alimentación (concentración del componente ligero en la alimentación).

## 2.7. Condensador total

$$i = NT (M_{NT} = M_D, L_{NT} = L_T) \quad (10)$$

### 2.7.1. Balance de masa global

$$\frac{M_i}{dt} = V_{i-1} - L_i - D \quad (11)$$

Donde:

$M_i = M_D$ , es la masa molar retenida en el condensador.

$V_{i-1} = V_{NT-1}$ , el flujo de vapor que entra al condensador.

$L_i = L_{NT}$ , el flujo molar de líquido que recircula a la columna.

$D$  es el flujo molar de destilado.

### 2.7.2. Balance de masa por componente

$$\frac{dM_i x_i}{dt} = V_{i-1} y_{i-1} - L_i x_i - D x_i \quad (12)$$

Donde:

$x_i = x_D$  es la composición molar de destilado.

$y_{i-1} = y_{NT-1}$  es la composición molar de vapor.

### 2.8. Rehervidor

$$i = 1 (M_i = M_B, V_i = V_B = V) \quad (13)$$

#### 2.8.1. Balance de masa global

$$\frac{M_i}{dt} = L_{i-1} - V_i - B \quad (14)$$

Donde:

$M_i = M_B$  masa molar retenida en el rehervidor.

$B$  flujo molar de fondos.

#### 2.8.2. Balance de masa por componente

$$\frac{dM_i x_i}{dt} = L_{i+1} x_{i+1} - V_i y_i + B x_i \quad (15)$$

Donde:

$M_i = M_B$  masa molar retenida en el rehervidor.

$B$  flujo molar de fondos.

$x_i = x_B$  composición molar de fondos.

$y_i = y_B$  composición molar de vapor.

$V_0$ : flujo de vapor nominal (sólo se requiere si lambda es diferente de cero).

$V_0$ : flujo de vapor nominal (encima del plato de alimentación).

$LT$ : reflujo.

$VB$ : flujo de vapor en el rehervidor.

$D$ : flujo de producto del destilado (tope).

$B$ : flujo de producto en el fondo.

$F$ : flujo de alimentación.

$ZF$ : composición de la alimentación.

$qF$ : fracción de líquido en la alimentación.

$x_i$ : composición inicial en cada etapa.

$M_i$ : retención inicial en cada etapa.

En las tablas 1 a 4 se describen los valores de las variables con los que puede trabajar el emulador, para realizar con base en ellos las simulaciones necesarias.

Tabla 1. Variables Internas

Variable	Valor	Unidad
$NT$	$5 \leq NT \leq 50$	UN
$NF$	$3 \leq NF \leq NT - 2$	UN
$\alpha$	1.5	
$M_{0_i}$	0.5	Kmol/min
$\tau_i$	0.063	min
$\lambda$	0	
$L_0$	2.706	Kmol/min
$L_{0_b}$	Función de $L_{0_b}$	Kmol/min
$V_0$	320.629	Kmol/min
$V_{0_i}$	Función de $V_0$	Kmol/min

## 3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

Establecido el modelo de la columna de destilación, se definen las variables involucradas y se realiza el diseño del programa que permite emular la columna de destilación.

### 3.1. Variables involucradas en la emulación

$NT$ : número de platos incluidos el rehervidor y el condensador total.

$NF$ : plato de alimentación.

$\alpha$ : volatilidad relativa.

$M_{0_i}$ : retención nominal.

$\tau_i$ : constante de tiempo para la dinámica de flujo de líquido en cada etapa (excepto el rehervidor y el condensador).

$\lambda$ : constante por efecto del flujo de vapor sobre el flujo de líquido.

$L_0$ : flujo nominal de reflujo (de los datos de estado estable).

$L_{0_b}$ : flujo nominal de líquido (debajo del plato de alimentación).

Tabla 2. Entradas

Variable	Valor	Unidad
$L_T$	2.706	Kmol/min
$V_B$	3.206	Kmol/min
$D$	< 0,5	Kmol/min
$B$	< 0,5	Kmol/min

Tabla 3. Perturbaciones

Variable	Valor	Unidad
$F$	1	Kmol/min
$Z_F$	$0,1 \leq Z_F \leq 0,9$	Fracción molar
$q_F$	1	Fracción molar

### 3.2. Diseño e implementación

La emulación de una columna de destilación binaria se desarrolla con la Plataforma RTAI (Real Time Applica-

Tabla 4. Condiciones iniciales

Variable	Valor	Unidad
$x_i$	$0,5 \leq x_i \leq 1$	Fracción molar
$M_i$	$0,5 \leq M_i \leq 1$	Kmol/min

tion Interface), interface de aplicaciones en tiempo real para Linux CMSimple\_XH (2014). Esta plataforma está compuesta por tres sistemas:

- Un Kernel Linux modificado con los módulos RTAI.
- El Proyecto RTAI-Lab, que es una cadena de herramientas para convertir diagramas de bloques en ejecutables RTAI (compilar y ejecutar en tiempo real). Los diagramas de bloques se pueden desarrollar utilizando Scilab / SCICOS (Open Source) o MATLAB / Simulink / RTW (comercial). Proporciona la paleta de bloques para Simulink y SCICOS.
- El Proyecto RTAI-XML que permite monitorear y comunicarse con el proceso que se encuentra en ejecución en la plataforma, a través de la aplicación jRTAI-Lab.

Para realizar el diseño del emulador de la columna de destilación binaria se requiere el diseño de un diagrama de bloques que puede ser desarrollado en SCICOS o en SIMULINK, a partir del cual se genera un código fuente en lenguaje C compatible con la plataforma RTAI. Para el emulador, el diagrama se realizó en SCICOS. En forma general, el procedimiento a seguir para generar una aplicación ejecutable en la plataforma RTAI a partir de SCICOS está compuesto por las siguientes etapas:

### 3.2.1. Diseño del diagrama de bloques

En esta etapa se construye el diagrama de bloques que representa el proceso a emular (figura 2). Para construirlo se pueden usar, además de los bloques de uso general de SCICOS, los bloques especiales proporcionados por la paleta RTAI-Lab para SCICOS listados a continuación:

- *Sine*: genera una señal senoidal de amplitud y frecuencia variables.
- *Scope*: funciones de osciloscopio.
- *Square*: permite generar una señal cuadrada.
- *Step*: genera una señal escalón.
- *C RTAI Block*: permite ingresar código en lenguaje C definido por el usuario.

- *Bloques COMEDI*: permiten comunicarse con hardware externo a través de los drivers COMEDI.

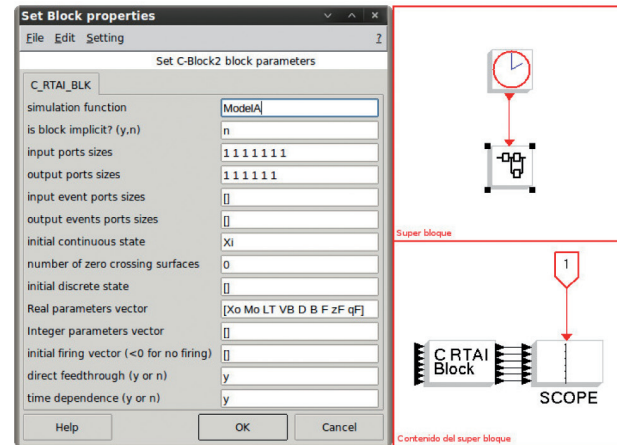


Figura 2. Diagrama de bloques del emulador columna de destilación binaria.

Debe tenerse en cuenta que para la columna de destilación, por tratarse de un proceso altamente no lineal y que no puede representarse mediante bloques de función de transferencia, se requiere el uso de un bloque que permita el ingreso de código definido por el usuario (user-defined), para tal efecto en la paleta RTAI-Lab se encuentra el bloque “C RTAI Block”. Como su nombre lo indica este bloque permite usar código escrito en lenguaje C y debe cumplir con el estándar ANSI C, ajustarse al diagrama de flujo mostrado en la figura 3 y a la siguiente estructura:

```
#include <math.h>
#include <stdlib.h>

#ifdef MODEL
#include <scicos/scicos_block4.h>
#endif

void toto(scicos_block *block, int flag) {

    //1. Declaración de variables adicionales requeridas en
    // el programa (opcional)
    //2. Declaración de punteros para acceder a las funciones
    // de scicos_block4.h:
    // - GetRparPtrs(block): Accede al vector de parámetros
    // de tipo real (decimales)
    // - GetIparPtrs(block): Accede al vector de parámetros
    // de tipo entero
    // - GetRealInPortPtrs(block, n): Accede a las entradas
    // del bloque, n indica el número de la entrada
    // - GetState(block): "Accede a las variables de estado"
    // - GetDerState(block): "Accede a las derivadas de
    // las variables de estado"
    // - GetOutPortPtrs(block, n): Accede a las salidas del
    // bloque, n indica el número de la salida

    //3. Inicialización de las variables adicionales definidas
    //en < 1. >

    //4.
```

```

if (flag == 4) {
    //Inicialización de las variables de estado "y otras
    //variables internas del programa" (ejecutado una
    //sola vez al iniciar la emulación)
}

if (flag == 0) {
    //Cálculo de las derivadas de las variables de estado
    //(ejecutado periódicamente durante el tiempo de
    // emulación)
}

if (flag == 1) {
    //Actualización de las salidas (ejecutado "periódica
    //mente? o una sola vez al finalizar el tiempo de
    //emulación?"
}
}

```

### 3.2.2. Parametrización del modelo

Se puede realizar de tres formas: definiendo las variables requeridas dentro del código fuente si se trata de un modelo definido en un “C RTAI Block”; enlazando un archivo de ScicosLab (con extensión .sce) a través de la función “Context” de Scicos y las propiedades del bloque C RTAI Block; ubicando bloques de tipo “Constant”.

Los parámetros internos de la columna son definidos en el código. Las entradas y perturbaciones (las cuales pueden modificarse en el transcurso de la emulación) se ingresan a través de un archivo de ScicosLab en el caso de las emulaciones de estado estacionario o a través de bloques “Constant” y “Step” en las emulaciones de estrategias de control.

### 3.2.3. Configuración del target

Etapa en la cual se ajusta el “solver” o rutina de solución del sistema de ecuaciones. En ScicosLab/Scicos se dispone de las siguientes rutinas:

- ode1: método numérico de Euler (Runge Kutta de primer orden).
- ode2: método de Heun o método de Euler modificado (Runge Kutta de segundo orden).
- ode4: Fórmula Runge Kutta de cuarto orden.

Además, en la etapa de configuración se ajusta el tiempo de muestreo, este tiempo es un valor crítico para la ejecución del proceso en la plataforma RTAI, puesto que un tiempo de muestreo muy alto puede llevar a respuestas erróneas e indeterminaciones por parte de la rutina de solución del sistema de ecuaciones. Por otro lado, cuanto más bajo sea el tiempo de muestreo, mayor será la carga de trabajo y consumo de recursos (memoria RAM y porcentaje de CPU) para la plataforma durante la ejecución del proceso, llevando incluso a la imposibilidad de ejecutar dicho proceso por falta de recursos en el computador.

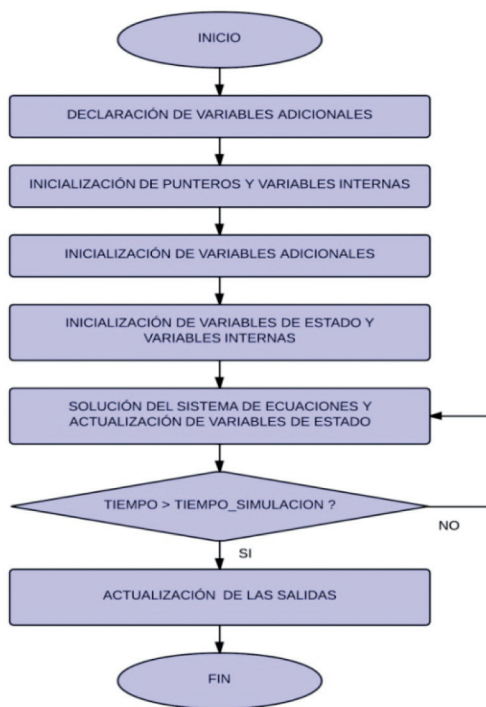


Figura 3. Diagrama de flujo.

### 3.2.4. Generación y compilación del código

Se genera y compila el código compatible con RTAI a partir del diagrama con la herramienta RTAI-CodeGen.

## 4. RESULTADOS

La columna de destilación binaria se emuló empleando una plataforma de emulación en tiempo real compuesta por los proyectos RTAI, RTAI-Lab y RTAI-XML. Los resultados se comprobaron con simulaciones obtenidas en MATLAB y Simulink, y, se contrastan los resultados del sistema de emulación con datos experimentales de una columna de destilación binaria de un ingenio azucarero.

Se realiza un conjunto de pruebas. Se lleva a cabo la simulación utilizando MATLAB y Simulink para valores diferentes de la composición de la alimentación y obtener la respuesta en la concentración de ligero o composición en el tope (Destilado), composición en el plato de alimentación y composición en el rehervidor. Por otra parte, los datos experimentales obtenidos de la columna de destilación real entregan la composición en el tope y composición en el fondo, los cuales se contrastan con los obtenidos del sistema de emulación.

Las gráficas de respuesta generadas por jRTAI-Lab están desplazadas 0,01 unidades hacia arriba con respecto

a las de MATLAB, debido a que se superponen y no permitirían una observación clara.

#### 4.1. Conjunto de pruebas I

Se realizó la emulación (en jRTAI-Lab) y simulación (en MATLAB) para obtener la concentración de ligero o composición en el tope (Destilado), composición en el plato de alimentación y composición en el rehervidor, variando  $ZF$  (Composición de la alimentación en fracción molar), en los siguientes tres casos:  $ZF = 0,5$  (inicial) y  $ZF = 0,3$ , y bajo las condiciones o valores de los parámetros dados en las tablas 5 a 7.<sup>1</sup>

Tabla 5. Parámetros de la columna, Par: parámetro.

Par.	Valor	Par.	Valor
$N_T$	41	$q_{F_o}$	1
$N_F$	21	$L_O$	2.7
$M_O$	0.5	$L_{O_b}$	$L_O + q_{F_o} * F_O$
$\alpha$	1.5	$\lambda$	0
$\tau_l$	0.063	$V_O$	3.2
$F_O$	1	$V_{O_i}$	$V_{O_i} + (1 - q_{F_o}) * F_O$

Tabla 6. Entradas y perturbaciones de la columna.

Entrada	Valor	Perturbación	Valor
$L_T$	2.7	$F$	1
$V_B$	3.2	$z_F$	0.3 - 0.5
$D$	0.3 - 0.5	$q_F$	1
$B$	0.5		

Tabla 7. Composiciones y retenciones iniciales.

Composición	Valor	Retención	Valor
$x_0$	0.5	$M_O$	0.5

Analizando los datos y resultados obtenidos en la figura 4, se encuentra que la respuesta de la composición en el condensador, rehervidor y el plato de alimentación tiene la misma tendencia en jRTAI-Lab y en MATLAB, con un error porcentual máximo del 3 % durante los primeros 10 minutos en la respuesta de la composición en el rehervidor, siendo cada vez menor dicho error (obteniendo error del 0.02 %) en la medida que la respuesta se estabiliza. Además, se observa que el error es menor en las respuestas de la composición en el plato de alimentación y en

<sup>1</sup>ZF: Composición de la alimentación (fracción molar del componente ligero)

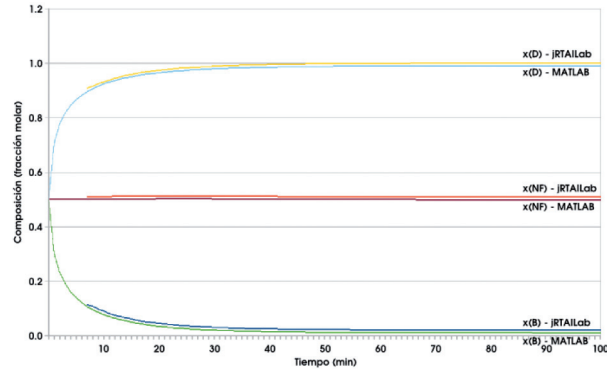


Figura 4. Respuesta de composiciones en el condensador, rehervidor y plato de alimentación. Para  $NT = 41, D = 0,5, B = 0,5, F = 1, ZF = 0,5$ . jRTAI-Lab y MATLAB.

el destilado frente a las respuestas correspondientes en MATLAB.

Desde el punto de vista físicoquímico, se presenta el mismo comportamiento de la repuesta que se espera en un proceso real, con una composición de destilado por encima de 0.9 (fracción molar) una vez se ha estabilizado y un producto de fondos por debajo de 0.03 (fracción molar).

Pruebas adicionales muestran que al cambiar el flujo de fondos  $B = 0,3$ , la tendencia de ambas respuestas sigue conservándose; sin embargo, al inicio de la gráfica, aproximadamente hasta los 25 minutos, se presenta una diferencia en los datos de la composición de fondos con un error porcentual promedio de 4.5 %. A partir de allí, la diferencia se reduce sustancialmente presentándose un error porcentual de 0.4 %. En la composición de tope los datos son más cercanos entre si desde el inicio de la simulación con un error máximo de 2 %.

Cuando el flujo de destilado cambia a  $D = 0,3$ , se encuentra que el comportamiento de la respuesta es similar al caso anterior, pero se observa que la diferencia que se presenta en los datos para la composición en el fondo es más pronunciada al comienzo (durante los primeros 25 minutos) con un error porcentual de 10 %. Sin embargo, a partir de allí la diferencia es cada vez menor con un error porcentual promedio de 0.2 %. De igual forma, es menor el error en las respuestas en la composición de la alimentación y destilado.

Si la variación se hace en el flujo de alimentación, con  $F = 1,01$ , la respuesta mantiene la tendencia similar a los dos casos anteriores (Figuras 4 y 5) en cuanto a la variación que se presenta en la composición de fondos.



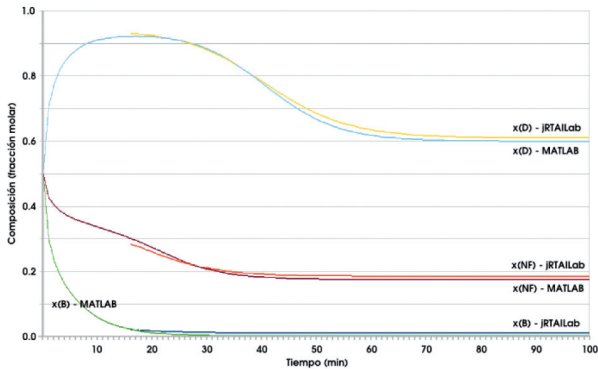


Figura 5. Respuesta de composiciones en el condensador, rehervidor y plato de alimentación.

Si el cambio ahora se hace a  $ZF = 0,3$  (figura 5), la evolución de las gráficas es la misma, observándose que las diferencias fuertes se presentan al inicio, con un desfase de aproximadamente 10 minutos y un error máximo del 10% (al inicio). Una vez se estabiliza, los resultados en jRTAI-Lab y MATLAB son muy cercanos presentando un error porcentual de 0.3% para la composición en el plato de alimentación y de 0.5 a 1% en el destilado.

La respuesta de la composición en este caso (figura 5), es diferente al caso anterior (figura 4), presentándose una caída de la composición en el destilado y en fondos debido a que inicialmente cada plato tiene una composición determinada y posteriormente se cambia la alimentación de la columna a un valor más bajo ( $ZF$  pasa de 0.5 a 0.3), lo cual significa que el componente ligero que hay inicialmente en la columna se evapora muy rápidamente y no se alcanza a compensar con la tasa de alimento (entrada), por lo cual la composición de salida también debe disminuir en el comportamiento físicoquímico propio de la columna; cayendo de 0.9 a 0.6 (fracción molar) en el caso del destilado y, aunque normalmente el producto de fondos es bajo, al disminuir la alimentación de la columna, éste debe caer aún más, llegando en este caso a 0.01 (fracción molar).

Al realizar la simulación y emulación para  $ZF = 0,7$  y se encuentra que al aumentar la alimentación, la composición en el tope se incrementa aún más porque hay mayor cantidad de componente ligero que se puede evaporar dentro de la columna. La respuesta del destilado crece de nuevo como ocurre en el proceso de una columna de destilación real. En este caso no se presenta el desfase que existe para  $ZF = 0,3$  y la evolución es la esperada con un error porcentual máximo del 3.5%

en la composición de fondos. El error es menor en la respuesta de la composición de destilado (0.01%) y en la del plato de alimentación desde 2% hasta 0.1% cuando alcanza el estado estable.

#### 4.2. Conjunto de pruebas2

Se realizan las mismas pruebas con los datos que se presentan en la Tabla 5 pero ahora cambia el número de platos ( $N_T = 22$ ) y el plato de alimentación ( $N_F = 11$ ). Variando  $ZF$  (fracción molar):  $ZF = 0,5$  y  $ZF = 0,3$ .

Se puede observar que la tendencia de las respuestas es similar al caso con  $NT = 41$  etapas. Sin embargo, las diferencias al inicio son mayores para  $NT = 22$ , aunque a medida que el sistema se estabiliza el error porcentual es menor (figuras 6 y 7). Las diferencias se deben principalmente a las características de la plataforma (*software*):

- Precisión del método que utiliza la máquina para resolver el sistema de ecuaciones del modelo.
- El tiempo de muestreo es un valor crítico para la ejecución del emulador en la plataforma RTAI.

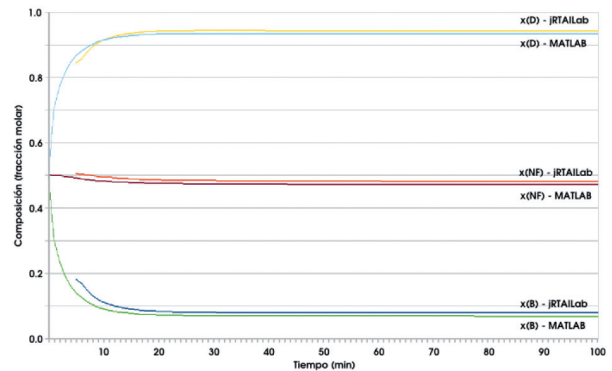


Figura 6. Para  $NT = 22, D = 0,5, B = 0,5, F = 1, ZF = 0,5$ , jRTAI-Lab y MATLAB

#### 4.3. Datos experimentales y sistema de emulación

El número de platos de la columna de destilación binaria del ingenio azucarero es  $NT = 52$ , por lo que se realiza la emulación en el sistema planteado con este mismo número de platos para contrastar este resultado con los datos reales. Las figuras 8 y 9 muestran la respuesta de la composición (Destilado y fondo) de la columna real y del sistema emulador (jRTAI-Lab) respectivamente, a partir de los datos tomados minuto a minuto.

Los datos reales y de simulación para  $NT = 52$  platos, se tomaron durante 60 minutos.

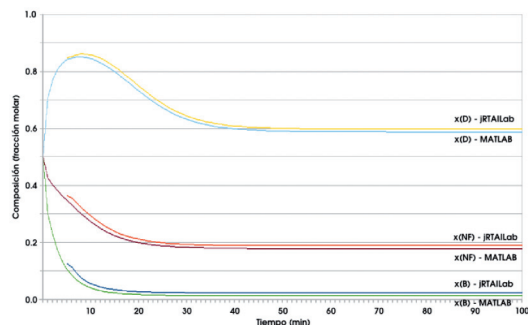


Figura 7. Respuesta de composiciones en el condensador, rehervidor y plato de alimentación. Para  $NT = 22, D = 0,5, B = 0,5, F = 1, ZF = 0,3$ . jRTAI-Lab y MATLAB.

Comparando los datos y resultados obtenidos en las figuras 8 y 9, se encuentra que la respuesta de la composición en el destilado y en fondo (rehervidor) tiene la misma tendencia en el sistema real y el emulador. En este caso, el error porcentual máximo es de 4 % en la respuesta de la composición del destilado y menor al 1 % en la composición de fondos.

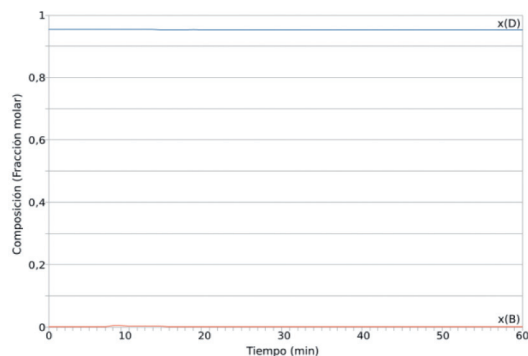


Figura 8. Respuesta de composición en el condensador y rehervidor. Para  $NT = 52, ZF = 0,5$ . Columna real.

No se realiza comparación de la composición en el plato de alimentación debido a que en la columna real se mantiene aproximadamente en un valor y este dato no se toma en las muestras de laboratorio del ingenio azucarero que ha facilitado los datos.

Debe ser claro por obvias razones que las empresas no siempre facilitan toda la información del proceso especialmente de algunos parámetros.

## 5. CONCLUSIONES

Se diseñó un emulador para ser utilizado principalmente para el desarrollo académico como recurso de expe-

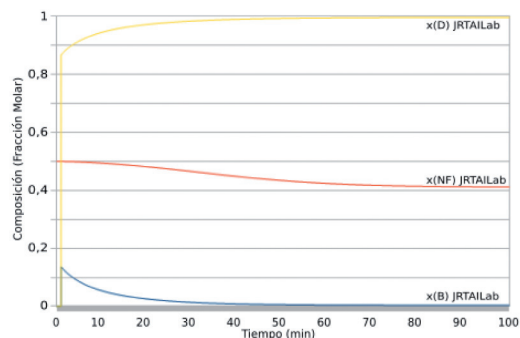


Figura 9. Respuesta de composición en el condensador y rehervidor. Para  $NT = 52, ZF = 0,5$  jRTAI-Lab.

rimientación, cuya importancia radica en que permite introducir cambios en el proceso en tiempo ejecución; en una simulación no es posible hacerlo de esta forma.

Además, se destaca el hecho de haber sido desarrollado usando herramientas de *software* libre ya que no se encuentran desarrollos sobre emulación de columnas de destilación utilizando este tipo de *software*. Se encuentran trabajos alrededor de otros tipos de aplicaciones que proponen la emulación de procesos como la destilación de plantas petroquímicas, pero estos utilizan *software* muy específico y de alto costo.

El comportamiento satisfactorio del emulador se comprobó mediante la realización de simulaciones en tiempo real, teniendo la respuesta dinámica esperada y muy aproximada a la obtenida de una columna real y de las simulaciones resultado de trabajos de autores muy respetados en el estudio y control de columnas de destilación. La solución demostró una efectividad adecuada en la emulación del sistema abordado, generando una herramienta útil para estudiar sistemas de control.

Se diseñó un método para la emulación de columnas de destilación binarias continuas, como un aporte académico resultado del desarrollo del emulador. Se proyecta seguir con la implementación de la emulación de una columna de destilación industrial para lo que se está realizando actualmente el modelado de una planta en el sector azucarero.

## 6. REFERENCIAS

Antsaklis, P.; Basar, T.; Decarlo, R.; McClamroch, H.; Spong, M.; Yurkovich, S. Report on the NSF/CSS Workshop on New Directions in Control Engineering Education. *Control Systems, IEEE*, 19, 53–58, 1999. doi:10.1109/MCS.1999.793442.

Arbildo López, A.; Lombira Echevarría, J.; Osario López, I. Simulación dinámica y control difuso de una columna de destilación continua. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Químico*, 5, 47–57, 2002.

Basualdo, M. S. Dynamic Simulation of Chemical Process as a Tool to Teach “The Real Problem” of Identification and Control. En *Frontiers in Education Conference, 1995. Proceedings.* (pp. 1–4). Atlanta, GA: IEEE, 1995. doi:10.1109/FIE.1995.483123.

Chang, G.; Liu, Y.; Dinavahi, V.; Ke, M. Applications of Real-Time Simulation Techniques for Harmonics Study of Industrial Power System. En *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century* (pp. 1–5). Pittsburgh, PA: IEEE, 2008. doi:10.1109/PES.2008.4596633.

CMSimple\_XH RTAI - Real Time Application Interface Official Website., 2014. URL: <https://www.rtai.org/>.

Dixit, V.; Patil, M.; Chandorkar, M. Real Time Simulation of Power Electronic Systems on Multi-core Processor. En *Power Electronics and Drive Systems, International Conference on* (pp. 1524–1529). Taipei: IEEE, 2009. doi:10.1109/PEDS.2009.5385756.

Dormido, S. Control Learning: Present and Future. *Annual Reviews in Control*, Wiley, 28, 115–136, 2004. doi:10.1016/j.arcontrol.2003.12.002.

Gorrinoa, J. P.; Arias, P. L.; Legarreta, J. A. Simulation Model to Optimize Distillation Processes. *Chemical Engineering Communications*, 189, 448–470, 2002.

Huyck, B.; De Brabanter, J.; De Moor, B.; Van Impe, J. F.; Logist, F. Online model predictive control of industrial processes using low level control hardware: A pilot-scale distillation column case study. *Control Engineering Practice*, 28, 34–48, 2014. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066114000872>. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2014.02.016>.

Kheir, N.; Aström, K.; Auslander, D.; Cheok, K.; Franklin, G.; Masten, M.; Rabins, M. Control Systems Engineering Education. *Automatica*, 2, 147–166, 1996.

Ramos-Paja, C.; Romero, A.; Giral, R.; Vidal-Idiarte, E.; Martinez-Salamero, L. Fuzzy Based Modelling Technique for PEMFC Electrical Power Generation Systems Emulation. *Power Electronics, IET*, 2, 241–255, 2009.

Ramos-Paja, C.; Romero, A.; Giral, R.; Vidal-Idiarte, E.; Martinez-Salamero, L., L.; Sanchez, C. I. Switching and Linear Power Stages Evaluation for PEM Fuel Cell Emulation. *International Journal Of Circuit Theory And Applications*, 39, 475–499, 2011. doi:10.1002/cta.651.

Skogestad, S. Dynamics and Control of Distillation Columns – A Critical Review. *Modeling, identification and control*, 18, 177–217, 1997.

Skogestad, S.; Postlethwaite, I. *Multivariable Feedback Control. Analysis and Design.* (2a ed.). West Sussex, England: Jhon Wiley and Sons, Ltd., 1996.

Téllez-Anguiano, A.; Rivas-Cruz, F.; Astorga-Zaragoza, C.-M.; Alcorta-García, E.; Juárez-Romero, D. Process Control Interface System for a Distillation Plant. *Computer Standards & Interfaces*, 31, 471–479, 2009. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920548908000895>. doi:10.1016/j.csi.2008.06.007.

Truong, H.; Ismail, I.; Razali, R. Fundamental Modeling and Simulation of a Binary Continuous Distillation Column. En *Intelligent and Advanced Systems (ICIAS), International Conference on* (pp. 1–5), 2010.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está enmarcado en el proyecto de investigación: “Identificación, modelado y control del proceso

planta piloto de destilación para producción de alcohol carburante” (2674) financiado por la vicerrectoría de investigaciones de la Universidad del Valle. Adicionalmente, los autores agradecen los valiosos aportes al Ingeniero Daniel Ruiz Olaya, M.Sc. y al Tecnólogo en Electrónica Luis Didier Arias Osorio por sus valiosos aportes para la implementación del emulador.

## 8. CURRICULUM

**E. Franco-Mejía**, Ingeniero Electricista (1991), Magister en Automática (1994) y Doctor en Ingeniería con énfasis en Ingeniería Eléctrica (2007) de la Universidad del Valle. Se desempeñó como profesor catedrático en las Universidades ICESI, San Buenaventura y Autónoma de Occidente, como consultor en Automatización y Control, como Director del Programa de Posgrados en Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle (2009-2013). Actualmente es Profesor Titular de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle y Director del Laboratorio de Automática de la misma institución. Sus áreas de interés son: tecnologías para Control de Sistemas dinámicos y Educación en Control. (e-mail:edinson.franco@correounivalle.edu.co).

**D. F. Franco-Ocampo**, Ingeniero Electricista (1996), Especialista en Automatización Industrial (2009), Magister en Ingeniería con énfasis en Automática (2014) de la Universidad del Valle, fue coordinador del Programa Académico de Tecnología en Electrónica de la Universidad del Valle-Sede Tuluá (2001-2004) y actualmente se desempeña como coordinador del Programa Académico de Tecnología en Electrónica de la Universidad del Valle-Sede Buga (2004-2015), como profesor auxiliar de la Universidad del Valle (1996 - 2015) y como profesor catedrático de la Universidad Central del Valle (2011 - 2015), (diego.franco@correounivalle.edu.co).