



**TECNOLÓGICO  
DE MONTERREY.**



**TECNOLÓGICO  
DE MONTERREY.**

**BIBLIOTECA**  
Campus Ciudad de México

# **Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey**

**Campus Ciudad de México**

**División de Ingeniería y Arquitectura**

*Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones*

**Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica**

## **Laboratorio Virtual de Control de Procesos**

**Autores:** Eric Salazar Herrera  
Ignacio Mora Rosas  
Ernesto Alejandro Flores Aguirre



**Asesores:** M.C. Marco Antonio Paz Ramos  
Dr. Ricardo Fernandez Del Busto

**Profesor:** Dr. Jorge Eduardo Brieva

México D.F., diciembre de 2005

# Índice

1	Introducción.....	3
2	Problemática .....	4
3	Objetivo .....	5
4	Metodología.....	7
5	Estado del Arte .....	9
5.1	Laboratorio Virtual en el UPM .....	9
5.2	Herramientas Virtuales.....	10
5.3	En búsqueda de la experimentación Virtual en Tiempo Real.....	10
5.4	Acercamiento a nuestros objetivos - <i>Visión a Futuro de los LV</i> .....	11
6	El Laboratorio Virtual .....	12
6.1	Acerca de LabVIEW .....	12
6.2	Sistema Propuesto .....	12
7	Marco Teórico .....	14
7.1	Robot de Soldadura por Arco .....	14
7.2	Tres Reactores Isotérmicos.....	15
7.3	Reactor No Isotérmico.....	16
7.4	Columna de Destilación Binaria. ....	18
7.5	Sistema de Frenado ABS.....	19
7.6	Planta Termoeléctrica de Combustible Fósil. ....	21
7.7	Sistema Evaluador.....	24
7.8	Algoritmos Genéticos.....	25
8	Avances y Resultados .....	28
8.1	Robot de Soldadura por Arco .....	28
8.2	Tres Reactores Isotérmicos en Serie .....	30
8.3	Reactor No Isotérmico.....	32
8.4	Columna de Destilación.....	35
8.5	Sistema de Frenado ABS.....	38
8.6	Planta Termoeléctrica de Combustible Fósil .....	39
8.7	Sistema Evaluador.....	41
8.7.1	Primer sistema propuesto .....	41
8.7.2	Conclusiones del Primer sistema.....	46
8.7.3	Segundo sistema propuesto .....	47
8.8	Algoritmo genético para encontrar parámetros del evaluador difuso. ....	48
8.8.1	Generación aleatoria de Población Inicial .....	49
8.8.2	Operador de Selección .....	49
8.8.3	Reproducción .....	50
8.8.4	Mutación .....	51
8.8.5	Evaluación.....	52
8.9	Interfaz gráfica con generación de reportes.....	53
8.10	El Sistema de Envío de Resultados .....	56
9	Conclusiones.....	59
10	Trabajo futuro .....	61
11	Bibliografía .....	62

# 1 Introducción

Actualmente debido a la composición de los programas impartidos en el Tecnológico de Monterrey, el acercamiento de los alumnos al control de procesos es limitado. Por otro lado una importante fracción del mercado de control es precisamente el control de procesos. Para ampliar las oportunidades de los egresados de ingenierías afines al control, es fundamental fortalecer la presencia de este rubro. Los simuladores son una parte esencial en el entrenamiento de operadores en plantas nucleares, plantas de procesos y navegación. A través de la construcción de simuladores interactivos se puede fortalecer el proceso de enseñanza-aprendizaje, incluso mas allá del ámbito académico. El presente proyecto de ingeniería propone la construcción de una plataforma de simulación que pueda ser operada desde Internet por múltiples usuarios, que permita el contacto del alumno con procesos como los que hallaría en la industria, a través de una interfaz gráfica del tipo utilizado en los sistemas SCADA. Con la realización de dicha plataforma se prevé el entrenamiento del alumno en el análisis y diseño de conjunto determinado de estrategias de control. Además se pretende que el funcionamiento del sistema obedezca las guías de una estrategia educativa, compatible al contexto de los cursos de control impartidos en el campus y a los cuales se prevé acoplar este proyecto una vez finalizado.

## **2 Problemática**

Actualmente el alumno de materias relacionadas al control de procesos podría tener problemas para vincular la teoría y la práctica. El acceso por parte del alumno a plataformas de simulación de control de procesos podría fortalecer dicho vínculo.

Por otro lado el control de procesos representa una gran área de oportunidad para los alumnos recién egresados y al día de hoy el acercamiento a esta área en las materias de control es limitado.



## **3 Objetivo**

Diseñar y construir una plataforma de simulación de control de procesos que contemple las siguientes características:

- **Acceso de los usuarios a través de Internet**

Los usuarios, tanto profesores como alumnos, serán provistos con una aplicación que permita la conectividad permanente a través de cualquier conexión a Internet. Esto representa flexibilidad absoluta para la práctica y evaluación de diferentes tareas, exámenes o actividades que se presenten a lo largo del curso en el que se aplique.

- **Estructura que permita la evaluación del usuario a través de un sistema inteligente.**

El sistema se apoyará en una red difusa y en una serie de ejemplos previamente diseñados para evaluar al alumno cuando realice alguna actividad indicada por el profesor de la materia, entregando a este último una calificación generada por un evaluador gracias a la formación de una superficie de evaluación basada en soluciones correspondientes a los ejemplos ya mencionados.

- **Capacidad de registro de información y comunicación con el usuario.**

La utilización de LabVIEW hace posible guardar registro de cada movimiento realizado en el laboratorio virtual permitiendo con esto que se genere una base de datos que contenga información de los alumnos que han utilizado el sistema ya sea para practicar o para realizar alguna actividad sugerida por el profesor. Esta base de datos permitirá conocer la calificación de cada alumno y su registro de usuario con el cual se podrá generar automáticamente el envío de un e-mail directamente desde LabVIEW conteniendo tanto los resultados generados por la respuesta del alumno como la calificación asignada por el sistema.

- **Interfaz gráfica interactiva**

La interfaz gráfica permitirá tener un panel de control amigable, en el que se puedan controlar las variables del sistema y que simule el panel de control físico de una planta. Se cuenta con dispositivos como perillas, interruptores, indicadores de nivel, termómetros, LEDs, graficadores, entre muchos otros.

- **Escalabilidad**

Es parte esencial del proyecto el estar preparado para crecer conforme las necesidades didácticas o cotidianas, ya que el avance tecnológico requiere que los egresados estén cada vez mejor preparados y apoyados por herramientas de vanguardia. Por lo anterior el Laboratorio será fácilmente escalable y actualizable.

## 4 Metodología

A continuación se presentan los pasos a seguir en la realización de nuestro proyecto:

**Simulación de los procesos en Matlab.** Actividad que fue fundamental por dos razones: a) Matlab es un paquete computacional que conocemos bien y con el que estamos familiarizados, por lo cual podemos trabajar rápidamente con la simulación de las plantas y comprenderlas, para después traducirlas al lenguaje de LabVIEW, y b) al trabajar con dos herramientas diferentes podemos comparar los resultados finales y así validar que se está trabajando correctamente o en su defecto medir y encontrar el error, para así corregirlo.

Las figuras 1 y 2, muestran la efectividad del proceso que se siguió a lo largo de todas las simulaciones.

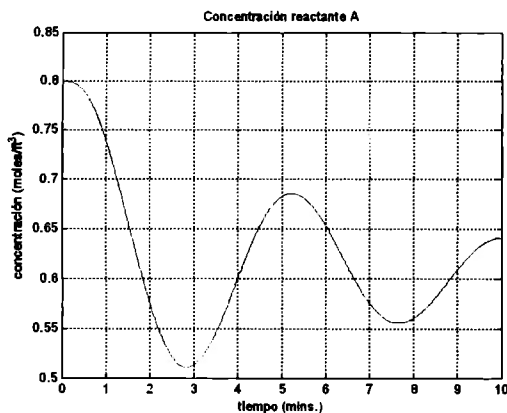


Figura 1: Respuesta de la simulación de tres reactores isotérmicos en Matlab.

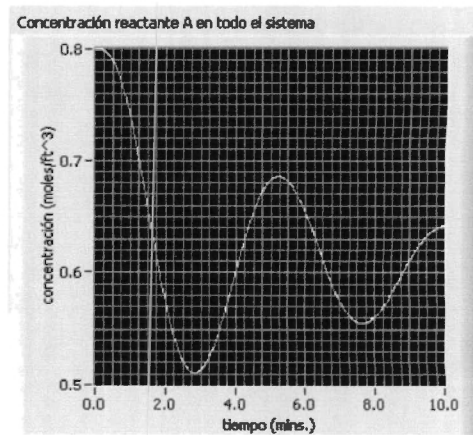


Figura 2: Respuesta de la simulación de tres reactores isotérmicos en LabVIEW.

**Diseño e implementación en LabVIEW.** Se realiza por medio de diferentes herramientas que permiten explorar los alcances del software y la flexibilidad de programación que ofrece. Las plantas simuladas pueden ser tratadas por diferentes métodos numéricos o de control de acuerdo a su naturaleza. La Tabla 1 muestra la herramienta con la que fue programada cada una de las plantas.

<b>PROCESO</b>	<b>Método Numérico</b>	<b>Método de Integración</b>	<b>Herramienta de LabVIEW Utilizada</b>
<b>Tres reactores isotérmicos en serie</b>	Ecuaciones Diferenciales	Euler	Utilería Convencional
<b>Reactor no isotérmico</b>	Ecuaciones Diferenciales	Euler	Utilería Convencional
<b>Soldadura por arco</b>	Frecuencia	-	Control Tool Box
<b>Frenos ABS</b>	Frecuencia (Discreta)	-	Simulation Tool Box
<b>Columna de destilación binaria</b>	Ecuaciones Diferenciales	Euler	Utilería Convencional
<b>Planta termoeléctrica de combustible linealizada</b>	Frecuencia	-	Simulation Tool Box
<b>Válvula de Diafragma</b>	Frecuencia	-	Utilería Convencional

Tabla 1: Estrategias y herramientas utilizadas en los procesos.

**Diseño del evaluador.** Se utilizaron los conocimientos adquiridos en el campo de la lógica difusa para este diseño. Esto se realizó por medio del desarrollo matemático de las variables involucradas en la estimación de una calificación.

**Desarrollo de la interfaz con Internet.** LabVIEW es una herramienta con una amplia gama de posibilidades. Entre ellas esta la opción de convertir a la computadora que lo contiene en un servidor que flexibiliza la utilización de una licencia del producto. Así, para convertir a cada proceso en una aplicación web independiente basta con ubicarla en un servidor y realizar su conversión a aplicación HTML. LabVIEW genera automáticamente un path que contiene la dirección IP del ordenador con la aplicación y el nombre de acceso que siempre corresponde al nombre del VI programado.

## **5 Estado del Arte**

En la búsqueda de acercar a los estudiantes de Ingeniería a procesos reales de control se presenta la necesidad de analizar la posibilidad de realizar simuladores o laboratorios virtuales que permitan dicho acercamiento. Para ello es necesario conocer el estado actual de proyectos similares y esto es lo que a continuación se presenta.

### **5.1 Laboratorio Virtual en el UPM**

Actualmente existen proyectos en vía de creación o aceptación en el área académica, este es el caso de la Universidad Politécnica de Madrid, donde por medio del programa de simulación para ingeniería eléctrica y electrónica LabVIEW se intenta realizar el control de motores mediante técnicas de lógica difusa.

“La técnica de diseño Optimo Adaptativo permite el cambio de los parámetros de un regulador para poder adaptarse a las variaciones de la dinámica de un motor, y así obtener en todo momento los resultados deseados, donde se penalizan los efectos adversos que se desean controlar por medio de una función de coste.

La finalidad de este trabajo en la UPM es que la respuesta del sistema de control en lazo cerrado formado por una planta cambiante y un regulador (controlador) sea exactamente igual a la respuesta fijada por un modelo de referencia” [WEB01].

Si bien es cierto la propuesta del proyecto propuesto en la Universidad de Madrid por Agustín Rodríguez entre otros es enfocado al control didáctico, también es cierto que redundando en las actividades más comunes del control estudiantil, es decir, el control de motores de Corriente directa.

## **5.2 Herramientas Virtuales**

Existen instrumentos virtuales para la experimentación en el campo de los procesos de control como una necesidad surgida en algunas universidades. Estos Instrumentos pueden ser descargados gratuitamente o bien accedidos desde cualquier punto y en cualquier momento.

El concepto de laboratorio virtual permite a los alumnos acceso continuo a la puesta a punto de experimentaciones hipotéticas y esto se comienza a convertir rápidamente en algo factible debido a las tecnologías de sistemas basados en la red INTERNET [OVE99]. Actualmente los métodos de simulación o laboratorios virtuales han creado una visión limitada del alcance de una simulación en tiempo real.

Las universidades utilizan herramientas apoyadas por procesadores de alta velocidad para la simulación de sistemas de control y los estudiantes reciben la información final mediante una ventana de computadora. Esto se ha convertido en todo un paradigma debido a que los estudiantes no son expuestos a los pasos reales de un experimento, por esto se pierde gran parte de la funcionalidad de los sistemas actuales de simulación [OVE99]. Esto se da al grado de generar la idea de que no hay necesidad de comprar instrumentos comúnmente utilizados en los experimentos típicos y el mantenimiento no es costoso.

## **5.3 En búsqueda de la experimentación Virtual en Tiempo Real**

La principal preocupación para la creación de laboratorios virtuales (LV) es la falta de alumnos con actividades que los aproximen más a la realidad de un experimento. Así la finalidad funcional de un LV es que "el experimento pueda correr por un tiempo preestablecido mientras que, al mismo tiempo, una respuesta es almacenada en un servidor informático. Así cuando el experimento se ha terminado el servidor transmite toda la información recabada en un archivo (podría ser encriptado) a un cliente o usuario remoto.

El usuario después observará la respuesta, afinará la estructura del controlador y los parámetros no lineales, para después repetir el proceso hasta obtener la respuesta deseada.

Debido a que esta interfase será sostenida por un servidor independiente a Internet pero funcional en este último, no es susceptible a retrasos por interrupciones de la Red mundial. El acceso *worldwide* es solo la llave para ingresar a un trabajo local de investigación y experimentación.

Este es un modelo ya propuesto en más de una ocasión y un diagrama que describe actualmente las situaciones de los laboratorios de control y que dicta de una u otra forma uno de los posibles caminos a seguir en la realización de este tipo de proyectos se muestra en la Figura 3.

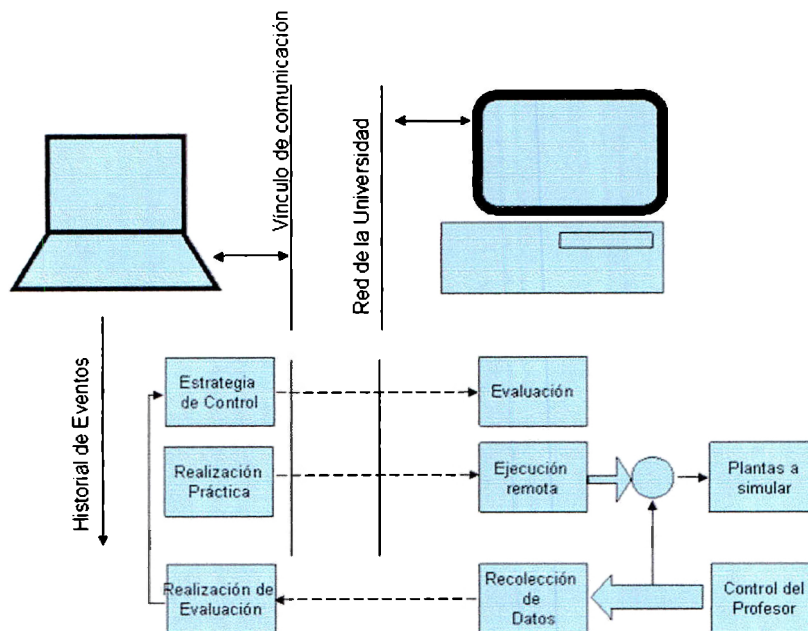


Figura 3: Esquema práctico experimental de acceso remoto.

#### 5.4 Acercamiento a nuestros objetivos - *Visión a Futuro de los LV*

Las tendencias indican que los laboratorios virtuales están cada vez más cerca de convertirse en una realidad unificada para los estudiantes de la ingeniería de control. Prueba de esto es que la limitación de software más apropiado no ha detenido a aquellos que buscan un acercamiento con la realidad del control.

Esto lo podemos entender con base en modelos de laboratorio virtual de procesos que hoy en día están en desarrollo con resultados parciales satisfactorios y cuya plataforma de creación fue el lenguaje de programación JAVA [BISO4].

Utilizar la plataforma Java para simular distintas plantas y controladores fue una opción planteada para satisfacer las necesidades de los alumnos en la sociedad moderna ya que se considera que la educación a distancia se ha convertido en una solución viable para los alumnos que requieren mayor flexibilidad en el régimen de horarios manejado por las instituciones educativas. Quizá los principios fundamentales de la escolarización a distancia se dieron por medio de los llamados estudios por correspondencia, que en su momento marcaron unos grandes apoyos académicos para aquellos imposibilitados por cualquier razón para asistir a las aulas.

## **6 El Laboratorio Virtual**

El presente proyecto pretende dar a los alumnos, de materias afines al control, su primer acercamiento al control de procesos, a través de un Laboratorio Virtual. Se busca que el laboratorio sea una interfase donde los alumnos puedan interactuar con los procesos. Esta finalidad didáctica va a permitir que el alumno se interese y profundice más en la ingeniería de control, acercándole a ésta fuera del aula de clase.

### **6.1 Acerca de LabVIEW**

Para el desarrollo del Laboratorio Virtual de Control de procesos, es necesaria una plataforma muy robusta, que permita alcanzar los objetivos propuestos. LabVIEW es un Software desarrollado por National Instruments<sup>1</sup> en 1986. Este software consta de un lenguaje de programación creado para probar, medir y controlar sistemas con una poderosa interfase gráfica. Permite analizar datos para encontrar información importante y compartir resultados. Consiste de una herramienta que brinda un poderoso desempeño gráfico y versatilidad para construir un panel de control completamente interactivo. Por lo anterior, LabVIEW se convierte en el paquete de soluciones ideal para el desarrollo de la simulación de procesos que requieran de diversas mediciones y monitoreos.

### **6.2 Sistema Propuesto**

El sistema se divide en las dos etapas siguientes:

**Etapla Interactiva para la Simulación del Control de Procesos:** En esta etapa el alumno trabajará en una Interfase Interactiva que le permitirá modificar diferentes parámetros, dependiendo del proceso en el que esté trabajando. La interfase consiste de un Panel de Control con la posibilidad de modificar

---

<sup>1</sup> <http://www.ni.com/>



variables del proceso e indicadores que permiten monitorear dichos procesos. El acceso a esta Interfase será a través de un navegador web.

**Etapa de evaluación:** Comprende el desarrollo de un problema que cumpla con el modelo de Aprendizaje Basado en Problemas (PBL, por sus siglas en inglés); se genera una superficie de evaluación con base en una o varias soluciones posibles para el problema planteado; un algoritmo genético es utilizado para obtener parámetros del evaluador difuso, con base en la superficie deseada; posteriormente se desarrolla una interfaz interactiva que permita identificar y validar al usuario, presentar el PBL con evaluador difuso, mostrar y enviar resultados y registrar la calificación; la última parte de esta etapa consiste en la publicación web de la misma.

En la Figura 4 se presenta el diagrama a bloques del Sistema Propuesto.

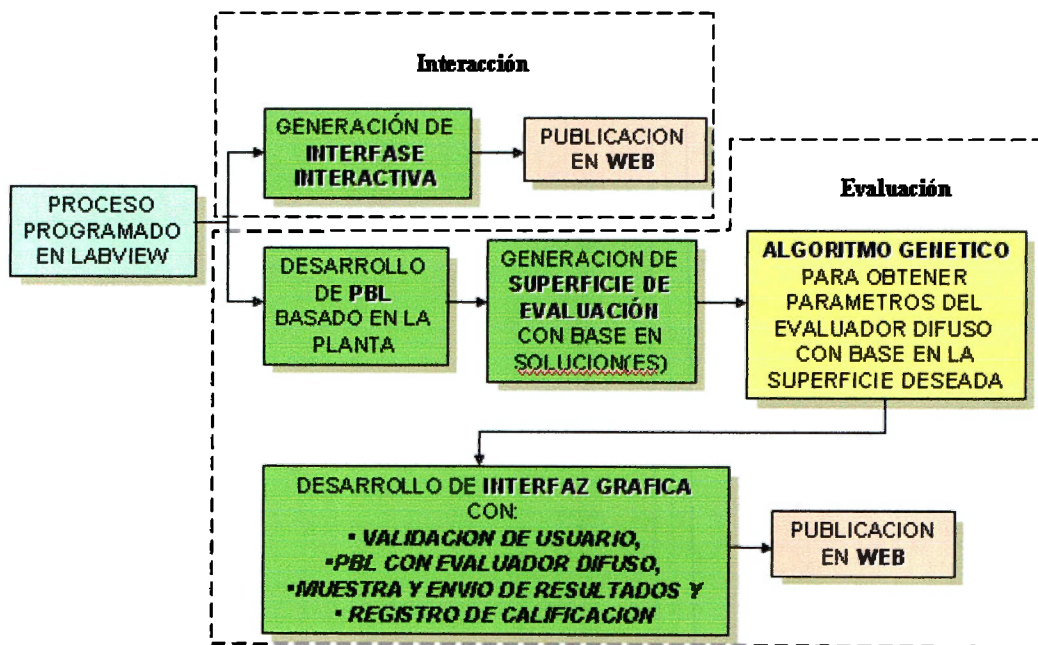


Figura 4: Sistema Propuesto.

## 7 Marco Teórico

Los diferentes procesos simulados en este proyecto permiten al alumno familiarizarse con ellos y brindarle un panorama más práctico de la Ingeniería de Control. Se eligieron procesos representativos de la Ingeniería de Control y utilizados en el mundo real. En este capítulo se presenta el marco teórico de los procesos y del sistema evaluador utilizado en el Laboratorio Virtual.

### 7.1 Robot de Soldadura por Arco

La soldadura por arco es una de las áreas de aplicación más importantes en robots industriales. [DOR03] En la mayoría de las situaciones de soldadura en la manufactura, el desconocimiento de la dimensión de las partes o la geometría de la unión y el propio proceso de soldadura requiere del uso de sensores para mantener la calidad de la soldadura. Muchos sistemas emplean un sistema de visión para medir la geometría del área del metal derretido. Este sistema emplea una tasa constante de alimentación al cable a ser derretido. El diagrama a bloques se representa en la Figura 5.

El proceso de derretido del cable es un proceso de segundo orden sin ceros, tiene la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{1}{0.5s^2 + 1.5s + 1} \dots\dots\dots(1)$$

El proceso tiene un controlador en serie que es un polo en -2 y una constante K que debe de ser calculada, dependiendo de los parámetros deseados en la respuesta del sistema.

$$C(s) = \frac{K}{s + 2} \dots\dots\dots(2)$$

El control es un lazo cerrado. La retroalimentación es negativa y se realiza con un sistema de visión que tiene la siguiente función de transferencia:

$$H(s) = \frac{1}{0.005s + 1} \dots\dots\dots (3)$$

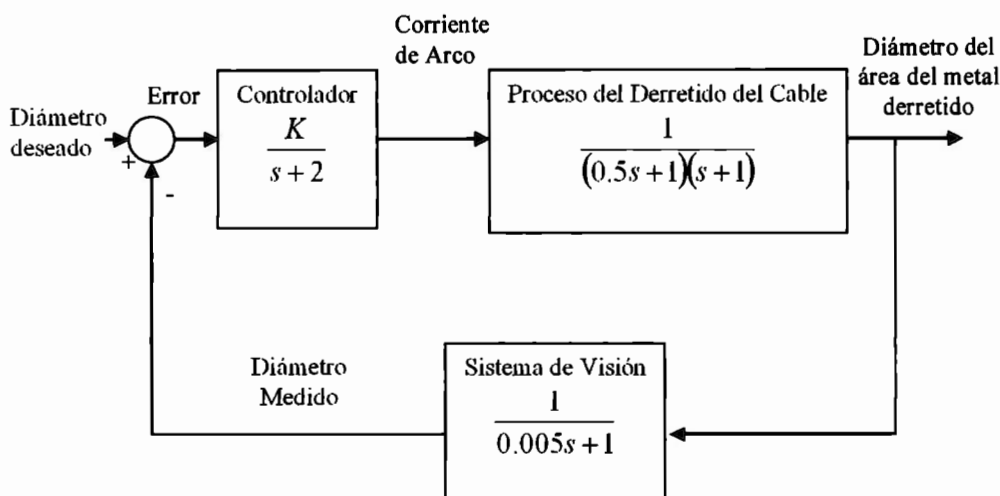


Figura 5: Representación de bloques del proceso Soldadura por Arco

## 7.2 Tres Reactores Isotérmicos

El sistema que esta representado en la Figura 6 es un sistema de tres tanques acoplados isotérmicos en serie. Dicho proceso químico es muy usual en la industria y es un caso de estudio popular en la literatura [LUY90]. En cada tanque perfectamente mezclado se lleva a cabo un proceso de reacción química, donde un reactante A se convierte en un producto B. Para este caso se asume que el volumen y temperatura en los tanques permanece constante.

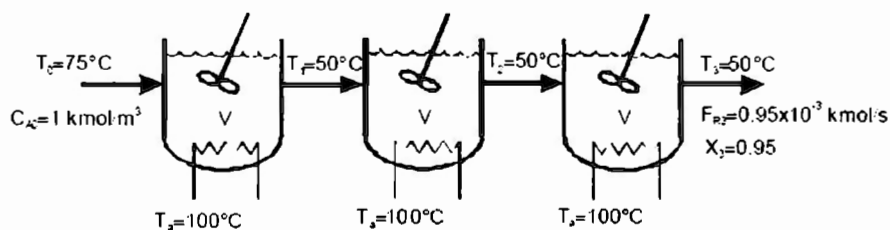


Figura 6: Sistema de 3 reactores en serie linealizado.

Basados en estas suposiciones, se puede comenzar a formular el modelo. Si el volumen y la densidad de cada tanque son constantes, la masa total en cada tanque permanece constante. Entonces la ecuación de continuidad total para el primer reactor (tanque) es:

$$d(pV_1)/dt = pF_0 - pF_1 = 0 \quad \text{ó} \quad F_1 = F_0 \dots\dots\dots (4)$$

De tal forma el balance de masas en los tanques 2 y 3 es igual a:

$$F_3 = F_2 = F_1 = F_0 = F \dots\dots\dots (5)$$

Donde F es definido en m<sup>3</sup> /min. Por lo cual las variables dependientes en el sistema son los niveles de concentración de la sustancia en cada etapa. El sistema de ecuaciones lineales que definen al sistema en su conjunto es:

$$\frac{dC_{A1}}{dt} = \frac{1}{\tau}(C_{A0} - C_{A1}) - kC_{A1} \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{dC_{A2}}{dt} = \frac{1}{\tau}(C_{A1} - C_{A2}) - kC_{A2} \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{dC_{A3}}{dt} = \frac{1}{\tau}(C_{A2} - C_{A3}) - kC_{A3} \dots\dots\dots (8)$$

Sistema de ecuaciones representativas del sistema.

A partir de la Figura 6 puede observarse que la entrada del sistema es la concentración de la sustancia C<sub>AO</sub>, mientras que la salida del proceso es la concentración C<sub>A3</sub>. Suponga que τ=2 minutos, mientras k=0.5 minutos<sup>-1</sup>. Las condiciones iniciales del sistema son C<sub>A1</sub>=0.4 kg.mol de componente A/m<sup>3</sup>, C<sub>A2</sub>=0.2 kg.mol de componente A/m<sup>3</sup>, C<sub>A3</sub>=0.1 kg.mol de componente A/m<sup>3</sup>. Con estos valores el estudiante puede establecer un control.

### 7.3 Reactor No Isotérmico

El Reactor No Isotérmico es un caso muy particular a diferencia de los reactores isotérmicos. [LUY90] En un proceso no isotérmico se agrega la variable temperatura, que cambia con el tiempo. Una reacción exotérmica irreversible se muestra en este reactor sencillo, ver Figura 7.

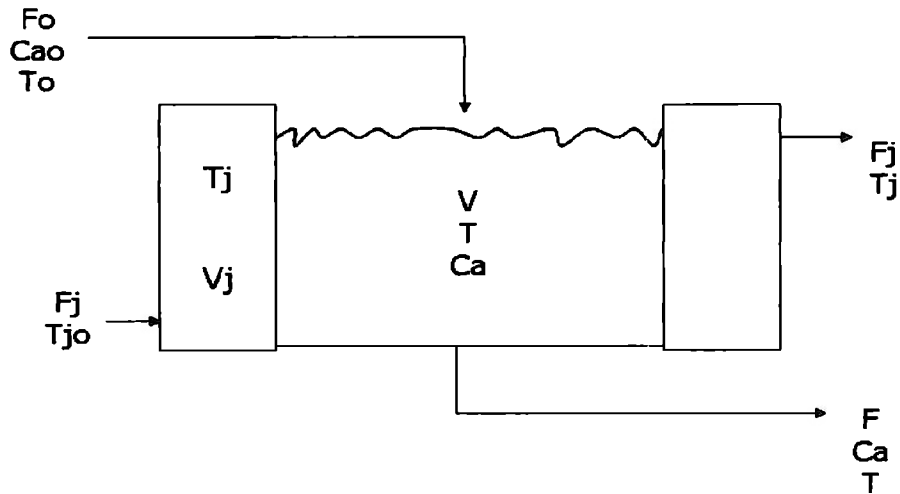


Figura 7: Reactor no isotérmico.

La reacción es orden  $n$  en el reactante  $A$  y tiene un calor de reacción  $\lambda$  que esta en  $\frac{Btu}{lb \cdot mol}$ . Se asumen pérdidas de calor y densidades constantes. Para disminuir el calor de reacción, una chaqueta refrigerante rodea al reactor. Dicha chaqueta contiene agua fría que se agrega en un flujo de tasa volumétrica  $F_j$  con una temperatura entrante de  $T_{jo}$ . El volumen de agua en la chaqueta debe ser constante. La masa de las paredes del metal es despreciable, por lo que no se considera la inercia térmica.

La transferencia de calor entre el proceso a temperatura  $T$  y la temperatura del agua a temperatura  $T_j$  se describe por la siguiente ecuación:

$$Q = UA_H (T - T_j) \dots \dots \dots (9)$$

Donde  $Q$  = Tasa de Transferencia de Calor.  
 $U$  = Coeficiente de transferencia de Calor  
 $A_H$  = Área de transferencia de Calor.

En general, el área de transferencia de calor puede variar con la interrupción en el reactor si algunas áreas no están completamente cubiertas con líquido de masa de reacción todo el tiempo. Las ecuaciones que describen el sistema son:

$$\frac{dV}{dt} = F_0 - F \dots \dots \dots (10)$$

$$\frac{d(V C_A)}{dt} = F_0 C_{A0} - F C_A - V k (C_A)^n \dots \dots \dots (11)$$

$$\rho \frac{d(Vh)}{dt} = \rho (F_0 h_0 - Fh) - \lambda V k (C_A)^n - UA_H (T - T_j) \dots \dots \dots (12)$$

$$\rho_j V_j \frac{dh_j}{dt} = F_j \rho_j (h_{j0} - h_j) + UA_H (T - T_j) \dots \dots \dots (13)$$

Donde:  $\rho_j$  = densidad del agua refrigerante.  
 $h$  = entalpía del proceso líquido  
 $h_j$  = entalpía del agua refrigerante.

Se requiere de un controlador de nivel para regular la entrada y salida del agua, del tal manera que se regule el flujo para que el nivel sea constante.

$$F = K_v (V - V_{\min}) \dots \dots \dots (14)$$

Finalmente, se necesitan algunos datos de entalpía para relacionar la  $h$  con las composiciones y las temperaturas, asumiendo

$$h = C_p T \dots \dots \dots (15)$$

$$h_j = C_j T_j \dots \dots \dots (16)$$

donde:  $C_p$  = capacidad de calor del proceso líquido  
 $C_j$  = Capacidad de calor del agua refrigerante.

## 7.4 Columna de Destilación Binaria.

La columna utilizada tiene 20 platos y produce la separación de una mezcla binaria con una volatilidad relativa, en productos con un 99 % de pureza. El modelo se realizó basándose en balance de masa y balance de energía en estado estacionario, y consiste de un conjunto de ecuaciones diferenciales algebraicas no lineales. [LUY90] Las siguientes hipótesis fueron usadas para la construcción del modelo: mezcla binaria; presión constante; volatilidad relativa constante; equilibrio en todas las etapas; flujo molar constante; no existencia de vapor holdup; dinámica de líquido linealizada, pero que afecta al flujo de vapor. La columna tiene 20 platos, un recalentador en la base y un condensador del flujo de salida en el tope de la columna. Un diagrama esquemático de la columna se representa en la Figura 8.

Este proceso ha sido estudiado por diversos investigadores y representa un problema paradigmático de control de procesos. La entrada del sistema es el flujo de alimentación  $F$  (feed flow rate) y una referencia del rehervidor que es el flujo de Vapor. Las variables manipuladas son el factor de reflujo y el flujo de vapor, en tanto que las otras entradas se mantienen constantes, y sus variaciones alrededor del valor nominal son consideradas como perturbaciones. Las salidas del sistema son el flujo en el tope de la columna, la composición en

el tope de la columna  $x_D$ , el flujo en la base de la columna, y la composición en la base de la columna (destilado)  $x_B$ . Las salidas de interés (i.e., las variables controladas) son las composiciones en el tope y en la base de la columna, y típicamente el objetivo de control es lograr un determinado porcentaje de pureza en la composición en el tope de la columna y en la base de la columna. Esta situación se conoce como problema de control de composición dual y la configuración de la siguiente figura se denomina configuración L-V.

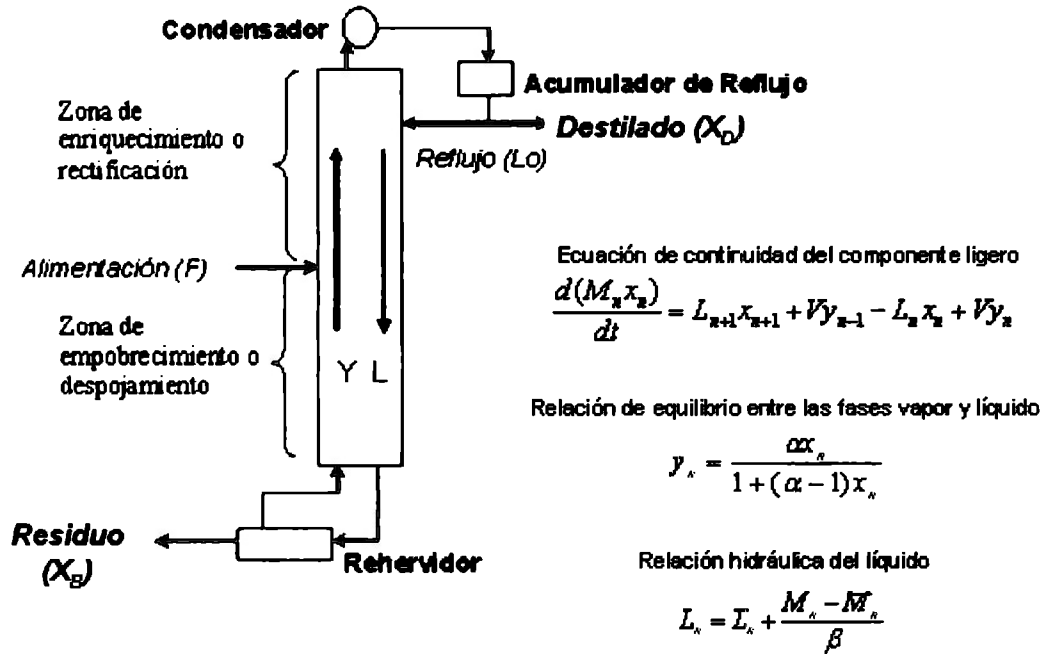


Figura 8: Columna de destilación.

## 7.5 Sistema de Frenado ABS

El sistema automotriz con frenado de antibloqueo está diseñado para lograr detener a los vehículos de la manera más segura y rápida posible. La seguridad se logra manteniendo la estabilidad lateral (con base en esto la efectividad y precisión de los movimientos del volante es mayor) y tratando de reducir las distancias de frenado, siendo así más efectiva que en los casos en que los frenos son únicamente controlados por el conductor. [LEN99]

Los actuales sistemas ABS utilizan la velocidad de giro de las llantas comparada con la velocidad del vehículo para tomar la medición del momento en que las ruedas se deberán bloquear (por ejemplo cuando hay deslizamiento entre la rueda y el camino) y utilizan esta información para ajustar la duración de los pulsos de la señal de frenado (por ejemplo para bombear los frenos). Esencialmente, conforme los incrementos del deslizamiento pasan un punto crítico donde se puede perder la estabilidad lateral el controlador suelta los frenos. Después, una vez que el deslizamiento ha disminuido a un punto donde la estabilidad lateral ha incrementado, y la efectividad de frenado

decrementado, los frenos vuelven a ejercer presión. De esta manera el sistema ABS realiza ciclos de frenado para lograr obtener un óptimo intercambio entre la efectividad del frenado y la estabilidad lateral. Las limitaciones inherentes en nuestra habilidad para sensor ciertas variables e incertidumbres asociadas con el proceso y el ambiente (las condiciones cambiantes del asfalto cuando hay agua o nieve) hacen del control ABS un reto elevado. Existen muchos algoritmos de lógica de control para ABS.

En este proyecto no se considera el sistema de emergencia o "Panic Stop" por lo tanto lo que proponemos no es del todo un sistema ABS, si no lo que se llama sistema base de frenado lo cual para efectos didácticos permite mostrar con elevada precisión una simulación del funcionamiento de frenado ABS. Aplicaremos un controlador que permita simular el torque de frenado impuesto por el conductor o el sistema ABS y entendido por el sistema de frenado. Es claro que resolver el problema de la base de frenado es de una significativa importancia ya que hay una correlación directa entre la seguridad y confiabilidad de los frenos al proveer la fuerza de frenado demandada. Los algoritmos de frenado base son capaces de correr a la par de los controladores ABS para que estos puedan comparar su efectividad a la de un sistema de frenado cuando se activa en modo ABS.

La Figura 9 muestra el sistema de frenado tomado del libro "Implementation of fixed and self-tuning controls for Wheel torque regulation" [HAR93]. La entrada al sistema denotada por  $r(kT)$ , equivale al torque demandado por el conductor o control ABS. La salida,  $y(kT)$  (en ft-lbs), es la salida del sensor de torque, el cual mide directamente el torque aplicado a los frenos. La señal  $e(kT)$  representa el error generado entre la referencia de entrada y el torque de salida el cual es utilizado por el controlador para crear una señal que sirva como entrada al sistema de frenado,  $u(kT)$ . Un intervalo de muestro de  $T=0.005s$  se utiliza para realizar las simulaciones.

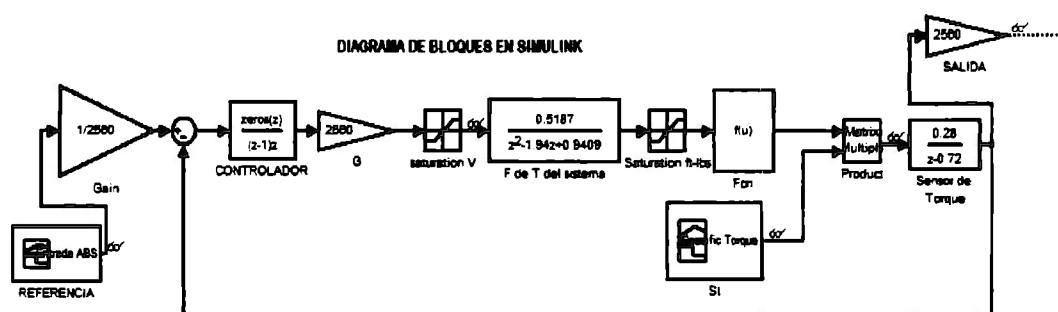


Figura 9: Diagrama a bloques de sistema de frenado.

Este sistema de frenado es propiedad de General Motors y está físicamente limitado a procesar señales entre  $[0, +5]V$ , mientras que el torque de frenado puede ir de 0 a 2700 ft-lb. Por esta razón y otras razones específicas de hardware descritas en [Dei95] el torque de entrada es atenuado en un factor de 2560 y la salida es amplificada en ese mismo factor. Después de que  $u(kT)$  es multiplicada por 2560 pasa a través de un saturador no lineal donde si  $2560u(kT) < 0$ , el sistema de frenado recibe una entrada igual a cero y si



$2560u(kT) > 5$  entonces la entrada será 5. La salida del sistema de frenado pasa por una no linealidad similar que se satura en 0 y en 2700. La salida de esta discontinuidad pasa a través de  $F(y)$  que se define como sigue:

$$F(y) = \frac{y}{2502.4419} + 0.0139878 \dots \dots \dots (17)$$

Esta función fue determinada experimentalmente y representa la relación entre la presión del líquido de frenos y la fuerza de frenado en el coche. Después,  $F(y)$  es multiplicado por el torque específico  $S_t$ . La señal se pasa a través de un modelo experimentalmente determinado del sensor de torque; posteriormente es amplificada y  $y(kT)$  es la salida. El torque específico  $S_t$  en el proceso de frenado refleja las variaciones en la fuerza del mismo mientras que las balatas incrementan su temperatura. La fuerza aplicada en las ruedas esta en función de la presión aplicada por las balatas y el coeficiente de fricción entre estas y el rotor de la rueda. A medida que las balatas y el rotor aumentan su temperatura, el coeficiente de fricción incrementa también. Como resultado, se requiere menos presión en las balatas para obtener la misma fuerza de frenado. El torque específico de este sistema de frenado se ha ubicado experimentalmente y varia entre los dos limites siguientes:

$$0.85 \leq S_t \leq 1.70 \dots \dots \dots (18)$$

### 7.6 Planta Termoelectrica de Combustible Fósil.

La Figura 10 será útil para entender el proceso de conversión de energía partiendo de una fuente de energía natural.

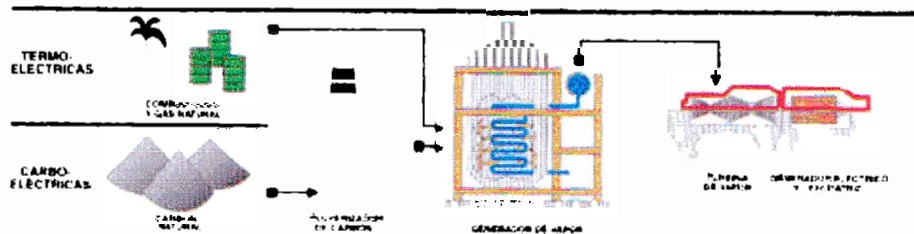


Figura 10: Proceso de generación de energía a partir de una fuente natural.

Para nuestro estudio partimos de manera más específica de una unidad generadora de energía eléctrica, la cual está compuesta por una caldera que convierte el agua en vapor y una turbina que, al recibir el chorro de vapor, gira al igual que el generador eléctrico, a continuación se especifica en forma detallada el proceso de transformación de energía. [VAN89]

La representación más común en la bibliografía presenta el esquema de una unidad de generación termoeléctrica de vapor de 300 MW. Si se analiza por partes este sistema, se encuentra que no sólo está formado por una caldera, una turbina y un generador, sino que existen otras partes necesarias para su

funcionamiento. Primero se tiene fuego bajo la caldera. Esta parte no involucra sólo el combustible que va a usarse sino la forma de colocarlo debajo de la caldera para obtener un encendido apropiado.

Al quemarse el combustible se produce una reacción química. Por ejemplo, si se trata de carbón, cuando este es calentado a una temperatura suficientemente alta, con la presencia de aire, puede formar combinaciones para obtener dióxido de carbono o monóxido de carbono. Cada uno de estos gases es formado dependiendo de la cantidad de oxígeno presente. Para obtener todo el calor que fluye del combustible es deseable que en los hornos calentadores se obtenga siempre todo el dióxido de carbono que sea posible.

Para mejorar la eficiencia de un generador de vapor se requiere incluir otras variables. Por ejemplo, para operar cualquier caldera es esencial mantener siempre suficiente agua en ella, por lo que es necesario contar con un alimentador de agua que tenga una válvula de control que permita controlar el flujo automáticamente cuando el agua en la caldera incremente o disminuya.

Otra cosa importante que debe considerarse es que el agua que se bombea dentro de la caldera no debe estar fría ya que podría disminuir la temperatura del agua que se encuentra ya en la caldera y por consiguiente reducir el porcentaje de vapor inyectado. Este aspecto hace ver la importancia de calentar el agua a la temperatura mas alta posible antes de bombearla dentro de la caldera.

La caldera consiste de dos cilindros de acero conectados por un número de tubos también de acero y colocados en un horno de tal manera que los gases calientes tengan que pasar a través de la pared de tubos en su trayectoria a la chimenea. La superficie total de los tubos es grande, lo que hace posible absorber una gran porción de calor.

Las burbujas de vapor formadas en los tubos llegan al domo donde el vapor es recogido antes de que fluya a la turbina.

Como el vapor fluye fuera de la caldera, se vuelve necesario reponer el agua que se ha evaporado y en este caso la bomba de alimentación es necesaria. Esta bomba debe operar a una presión suficientemente alta para que pueda superar la presión en la caldera. El control de agua funciona de la siguiente manera: Si la cantidad de vapor que sale de la caldera es siempre igual a la cantidad de agua que entra, el nivel de agua permanece igual. La mejor manera de disponer del vapor que se escapa es crear un vacío en el escape final de la turbina. Con este fin se anexa un recipiente grande hueco al escape abierto de la turbina y se instala una pared de pequeños tubos en el recipiente a través de los cuales se puede bombear agua fría.

Esencialmente se puede decir que una turbina es como un molino de viento, con cientos de aspas, algunas estacionarias y otras girando. Estas aspas están arregladas en bloques por donde el vapor es forzado a pasar.

De esta manera el vapor que fluye de la turbina entra en contacto con los tubos fríos y se convierte en agua. El recipiente está hecho de acero pesado capaz de resistir la presión de la atmósfera y no colapsarse. Ya que el agua fría continúa su flujo a través de los tubos, el proceso es continuo. Una conversión de vapor en agua se estabiliza y existe un estado estable de vacío dentro del recipiente. Técnicamente tal recipiente es llamado condensador.

Entonces el calor vapor producido en la caldera fluye a través del calentador principal de vapor a la turbina. En la turbina pasa sucesivamente a través de varias tuberías, perdiendo presión en cada una de ellas y dejando su energía en las aspas de las mismas. Esta energía mueve al generador eléctrico y se produce la electricidad que buscamos. En la parte baja de la turbina se concentra el resto del vapor que entra al condensador que realiza su función en los tubos a través de los cuales circula el agua fría.

La condensación del vapor crea un vacío que reduce la presión anterior ya que de otro modo impediría el flujo de vapor en un espacio considerable. El vapor condensado es recogido en el pozo caliente del condensador y es extraído por la bomba que inyecta agua dentro del calentador repitiendo así el proceso.

La descripción en bloques de lo anteriormente descrito se puede observar en la Figura 11.

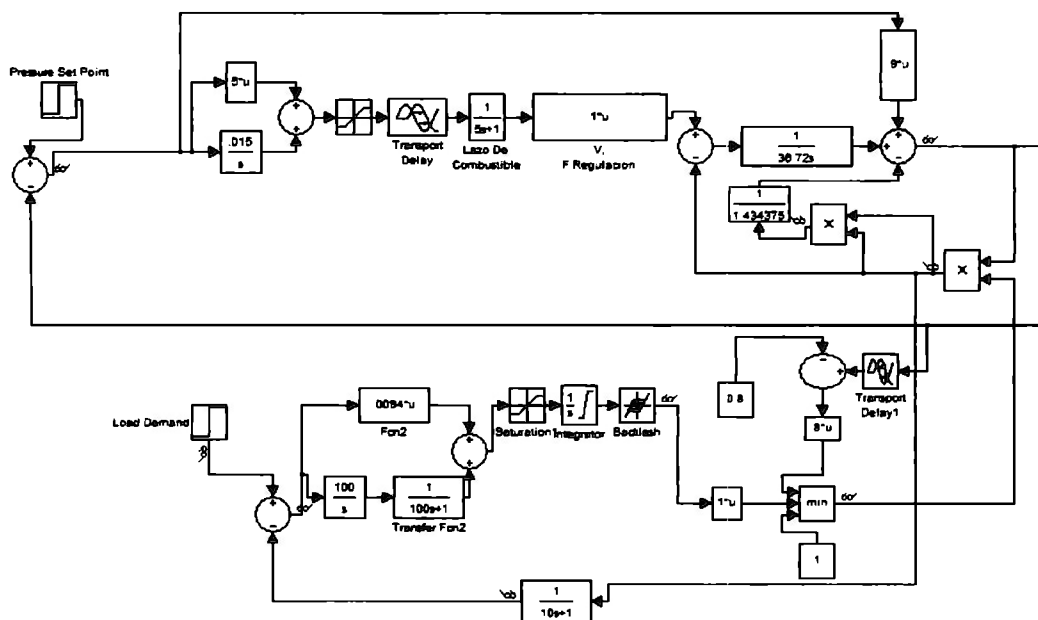


Figura 11: Diagrama a bloques de planta termoeléctrica a partir de Combustóleo.

Aquí la función de transferencia que representa a la turbina a la salida de nuestra planta es  $1/(10s+1)$ . A continuación describimos este importante elemento con más detalle.

## 7.7 Sistema Evaluador

Este evaluador está basado en la teoría de la lógica difusa (Fuzzy Logic) que es una técnica matemática con gran crecimiento en los últimos años debido a su gran cantidad de seguidores y su gran potencialidad. Esta lógica está basada en expresiones que no son ni totalmente ciertas ni totalmente falsas, o sea, conceptos que pueden tomar valores distintos de veracidad entre la verdad total y la falsedad absoluta. La lógica difusa está basada en conjuntos difusos (Fuzzy Sets) a los que los elementos pertenecen en distintos grados, contrario a los conjuntos convencionales en los que la pertenencia es absoluta. Al utilizar esta herramienta tenemos mayor libertad al planear los distintos rangos de operación y sus correspondientes calificaciones. [BUC93], [SUG85]

Existen dos tipos principales de sistemas difusos en la literatura: el propuesto por el británico Mamdani y el propuesto por los japoneses Takagi y Sugeno.

Un sistema difuso de dos entradas tipo Sugeno está estructurado de la siguiente manera:

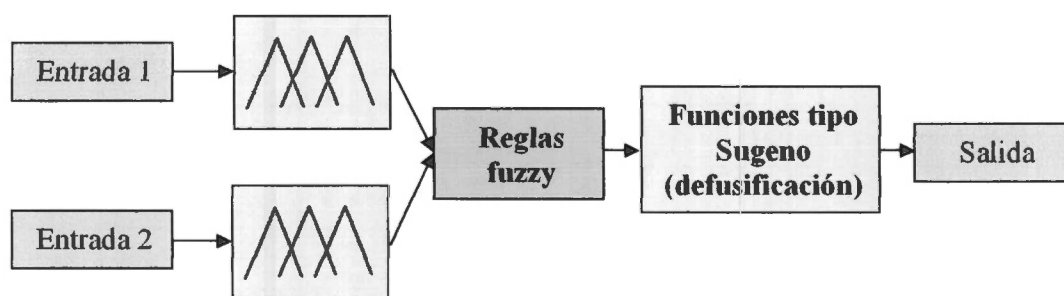


Figura 12: Sistema difuso tipo Sugeno de dos entradas.

La primera etapa es la denominada fusificación de los datos de entrada. Esta se lleva a cabo mediante funciones de membresía que son las representaciones gráficas de los conjuntos difusos. En la literatura se encuentran distintas propuestas de funciones de membresía pero no existe ninguna regla para escoger el tipo de función a utilizar. Hay funciones triangulares, trapezoidales, gaussianas, tipo campana, sigmoidales; entre otras. Las funciones se disponen de modo que la variable de entrada pertenezca en distintos grados a una o más de ellas. Después de esta etapa los datos son tipo fuzzy.

Las reglas fuzzy son de tipo if – then, es decir, se busca establecer la pertenencia a una o más funciones de membresía de entrada y asignar las correspondientes funciones de salida para poder convertir el resultado a analógico.

Las funciones Sugeno de defusificación tienen la diferencia con respecto al sistema Mamdani de no ser funciones de membresía, sino funciones matemáticas de distinto orden, según sea el requerimiento del sistema.

La defusificación se lleva a cabo con la siguiente fórmula:

$$y = \frac{\sum |y = y^i| * y^i}{\sum |y = y^i|} \dots\dots\dots(19)$$

Esta fórmula es llamada centroide o centro de masa. En esta parte se multiplican los valores analógicos correspondientes a las funciones Sugeno por los valores difusos y se dividen entre la sumatoria de los valores difusos.

En los últimos años los sistemas basados en lógica difusa se han convertido en parte esencial de muchos de los llamados sistemas inteligentes que buscan solucionar problemas a los cuales resulta complicado o poco práctico modelar con técnicas convencionales como por ejemplo ecuaciones diferenciales y/o algebraicas.

Estos sistemas buscan, en base a reglas lingüísticas modelar tareas relacionadas con la inteligencia humana. Su reciente popularidad dentro de la ingeniería y las ciencias es debida en gran parte a que han mostrado resultados satisfactorios en algunos problemas que con técnicas de cómputo convencionales no se habían podido resolver.

## **7.8 Algoritmos Genéticos**

Los algoritmos genéticos son técnicas de programación que surgen a partir de la necesidad de “enseñar” a un computador a realizar operaciones que un ser humano no puede realizar a mano. Su nombre proviene de la Teoría de la Selección Natural de Charles Darwin que indica o hace alusión a la “supervivencia del más apto”. Esto se hace simulando en el computador poblaciones de “genomas”, que son posibles soluciones al problema, y determinando la aptitud de cada *genoma* de acuerdo a la cercanía que tienen con la solución del problema. Estos genomas también en algunas ocasiones son llamados *cromosomas*. [WEI04]

Una vez que es determinada la aptitud respectiva de los genomas, se reproducen por medio de distintas técnicas que buscan reproducir con mayor probabilidad a los más aptos para que cada vez las distintas poblaciones se vayan acercando más y más a la solución.

Esto con ayuda de unas cuantas variables más que simulen comportamientos naturales como la mutación y las competencias y entonces tendremos un *algoritmo genético*.

En el siguiente esquema se muestra un diagrama a bloques que representa la estructura y funcionalidad de un algoritmo genético.



Figura 13: Estructura general del algoritmo genético.

El algoritmo propuesto está basado en los que se encuentran en la literatura actual con algunas modificaciones. Su esquema general está representado en la Figura 13.

La estructura de los genomas esta conformada por un conjunto de números que son o representan algún parámetro involucrado en la solución del problema. Estos números deben de ser convertidos a sistema binario en los procesos de reproducción y de mutación.

La generación de la población inicial generalmente se hace de manera aleatoria pero también se puede establecer una constante como población inicial sabiendo previamente que sus individuos son casos muy cercanos a la solución del problema en general.

Para seleccionar a los genomas que se reproducirán existen dos técnicas que son las más comunes: la ruleta y el torneo. La ruleta consiste en repartir entre el 100% espacios de una ruleta, de tal modo que los individuos más aptos tengan mayor probabilidad de ser escogidos que los demás, a pesar de que todos conserven una posibilidad, por más pequeña que sea, de ser elegidos. El torneo se trata de escoger un porcentaje de participantes al azar y entre ellos que ganen los dos más aptos.

Una vez escogidos los padres, se deben de reproducir para tener una nueva generación de posibles soluciones al problema. Como en la naturaleza, se busca que los hijos compartan parte de su estructura genética con sus padres. De este modo se lleva a cabo la reproducción que puede tener uno o dos pivotes. Estos pivotes parten al padre y a la madre y separan partes de su estructura para juntarse con la del otro. Todo este proceso se realiza con el genoma convertido a base dos o sistema binario.

Por último viene la mutación. Este proceso busca dar saltos en la evolución natural de la población, con el fin de acelerar el proceso de convergencia a la solución. Este proceso también se hace con el genoma en base dos y se logra alterando la estructura de algunos de los genomas de la población

seleccionados al azar. Para alterar su estructura generalmente se escoge alguno de sus bits al azar y se invierte. De este modo si se toma al bit menos significativo de algún gen, el cambio no es tan drástico, y si se toma el más significativo, pues el cambio es mucho más drástico pero no total.

En general los algoritmos genéticos son herramientas de gran potencial y de muy poco grado de complejidad que pueden resolver muchos problemas si son bien programados y acoplados al sistema que resuelve el problema original. Dependiendo del problema y la tecnología disponible, el tiempo de cómputo tiende a ser muy grande por lo que en muchos casos suelen ser despreciados como alternativas de solución a problemas. El autor David B. Fogel [FOG01] hace una referencia a las navajas suizas para explicar donde los algoritmos genéticos tienen su mayor debilidad. Las navajas suizas son un conjunto de herramientas que pueden solucionar casi cualquier problema pero siempre será mejor usar la herramienta original. Esto funciona de igual modo con los algoritmos genéticos.

## 8 Avances y Resultados

La presente sección contiene todos los avances y resultados a los que se ha llegado en cada uno de los procesos.

Consideramos necesario mostrar el avance y trabajo realizado tanto en la parte de *diagrama a bloques*, como en el *panel control*, pues implicó el desarrollo e implementación de interesantes modelos, Virtual Instruments (VIs) y SubVis<sup>2</sup>. A continuación se presenta el avance de nuestros procesos simulados.

### 8.1 Robot de Soldadura por Arco

El Robot de Soldadura por Arco también ha resultado un interesante proceso y la simulación ha permitido explotar otras herramientas muy interesantes de LabVIEW que a continuación se mostrarán.

El diagrama a bloques se muestra en la Figura 14.

Este proceso es claramente sencillo, pero ha servido para aprender a trabajar con los VIs de Control prediseñados de LabVIEW. Estos SubVis en realidad construyen las funciones de transferencia utilizando arreglos. Una de las interesantes aplicaciones es la de graficar las raíces.

El panel de control es muy sencillo, el único parámetro que se modifica es la constante K del sistema, pero el ejemplo es claramente ilustrativo para este proceso, a continuación se muestra el caso en que se elige  $K=13$ , ver Figura 15.

---

<sup>2</sup> Sub Virtual Instruments: Consiste en la utilización de Virtual Instruments dentro de Virtual Instruments general. En programación en C, C++ o Java podría equipararse a subrutinas o recursividad.



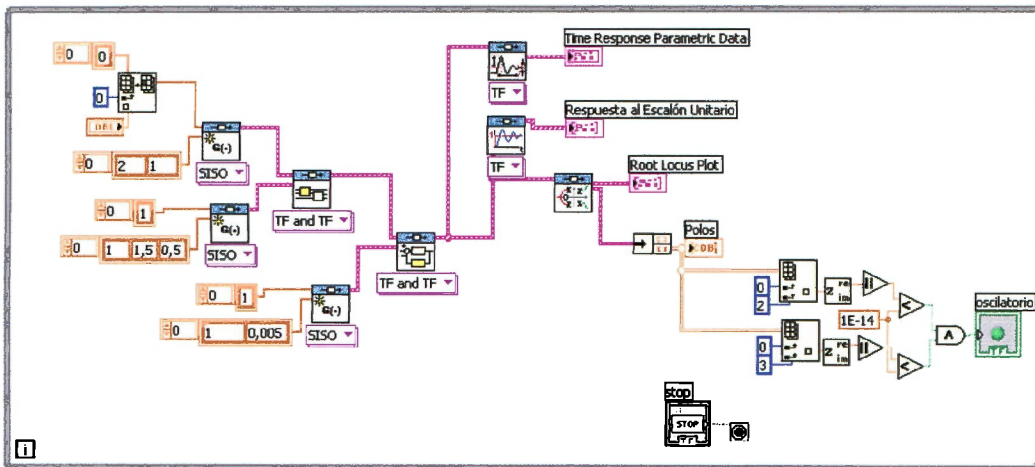


Figura 14: Diagrama a bloques de Robot de Soldadura por Arco.

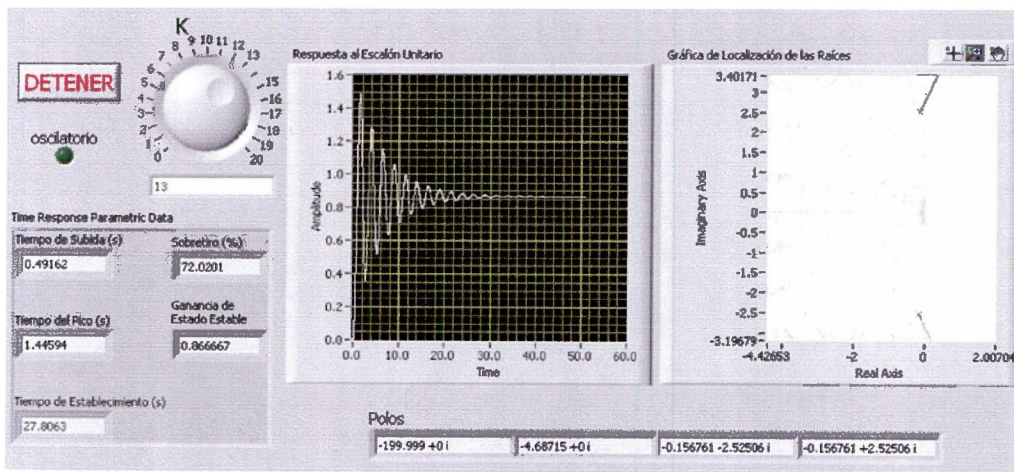


Figura 15: Panel de control de Robot de Soldadura por Arco, con  $k=13$ .

Como puede notarse, ésta respuesta alcanza la referencia, aunque elegir el valor  $k=4.5$  brinda da la respuesta óptima, ver Figura 16.

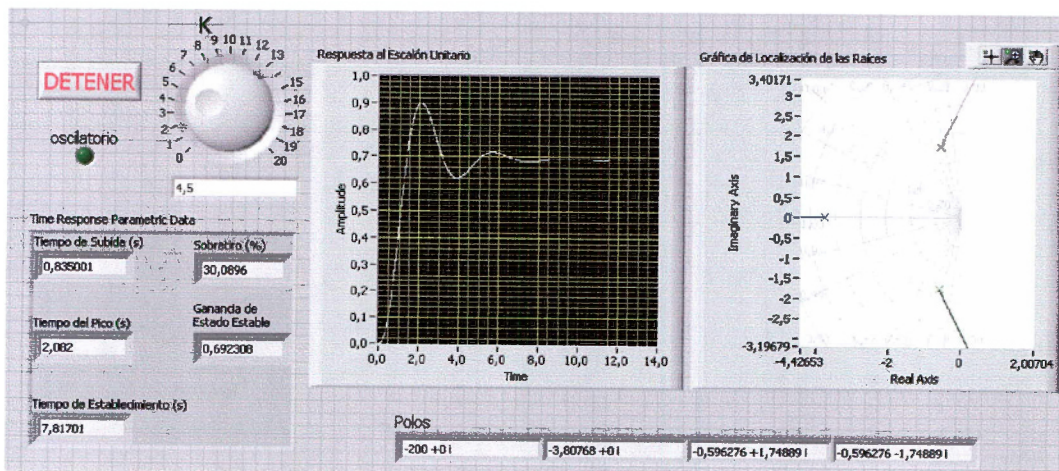


Figura 16: Panel de control de Robot de Soldadura por Arco, con  $k=4.5$ .

Este sistema es completamente interactivo, se puede modificar la K cuantas veces se quiera, el sistema se encarga de graficar hasta el momento preciso. Nótese el mapa de ubicación de los polos y sus valores numéricos que pueden verse en la parte inferior, Figuras 15 y 16.

## 8.2 Tres Reactores Isotérmicos en Serie

El proceso programado en LabVIEW sigue exactamente la misma estructura que el previamente programado en Matlab.

Para programar en LabVIEW este proceso, se aprovechó la similitud entre las ecuaciones de las concentraciones de los tanques y se programó un SubVI (operaciontres.vi), ver Figura 17, que realiza la operación de la ecuación de concentración del tanque uno y se cambian las entradas para que funcione para los tanques dos y tres.

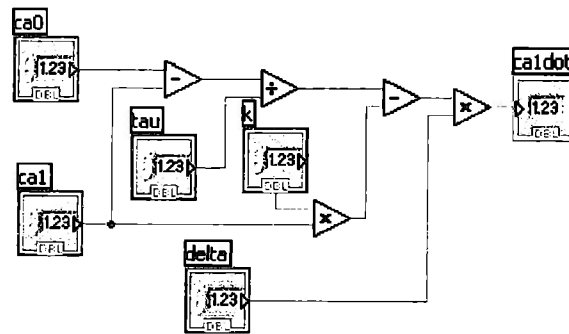


Figura 17: Diagrama a bloques del SubVI operaciontres.vi

Se programó por separado la ecuación de la concentración general del reactante A en todo el sistema y también la ley de control. Todo el proceso se colocó dentro de un ciclo *while* para que corriera en tiempo real, de hecho un poco más rápido, ya que el proceso toma entre diez y cincuenta minutos para establecerse.

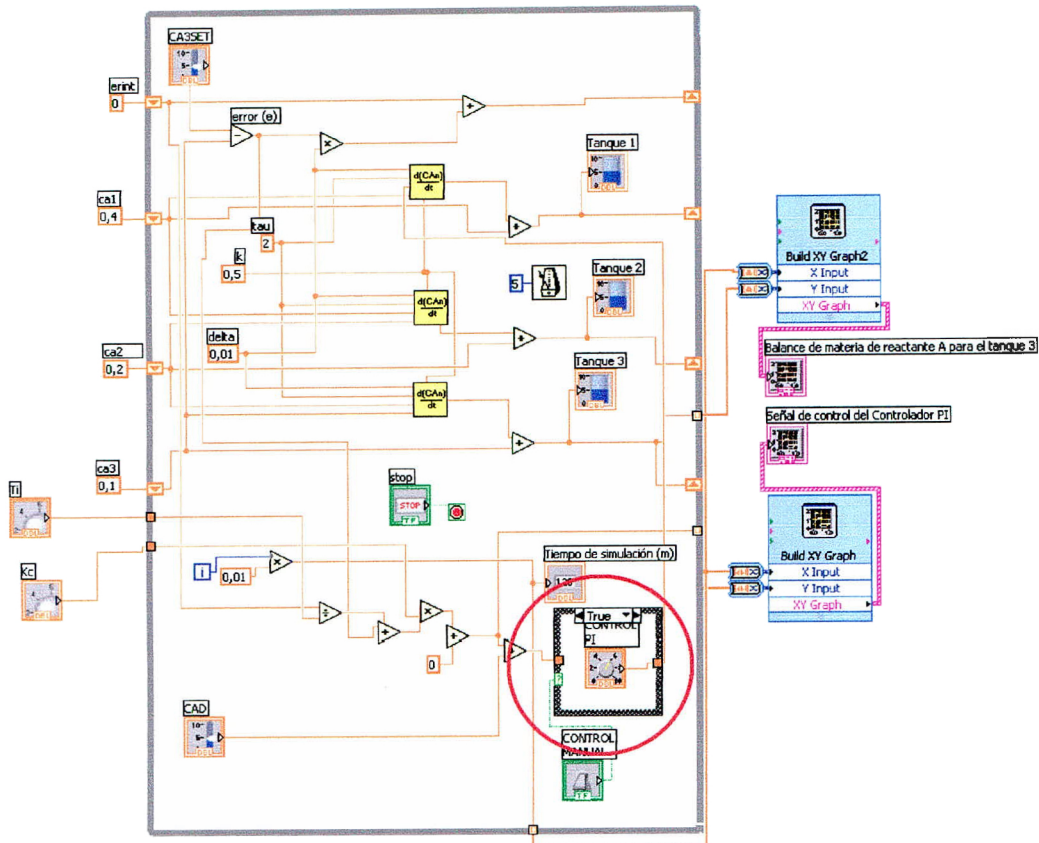


Figura 18: Diagrama a bloques del proceso Tres Reactores Isotérmicos en Serie.

En la Figura 18 se observan unos recuadros amarillos, cada uno de los cuales es el SubVI operaciontres.vi colocado en tres ocasiones para calcular las variaciones de concentración del reactante A en los tanques. Las operaciones de la parte inferior del ciclo son las relacionadas con la concentración general del reactante A en el proceso y la ley de control. El cuadro de Casos (círculo rojo en la Figura 18) es colocado para elegir entre diferentes técnicas de control, como se explicará más adelante.

El ciclo corre hasta que el usuario lo detiene con un botón colocado en la interfase gráfica (Figura 19). Mientras está corriendo se ve la variación de las concentraciones en los tres tanques<sup>3</sup> y al terminar se observan un par de gráficas que muestran las variaciones del proceso a través del tiempo, en este caso, la variación de concentración del reactante A en todo el proceso y en el tanque tres. En la interfase gráfica se colocaron algunos controles: uno para la constante de control y otro para el cambio de concentración del reactante A a la entrada. Los cambios en estos parámetros mientras corre el proceso son tomados en cuenta y reflejados en el proceso. Además también se pueden fijar los valores de CAD y CA3SET para ajustar valores de referencia. También existe una perilla para ajustar  $T_i$  (constante de Integración del control PI). Por último, y una característica muy especial de esta simulación, es la posibilidad

<sup>3</sup> Los indicadores de concentración no indican el nivel de líquido, únicamente la concentración.



de elegir entre dos diferentes tipos de control, ya sea manual o PI, con la ayuda de un interruptor que se encuentra dentro del círculo en la Figura 19.

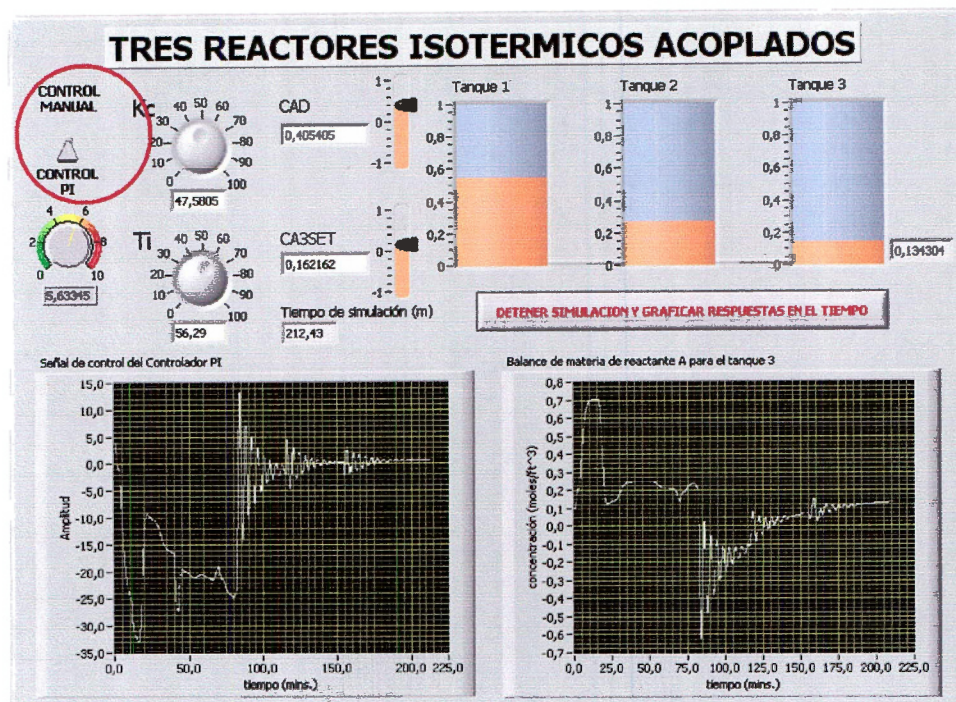


Figura 19: Interfase gráfica del proceso Tres Reactores Isotérmicos en Serie.

El proceso es compatible con el evaluador programado ya que al terminar el ciclo *while* hay dos arreglos generados para cada variable: la variación del parámetro a través del tiempo y su correspondiente arreglo de tiempo. Para corroborar que su funcionamiento sea el correcto, se compara la respuesta del proceso a determinadas entradas con el programado en Matlab. En este caso se pueden ver dos diferentes estrategias de control: manual y control PI.

### 8.3 Reactor No Isotérmico

Al igual que en el caso de los tres reactores isotérmicos se programaron varios SubVIs con diferentes operaciones, esto se logra gracias a la interfase de LabVIEW que es muy amigable. Sin embargo aquí fue muy útil la herramienta conocida como **shift register**, que se localiza en LabVIEW. Esta herramienta permite almacenar valores de iteraciones pasadas dentro de un ciclo for o while, con lo que podemos simular la programación en lenguajes basados en C o C++ como Matlab.

Se programaron ocho SubVIs, uno correspondiente a cada variable como se indica a continuación:

F: Controlador de Nivel  $F = 40 - 10(48 - V)$

Fj: Controlador de flujo de agua refrigerante en la chaqueta  
 $F_j = 49.9 - K_c(600 - T)$

K: Constante del controlador  $K = 7.08E10e^{\left(\frac{-30000}{1.99T}\right)}$

Q: Tasa de Transferencia de Calor :  $Q = 150*250*(T - T_j)$

Ecuaciones de Arrhenius para encontrar la relación con K

$$\begin{aligned} \dot{v} &= f_o - f; \\ \dot{v}c &= f_o * c_{ao} - f * c_a - v * k * c_a; \\ \dot{t} &= f_o * t_o - f * t + (30000 * v * k * c_a - q) / (0.75 * 50); \\ \dot{t}j &= f_j * (t_{jo} - t_j) / 3.85 + q / 240; \end{aligned}$$

Con estos SubVis creados se procedió a crear las conexiones necesarias considerando todas las constantes y las variables, tomando en cuenta los parámetros iniciales y apoyándonos con los **shift registers**. El circuito se aprecia en la Figura 20.

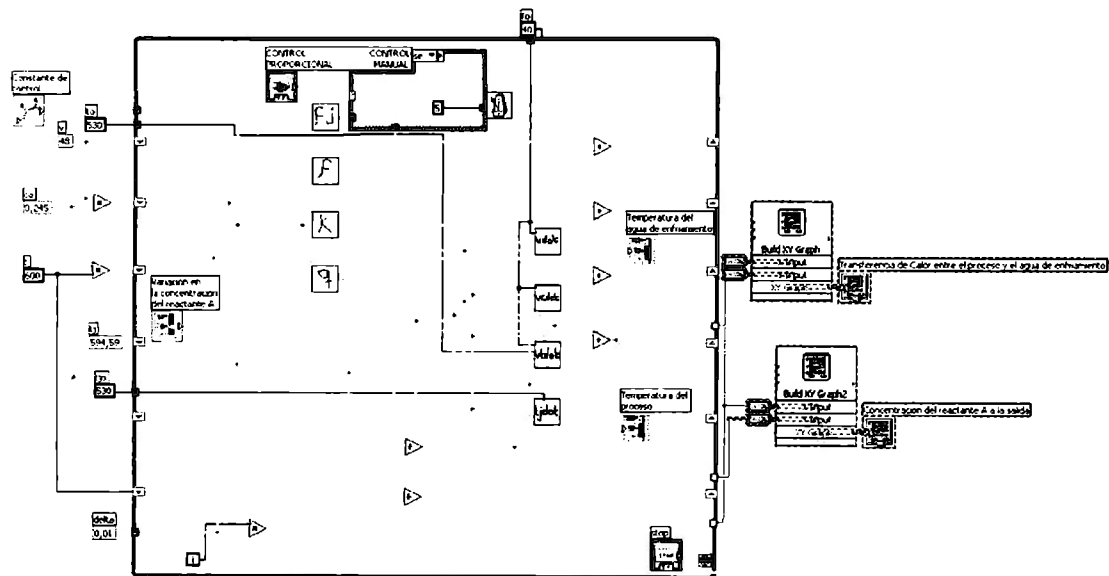


Figura 20: Alambrado del Reactor No Isotérmico

Se puede observar una estructura de casos que permite elegir entre una técnica de control manual o una proporcional. También podemos ver la gran utilidad de los Sub-Vis, que en este programa son indispensables.

A continuación se muestra, de manera representativa, uno de los SubVis más complejos que se utilizaron para este proceso. Este SubVi tiene 9 entradas, Figura 21.

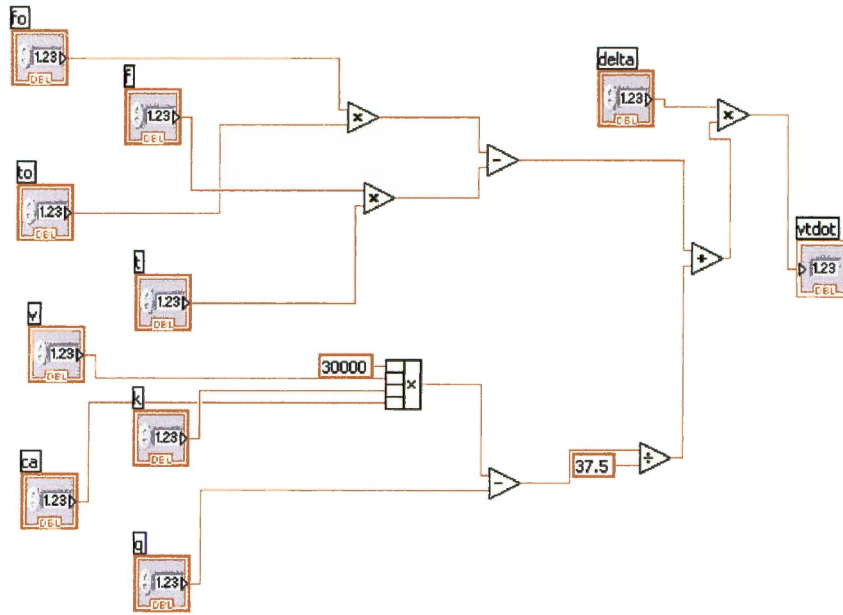


Figura 21: Sub VI de Vtdot.

La Figura 22 es la vista del Panel de Control, aquel en el que los alumnos realizarán sus prácticas y evaluaciones, se cuenta con dos indicadores de temperatura, un control de perilla, un control de barra y dos displays para visualizar las gráficas:

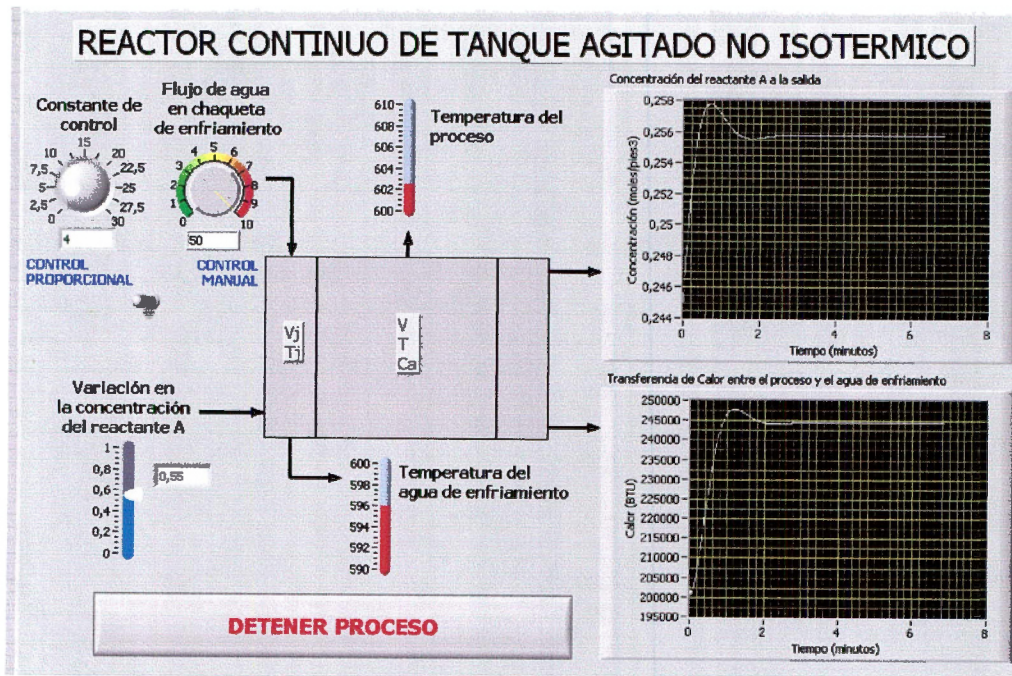


Figura 22: Panel de Control en LabVIEW del Reactor Continuo de Tanque No Agitado.

## 8.4 Columna de Destilación

En la programación de este proceso destaca la utilización de varios SubVis de numerosas entradas y salidas que realizan distintas operaciones, el SubVi llamado **control.vi** el cual se muestra en la Figura 23:

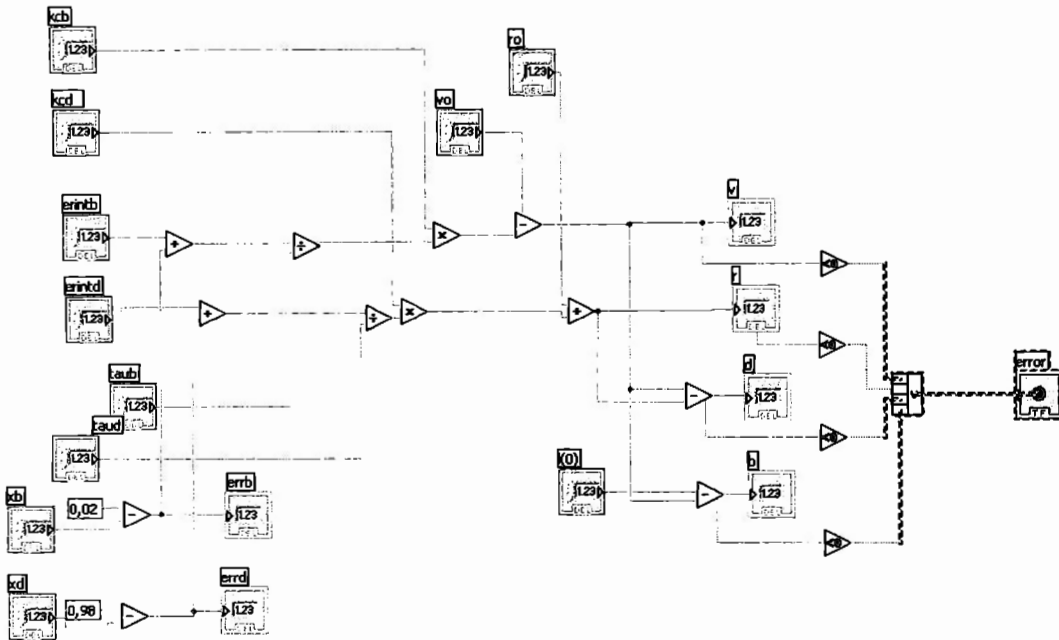


Figura 23: SubVi control.vi

Otros SubVis utilizados son: *bandejas.vi*, que se utiliza concretamente para la simulación de la dinámica de la mezcla en las bandejas; *control.vi* que realiza todas las operaciones de control necesarias para el sistema que en este caso son un par de lazos de control de tipo proporcional para el líquido destilado y el residuo respectivamente; *derivativas.vi* es en donde se simulan todas las ecuaciones que involucran cambios de concentración, distribución de la mezcla, entre otras, que son variables en el tiempo y están dadas como razones de cambio, este SubVi tiene un excelente desempeño por la velocidad con la que trabaja; *integrateuler.vi* es un Virtual Instrument muy importante, ya que se encarga de realizar todas las operaciones de integración que en este caso están basadas en el método de integración de Euler para formar todos los cambios que se hacen en cada iteración de la simulación.

Cabe resaltar que la posibilidad de poder trabajar con arreglos y ciclos es una característica que hemos tratado de aprovechar lo más posible. Por otro lado descubrimos un gran potencial en LabVIEW, dado que su desempeño, en un diseño tan complicado como este, no se vio afectado. Al menos en tres computadoras de diferentes capacidades, utilizadas para su simulación, nunca



se presentaron complicaciones o dificultades. La anterior es un ejemplo claro de la buena elección que LabVIEW representa para los propósitos de nuestro proyecto.

Por otro lado, en el panel de control (Figura 24) se muestran únicamente 5 de los 20 platos o charolas de la columna, lo anterior por mostrar los más representativos. Como se puede ver en la figura siguiente, existen controles para constante de control proporcional de reflujo y de destilado  $k_{cb}$  y  $k_{cd}$ , respectivamente. También se puede establecer el cambio en el flujo de alimentación, y las gráficas muestran el flujo residual y el flujo destilado, que corresponden a la parte más baja y la parte más alta de la columna, respectivamente. El usuario puede practicar con los diferentes valores para ver el comportamiento del sistema, o bien puede ser sometido a una evaluación, dependiendo del modo de trabajo.

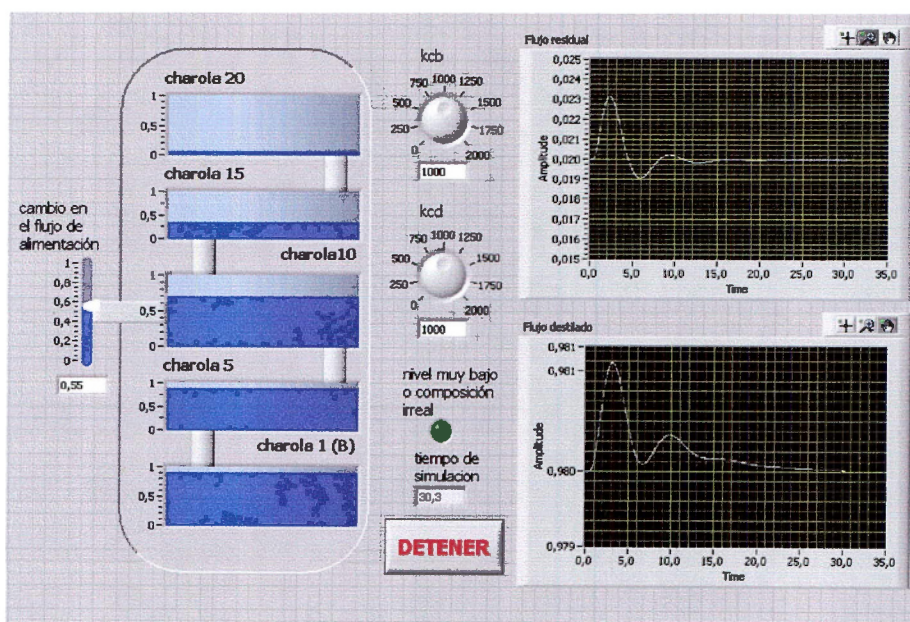


Figura 24: Panel de control de Columna de Destilación Binaria.



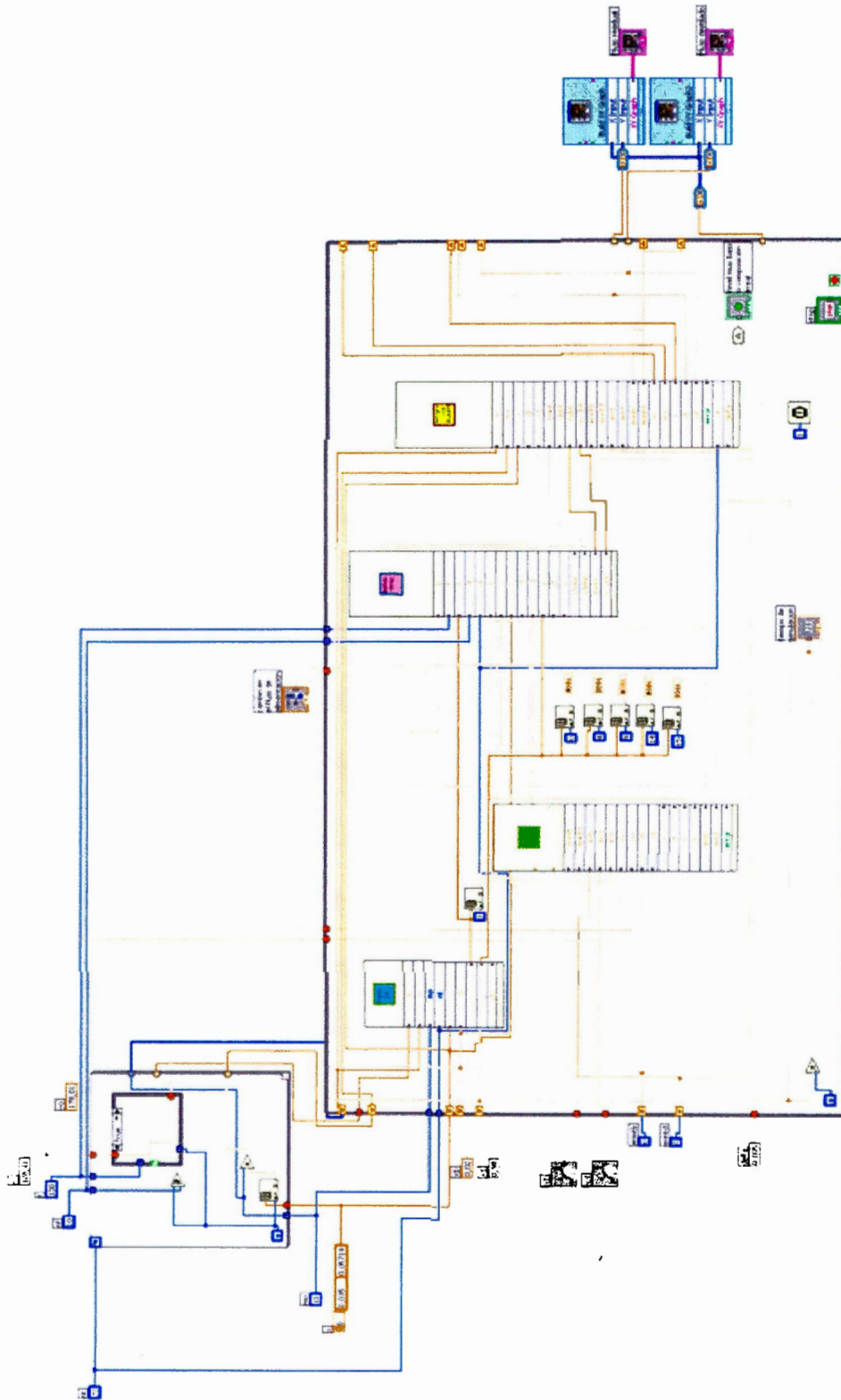


Figura 25: Diagrama a bloques de Columna de Destilación.

## 8.5 Sistema de Frenado ABS

Este proceso se realizó en LabVIEW utilizando el Simulation Tool Box, que brinda una interfase muy similar a Simulink de Matlab, por lo que la programación de este sistema fue muy sencilla.

Todas las pruebas realizadas utilizan una señal repetitiva de referencia de 4 segundos. La referencia de entrada comienza a 0 ft-lb, incrementa linealmente a 1000 ft-lb a los 2 segundos y se mantiene constante en este valor hasta los 4 seg. Después de 4 segundos el estado del sistema de frenado se establece en 0 y la simulación corre una vez mas. La selección del controlador es sugerida por GM y es el siguiente:

$$\frac{u(kT)}{c(kT)} = \frac{0.2(z - 0.95 + 0.02j)(z - 0.95 - 0.02j)}{z(z - 1)} \dots\dots\dots(20)$$

El diagrama a bloques en LabVIEW se muestra a continuación:

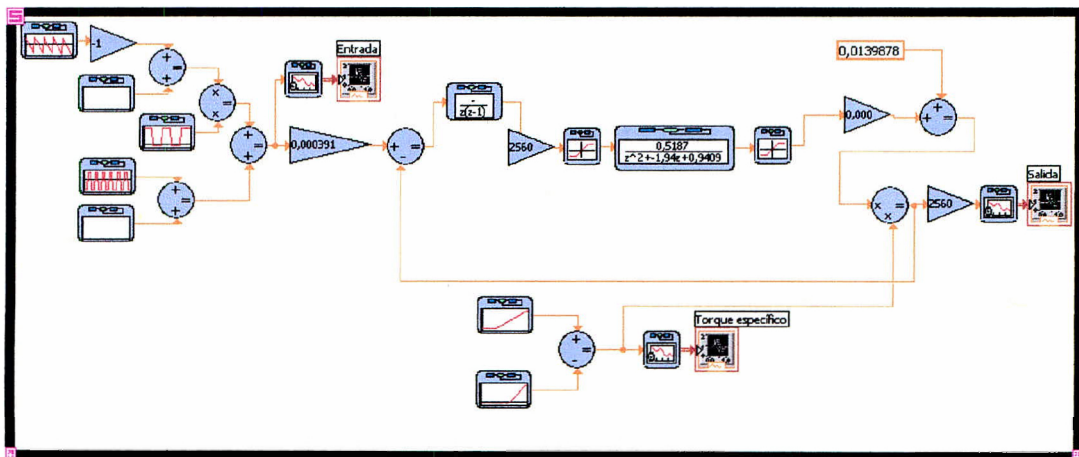


Figura 26: Diagrama a bloques de Sistema de Frenado ABS.

Finalmente los resultados de la simulación y las funciones de entrada se muestran a continuación. En la Figura 27 (siguiente página) observamos la referencia, el torque y finalmente en la respuesta del sistema al controlador.

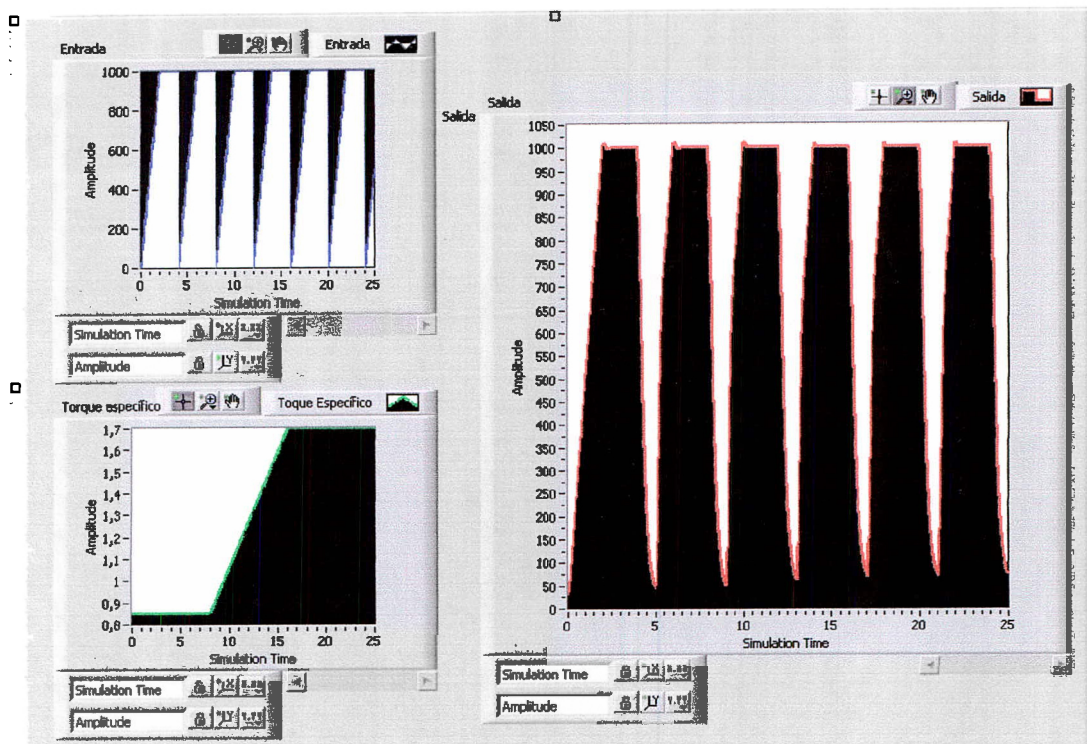


Figura 27: Panel de Control de Sistema de Frenado ABS.

### 8.6 Planta Termoeléctrica de Combustible Fósil

Ya hemos descrito con anterioridad el funcionamiento general de la Planta Termoeléctrica de Combustible Fósil. En esta sección no podemos aun presentar resultados satisfactorios del trabajo realizado con esta planta. La no linealidad de este proceso y la pobre información proporcionada por la fuente de referencia no han permitido avanzar como es deseado.

Los resultados hasta ahora obtenidos presentan gran oscilación en la planta. La presión de vapor que entra a la turbina presenta un comportamiento no deseado, lo que genera lo mismo para el resto del sistema.

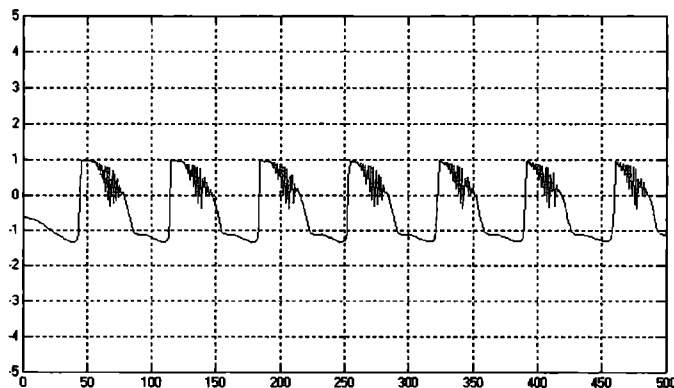


Figura 28: Presión del Vapor que entra a la Turbina.

Como describimos con anterioridad lo ideal en la presión de vapor inyectada a la turbina sería una estabilidad, sin embargo el sistema lejos de estabilizarse oscila y cicla su respuesta.

Este comportamiento se repite para la presión de estrangulamiento (Figura 29) para la salida de la turbina y para el error (Figura 30).

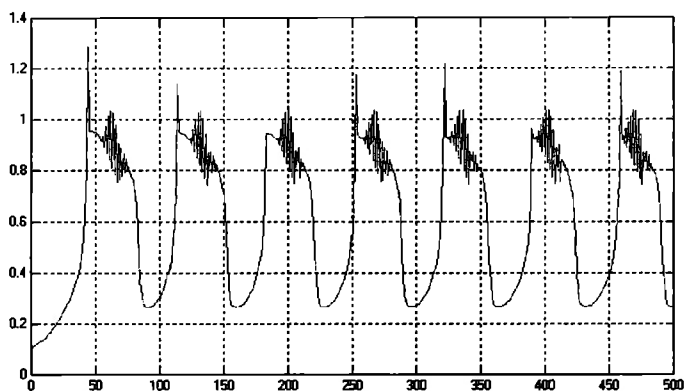


Figura 29: Presión de estrangulamiento.

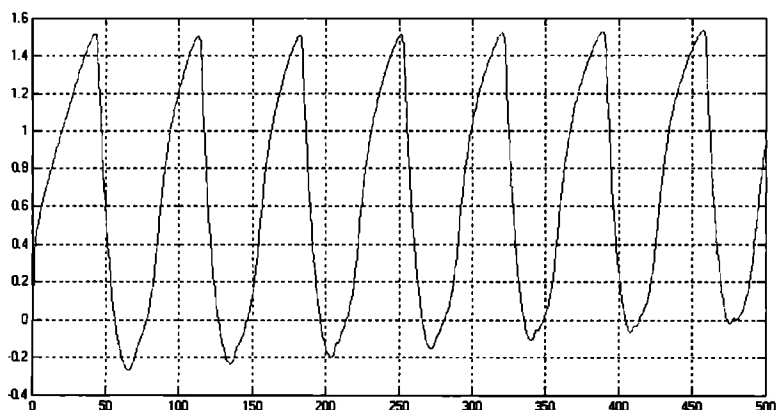


Figura 30: Error del sistema.

Esta última imagen muestra que la entrada al controlador es completamente oscilatoria, es decir, no hemos logrado reducir el error a la entrada del controlador de la turbina, lo que hasta ahora mantiene nuestro trabajo en este proceso detenido.

La intención en el caso de la planta termoeléctrica de combustible fósil ya no es llevarla al lenguaje LabVIEW, sino simplemente lograr controlar las respuestas del sistema para facilitar las labores de futuros creadores de los sistemas en la herramienta de National Instruments.

## 8.7 Sistema Evaluador

Se busca diseñar un sistema que en base a dos resultados característicos de la respuesta a través del tiempo de algún proceso programado y simulado, asigne una calificación al alumno encargado de controlar el proceso.

### 8.7.1 Primer sistema propuesto

El primer sistema propuesto fue un evaluador difuso con tres funciones de membresía por entrada y nueve funciones de orden cero para la salida.

El sistema evaluador es una red difusa con dos entradas (tiempo de establecimiento y sobretiro) y una salida (calificación). La red es de tipo Tagaki – Sugeno. Consta de tres funciones de membresía de tipo gaussiano para las dos entradas. Las funciones de membresía de la salida son nueve polinomios de orden cero, es decir, constantes. Se construyen las ondas gaussianas normalizadas a partir de la fórmula:

$$y = e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \dots\dots\dots(21)$$

Esta distribución recibe también el nombre de distribución normal.

Donde y es la salida, x es la entrada,  $\mu$  es la media y  $\sigma$  es la varianza. En LabVIEW, esta fórmula es programada en un SubVI (gaussiana.vi) que tiene el siguiente diagrama de bloques:

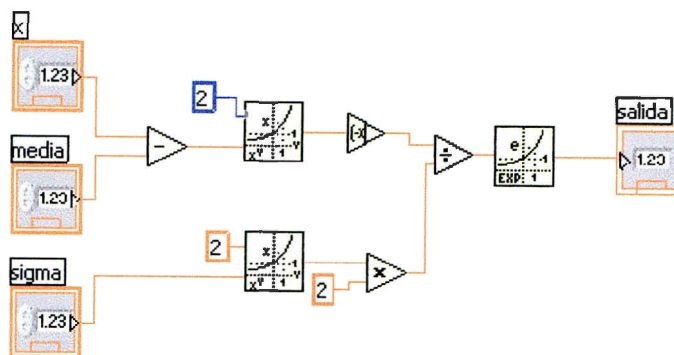


Figura 31: Diagrama de bloques del SubVI gaussiana.vi.

Las entradas del SubVI son la entrada x, la media de la onda y su varianza. En el evaluador difuso se coloca seis veces este SubVI para las tres funciones de membresía de las dos entradas. Para cada entrada, las funciones de membresía son bajo, ideal y alto respectivamente. En el caso del sobretiro, se



usa una varianza de 0.1 y las tres medias asignadas son 0, 0.3 y 0.6 respectivamente, Figura 32.

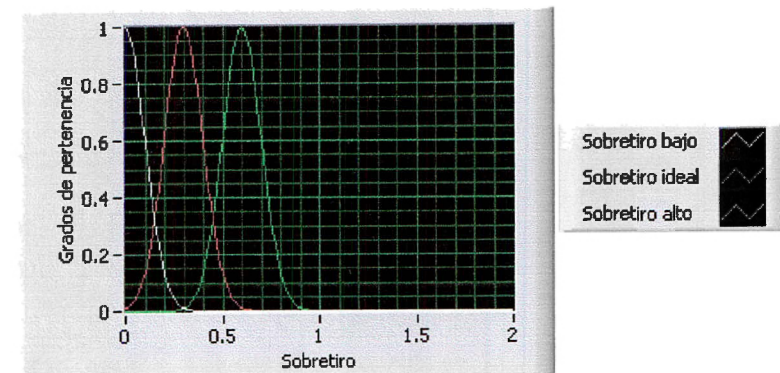


Figura 32: Funciones de membresía para la entrada "sobretiro" de la red difusa.

Para el tiempo de establecimiento se usa una varianza de 2 y las tres medias asignadas son 0, 6.25 y 12.25 respectivamente, Figura 33.

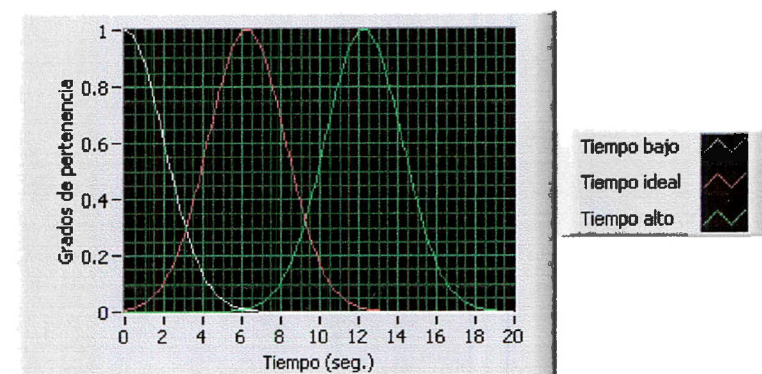


Figura 33: Funciones de membresía para la entrada "tiempo de establecimiento" de la red difusa.

Cabe señalar que la elección de las medias y varianzas de las funciones de membresía de entrada varían con cada planta, este ejemplo está basado en el evaluador diseñado para la planta "Soldadura por Arco", páginas 14 y 28.

En este caso se eligió como respuesta ideal la respuesta al escalón unitario del sistema. El caso ideal considerado es en el que la constante de control  $K$  es igual a 4.5, para la cual el tiempo de establecimiento es de 6.25 segundos y el sobretiro es del 30%.

Para calcular las funciones de las salidas se aplicó una encuesta entre profesores del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del Campus Ciudad de México para representar la experiencia y poder entrenar así al sistema. Esta encuesta arrojó los siguientes resultados:

<b>Función Salida</b>	<b>Valor</b>
K1	78.3
K2	80.0
K3	60.0
K4	76.7
K5	100.0
K6	78.3
K7	43.3
K8	43.3
K9	55.0

Tabla 2: Resultados de Encuesta a Profesores del Campus.

Una vez que las entradas son “fusificadas”, se usan nueve reglas de evaluación para procesar la información las reglas son las siguientes:

1. *Sobretiro bajo and Tiempo de establecimiento bajo, then K1,*
2. *Sobretiro bajo and Tiempo de establecimiento ideal, then K2,*
3. *Sobretiro bajo and Tiempo de establecimiento alto, then K3,*
  
4. *Sobretiro ideal and Tiempo de establecimiento bajo, then K4,*
5. *Sobretiro ideal and Tiempo de establecimiento ideal, then K5,*
6. *Sobretiro ideal and Tiempo de establecimiento alto, then K6,*
  
7. *Sobretiro alto and Tiempo de establecimiento bajo, then K7,*
8. *Sobretiro alto and Tiempo de establecimiento ideal, then K8,*
9. *Sobretiro alto and Tiempo de establecimiento alto, then K9,*

$K_n$  se obtiene de la Tabla 2.

Para la defusificación se emplea la siguiente fórmula:

$$y = \frac{\sum |y = y^i| * y^i}{\sum |y = y^i|} \dots\dots\dots(22)$$

Este evaluador difuso es colocado dentro de un SubVI (evualuadorfuzzy.vi), Figura 34.

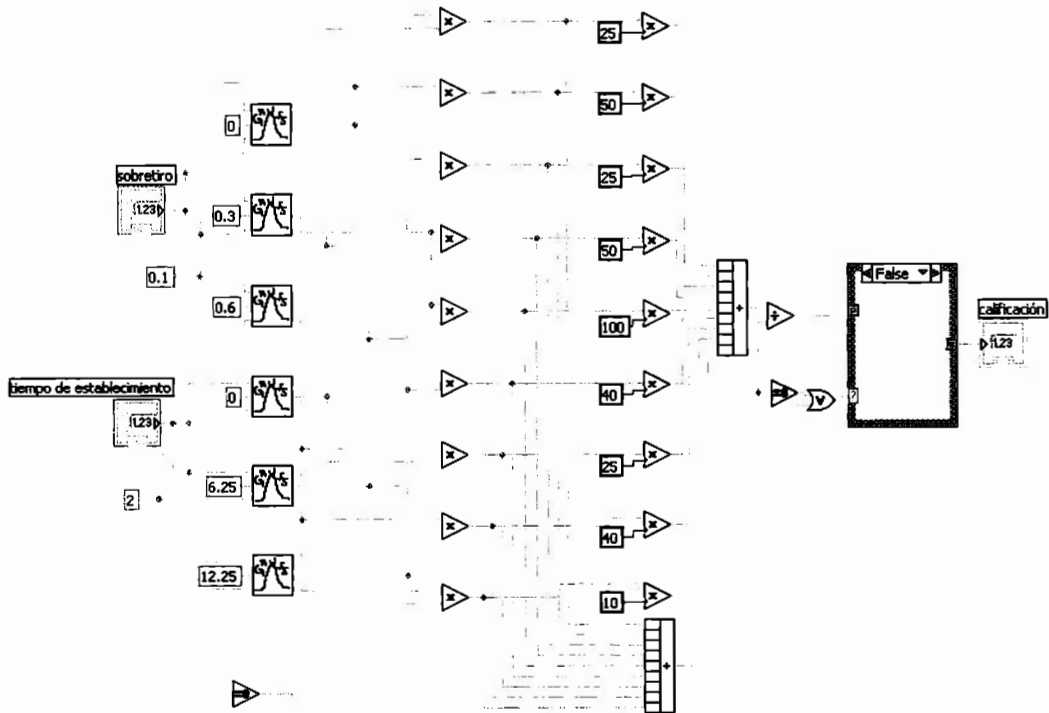


Figura 34: Diagrama de bloques del SubVI evaluadorfuzzy.vi.

Al final del bloque del sistema difuso, se tiene una verificación de error que deja pasar la calificación estimada sin cambios en caso de que no existan errores. En el caso de que si los haya, la calificación asignada es 10.

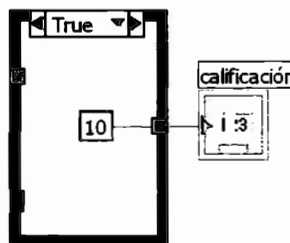


Figura 35: Caso de error para el evaluador difuso.

Los errores son consideraciones de dos casos: que el sistema sea inestable, y que sus parámetros a evaluar no pertenezcan a ninguna función de membresía. Para verificar inestabilidad está predeterminado que el tiempo de establecimiento es cero y esto se verifica con un comparador. Para verificar la no pertenencia a ninguna función de membresía, se compara con cero la sumatoria de los grados de pertenencia. Se usa una operación lógica OR para que sea el parámetro de determinación de nuestra verificación de errores. El caso de inestabilidad es calificado con 10 por obvias razones y el caso de no pertenencia a ninguna función de membresía es evaluado con 10 dado que el sistema arroja infinito para este caso y hay que corregirlo.

Se necesita también un calculador de los resultados paramétricos de la respuesta al escalón unitario del sistema.



El estimador es también parte del SubVI (evaluadorsp.vi) que tiene dos entradas y tres salidas. Las entradas son los arreglos de la función y a evaluar y su correspondiente arreglo de tiempo (los dos arreglos deben tener la misma dimensión). Las salidas son tres indicadores numéricos de sobretiro calculado, tiempo de establecimiento calculado y calificación determinada; la otra salida es un indicador booleano que es cierto cuando el proceso es inestable y falso cuando es estable, ver Figura 36.

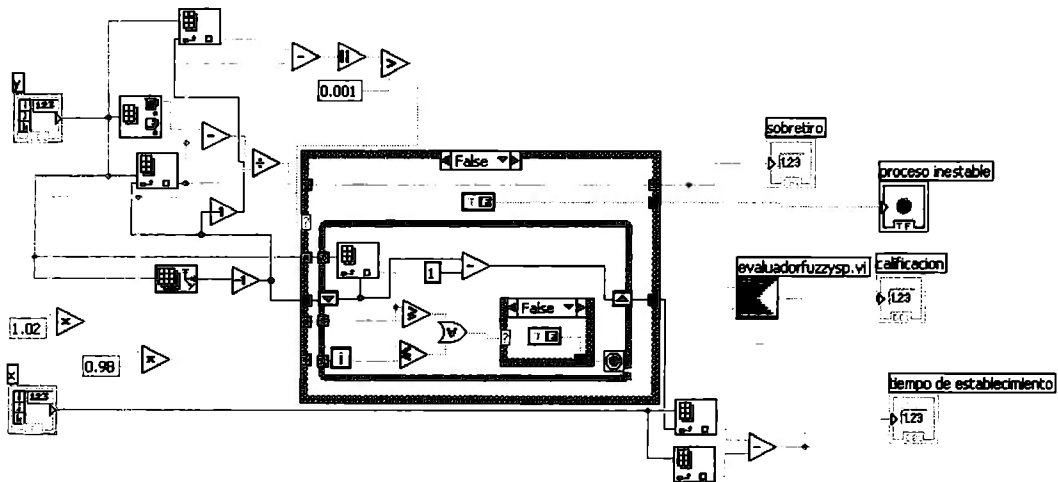


Figura 36: Diagrama de bloques del SubVI evaluadorsp.vi

La estimación del sobretiro es un proceso con varios pasos. Primero se calcula el tamaño (n) del arreglo y su valor máximo. Se busca el valor del arreglo y haciendo referencia al arreglo en su valor correspondiente a n-1. Entonces:

$$sobretiro = \frac{máximo - valor\_final}{valor\_final} \dots\dots\dots(23)$$

Para encontrar el tiempo de establecimiento, se hace un ciclo while en el que se busca desde el valor final hacia el inicial, uno por uno, el primer valor del arreglo y que es mayor o igual al valor final por 1.02 o menor o igual al valor final por 0.98. Se buscan estos valores porque se usa el criterio de estabilidad del 2% del valor final.

En caso de que el proceso sea estable el sobretiro calculado es asignado a su salida, se resta el valor del arreglo de x correspondiente al índice en el que el arreglo y se delimita dentro de una banda de 2% de tolerancia del valor final con el valor inicial del arreglo x y el resultado es asignado a la salida del tiempo de establecimiento; y se asigna un valor de falso al indicador booleano. En caso contrario se manda infinito al sobretiro, cero al tiempo de establecimiento y verdadero al indicador booleano.

Para determinar la estabilidad del proceso, se hace una resta entre los dos últimos valores del arreglo y en caso de que esta resta sea mayor a 0.001 se considera que el proceso es inestable, en caso contrario el proceso es estable.

El evaluador es entonces convertido en un SubVI (evaluadorsp.vi) que tiene por entradas dos arreglos x y y donde y es el desarrollo del proceso a través del tiempo y x es el tiempo del proceso. Las salidas son el sobretiro y tiempo de establecimiento calculados, así como la calificación asignada y un indicador booleano de inestabilidad del proceso. Los arreglos de entrada deben ser unidimensionales de cualquier tamaño pero igual para los dos.

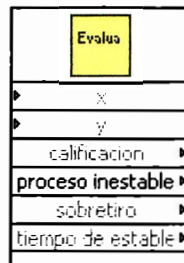


Figura 37: SubVI evaluadorsp.vi

Como mencionamos anteriormente, este evaluador fue probado con la planta Soldadura por arco y se comprobó su funcionalidad correcta.

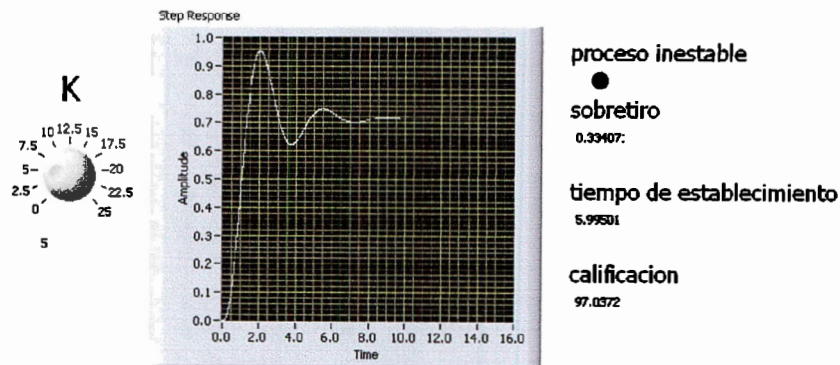


Figura 38: Simulación de la planta con el evaluador.

### 8.7.2 Conclusiones del Primer sistema

Este sistema tuvo el gran problema de que la superficie de evaluación se construía modificando los parámetros manualmente en un panel de LabVIEW y así la superficie tenía limitaciones y no se logró que fuera como se esperaba.

De ahí surgió la idea de crear un algoritmo genético que a partir de la superficie deseada obtuviera los parámetros del evaluador. El algoritmo está explicado en su capítulo correspondiente.

Al desarrollar el algoritmo y hacer pruebas con el primer sistema propuesto del evaluador difuso, el error era muy grande (nunca por debajo del 15%) y las superficies tomaban formas muy distintas a la superficie deseada. Fue entonces cuando se tomó la decisión de darle más parámetros al evaluador para que pudiera desarrollar la superficie deseada.

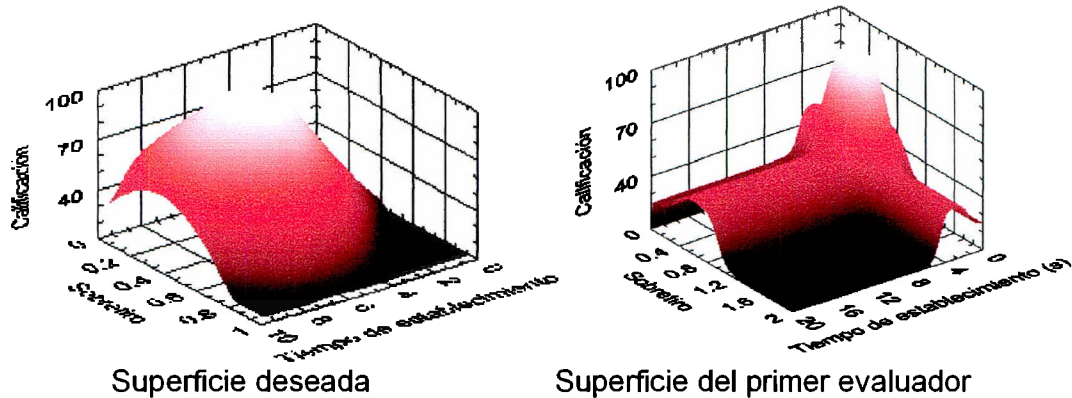


Figura 39: Comparación entre dos tipos de superficie.

Como se observa claramente, la superficie deseada tiene una cúspide circular y la obtenida con el primer evaluador es más bien ovalada, además de que el resto de la superficie no está formada por anillos concéntricos como la deseada.

### 8.7.3 Segundo sistema propuesto

El segundo evaluador es una mejora directa del primero. Se le agregó una función de membresía por entrada. Los dominios de los parámetros se incrementaron y se cambió el orden de las funciones de salida o de defusificación para que ahora fueran de primer orden. Al tener una función de membresía más por entrada y respetando la estructura de las reglas de evaluación, las funciones de salida pasaron de ser nueve a ser dieciséis. Por otra parte también se utilizó la librería de control propia de LabVIEW para estimar todos los resultados paramétricos de las respuestas al escalón unitario de los procesos. En caso de que la simulación requiera analizar una respuesta distinta a la del escalón unitario, se deberán utilizar de nuevo la parte de obtención de estos datos desarrollada para el primer evaluador.

Los resultados fueron alentadores ya que esto le proporcionaba muchas más libertades al algoritmo genético para encontrar la superficie deseada y lograr así errores menores al 1%.

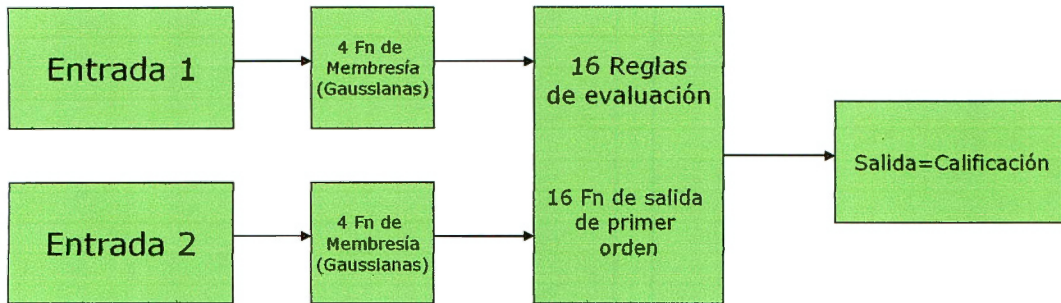


Figura 40: Red Difusa de Evaluación.

### 8.8 Algoritmo genético para encontrar parámetros del evaluador difuso.

El desarrollo del algoritmo genético fue propuesto como solución al problema de la generación de la superficie de evaluación. Se utiliza este algoritmo en lugar de sintonizar manualmente el evaluador hasta encontrar la superficie deseada.

En la Figura 41 se muestra el panel de control del sistema evaluador, donde muestra la superficie ideal, la superficie generada por nuestro sistema y diferentes indicadores y controles. El monitor del error indica como, progresivamente, va disminuyendo.

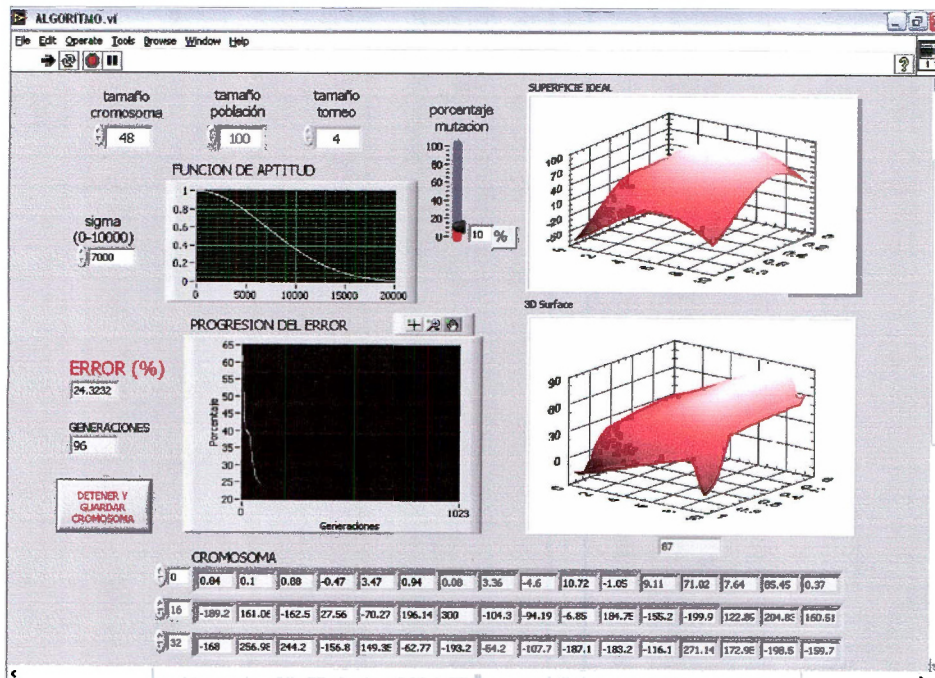


Figura 41: Panel frontal del algoritmo genético programado en LabVIEW.

### 8.8.1 Generación aleatoria de Población Inicial

Se genera una población del tamaño indicado por el controlador correspondiente. Cada cromosoma es generado también con base en su correspondiente controlador. Se genera así una matriz de dimensiones tamaño de población por tamaño de cromosoma. Cada elemento de la matriz es un número entero generado al azar entre 0 y 65535, ver Figura 42.

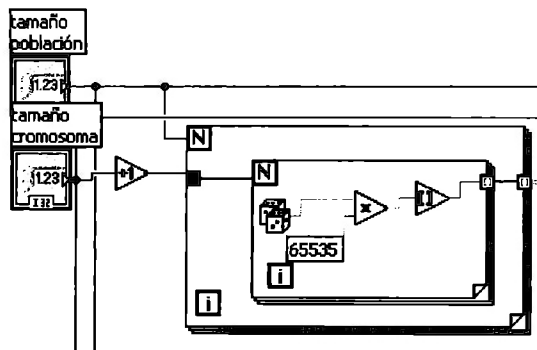


Figura 42: Diagrama a bloques de la sección del algoritmo genético que genera la población inicial.

El número 65535 es elegido porque se convierte a sistema binario en los procesos de reproducción y mutación y se manejan 16 bits de resolución.

Cada cromosoma tiene de tamaño 48 porque cada elemento, que recibe el nombre de gen, es un parámetro del evaluador difuso. Recordemos que tenemos 2 entradas y 4 funciones de membresía por entrada. Cada función de membresía tiene como variables la media y la desviación estándar. Entonces hay 2 variables por 4 funciones de membresía por 2 entradas, o sea, 16 parámetros en la entrada.

Para la salida hay 16 funciones de primer orden. Cada función de salida tiene como variables la ordenada al origen y la pendiente. Es por esto que se tienen 2 variables por 16 funciones, o sea, 32 parámetros en la salida. Esto da un total de 48 parámetros a encontrar para el evaluador y por eso el tamaño es definido en 48.

*La población inicial es evaluada como el resto de las generaciones. El proceso de evaluación es explicado a detalle más adelante.*

### 8.8.2 Operador de Selección

Cada población debe de generar una nueva población mediante la reproducción y para esto se deben de seleccionar los especímenes que se

reproducirán, es decir los padres. En la literatura se encuentran como operadores más comunes la ruleta y el torneo. Se escogió como operador de selección torneo, ver Figura 43.

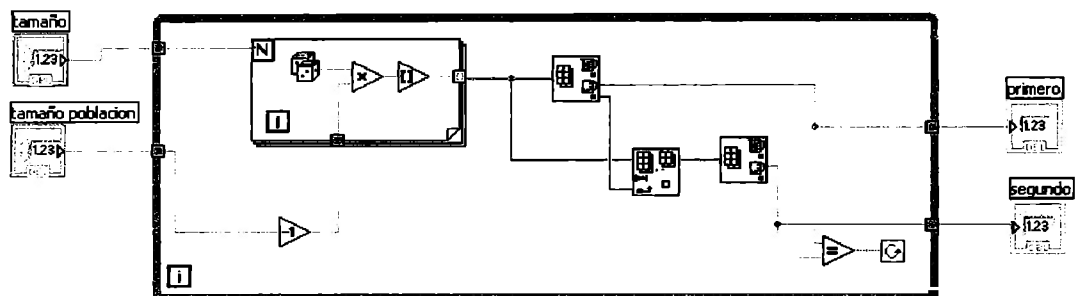


Figura 43: Diagrama a bloques de torneo.vi

El torneo consiste en encontrar de acuerdo al tamaño del torneo especificado en el control del panel frontal, los participantes del torneo al azar. De ellos se tomarán a los dos mejores y ellos serán los padres en el proceso de reproducción.

### 8.8.3 Reproducción

El proceso de reproducción consiste en generar un nuevo espécimen o dos a partir de dos especímenes originales. En nuestro caso generamos dos hijos. Para hacerlo primero se debe convertir a binario cada gen y mantener sus posiciones dentro del cromosoma. Entonces el arreglo en vez de ser de 48 es ahora de 48 por 16 elementos, es decir, 768 dígitos binarios.

Se genera así de manera aleatoria, un pivote, el cual será el punto en el que se partirá tanto al padre como la madre para concatenarlos con el recíproco y así generar dos hijos, como se muestra en la Figura 44.

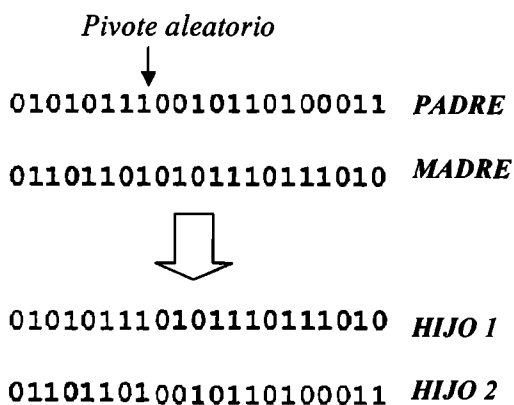


Figura 44: Reproducción del Sistema.

Después de esto, los arreglos se convierten de nuevo a decimal para tener de nuevo un cromosoma de 48 elementos.



En cada generación, este proceso se lleva a cabo el número de veces correspondiente a la mitad del tamaño de la población. El proceso va de la mano con el torneo y se repiten, en nuestro caso, 50 veces para poder tener 100 padres y 100 hijos, ver Figura 45.

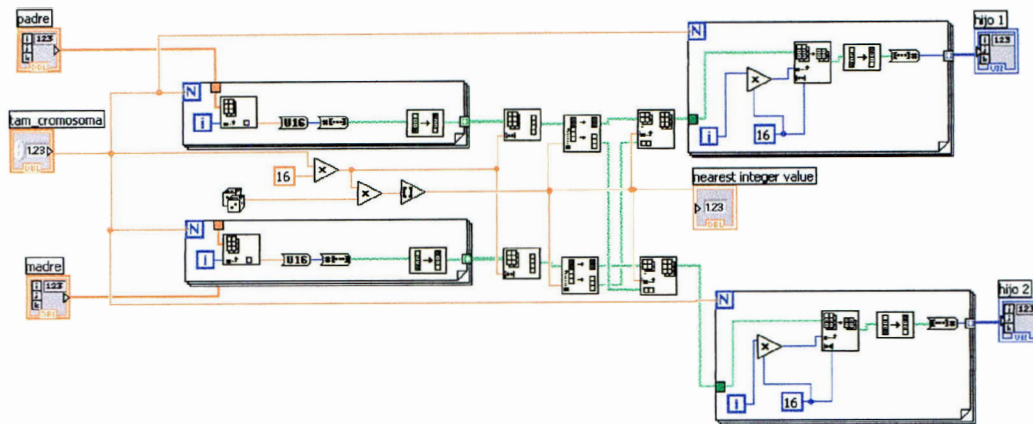


Figura 45: Diagrama a bloques de concepcion.vi

Con este proceso se logra compartir la estructura genética de dos especímenes y generar dos individuos distintos que comparten elementos característicos entre ellos y con sus padres.

#### 8.8.4 Mutación

La mutación consiste en alterar la estructura de un porcentaje de la población en un pequeño grado pero suficiente como para que el espécimen original y el mutado sean distintos.

Para comenzar, igual en la reproducción, se convierten los cromosomas a binario. Dependiendo del porcentaje de mutación indicado en el controlador, se toma la cantidad de cromosomas correspondientes que serán los mutados y se generan posiciones al azar para seleccionar a los candidatos. Para mutar un cromosoma, se genera un número al azar entre 0 y 768 que corresponde a la posición de uno de los bits del cromosoma. Lo siguiente es negar o invertir ese bit. Una vez modificado se vuelve a convertir a decimal.

En la siguiente imagen vemos un segmento de un cromosoma antes y después de la mutación. Como se puede observar, el primer elemento de izquierda a derecha es diferente.

2200	10997	61752	48883	189	5282
2202	10997	61752	48883	189	5282

Figura 46: Segmento de cromosoma, antes y después de la mutación

La diferencia es que de todos los 768 bits se seleccionó uno que formaba parte de esta primera posición decimal que corresponde al segundo bit menos significativo. Su valor inicial era 0 y después de la mutación fue 1. Esta posición corresponde al 2 decimal y entonces la diferencia es de 2 entre el espécimen original y el mutado.

En la siguiente página, la Figura 47 muestra el diagrama a bloques de este proceso.

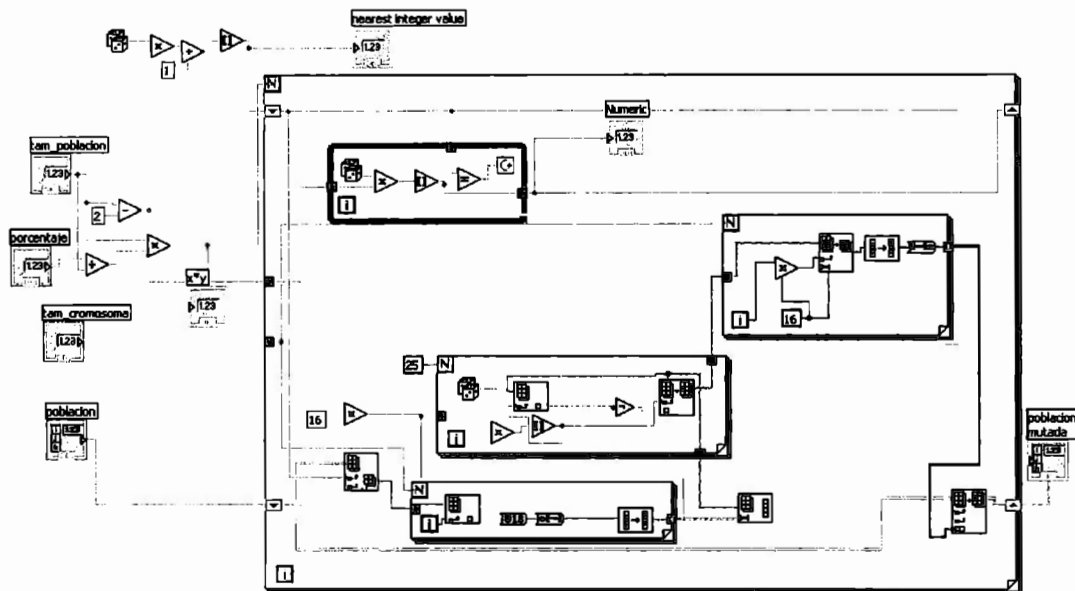


Figura 47: Diagrama a bloques de mutacion.vi

Algo muy importante es que con las características de LabVIEW podemos modificar el porcentaje de mutación mientras el algoritmo corre. Esto le agrega un gran valor a este algoritmo pues si se esta monitoreando el progreso del error, variar la mutación ayuda a disminuir el error. Así cuando se observan problemas por clonación de cromosomas, modificar la mutación ayuda a evitar la clonación y consecuente estancamiento del error.

### 8.8.5 Evaluación

Este proceso corresponde a lo que en la literatura se encuentra como el "fitness" de un cromosoma dentro de una población y es precisamente ver que tan apto es el cromosoma o que tan cerca esta de la solución.

Para revisar su aptitud se sustituyen en el evaluador difuso los distintos parámetros contenidos en el cromosoma en cuestión. Posteriormente se barren las entradas para generar la superficie de respuesta de ese cromosoma.



Esta superficie es restada de la superficie deseada y se integra su valor absoluto. Este error es ponderado por una función de aptitud de tipo gaussiana con media cero y desviación estándar variable por el usuario. Este valor también se puede variar mientras el algoritmo está corriendo.

El error calculado se pone como un elemento en la última columna del cromosoma.

## **8.9 Interfaz gráfica con generación de reportes**

Posterior a estas pruebas, y de acuerdo a los objetivos, se diseñó una interfase gráfica para que el alumno pudiera realizar los ejercicios desde Internet, a través de una interfase web. En la página principal se le pide al alumno su matrícula. El programa la busca en un archivo tipo \*.xls de Microsoft Office Excel, el cual es generado por el profesor con la lista de matrículas y nombres de los alumnos. De este modo el alumno se valida para resolver el ejercicio, Figura 48.

### **SOLDADURA POR ARCO**

Por favor ingrese su matrícula a continuación:

Matrícula ° ●

OK

Figura 48: Pantalla principal de interfase gráfica del evaluador.

Una vez que el alumno es validado, entra a una pantalla de bienvenida al evaluador. En el ejercicio se le pide al alumno calcular el valor de una constante del control para la planta del robot de soldadura por arco, Figura 49.

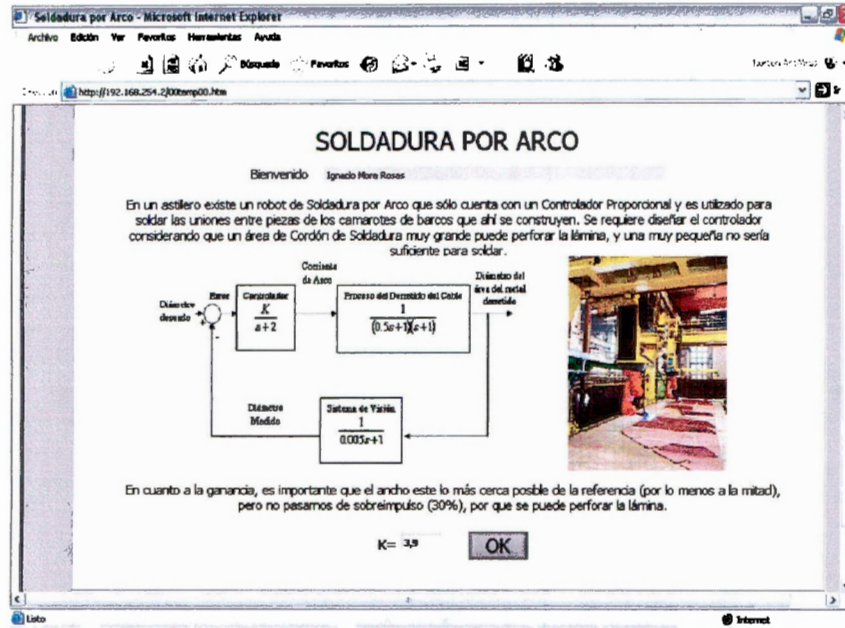


Figura 49: Pantalla de Bienvenida del Evaluador

Una vez que el alumno proporciona este valor, el sistema lo evalúa y después modifica la lista de Excel incluyendo el sobretiro y tiempo de establecimiento resultantes, así como su calificación, ver Figura 50.

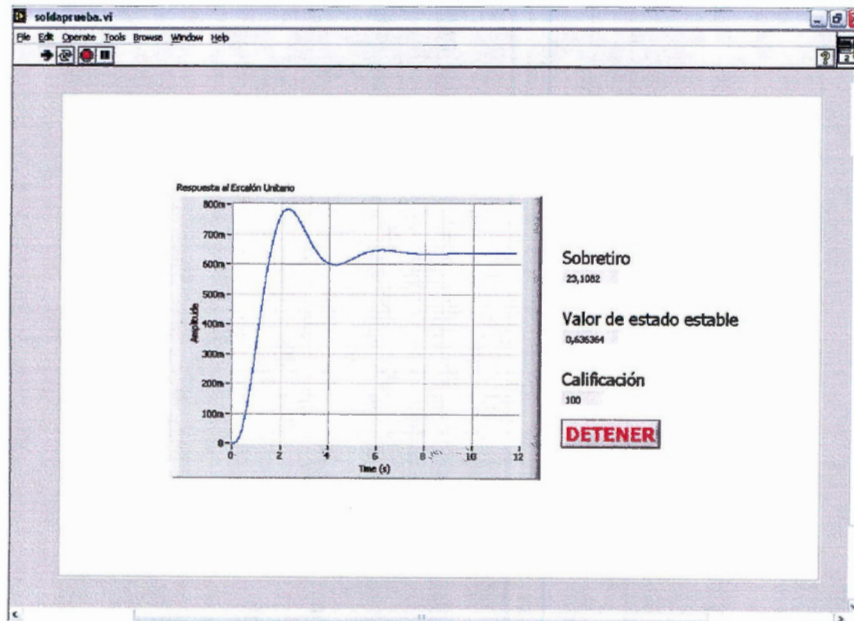


Figura 50. Pantalla de resultados del evaluador.



En caso de que contarse con un registro en el archivo de Excel, el usuario es invalidado, ver Figura 53.

SU EJERCICIO YA FUE RESUELTO  
Y NO PUEDE REPETIRLO

OK

Figura 53: Pantalla de Invalidación de Usuario

## 8.10 El Sistema de Envío de Resultados

En el proceso de evaluación realizado al alumnado es necesario proporcionar, a aquel que resuelve, una constancia del trabajo que realizó con los resultados ante su propuesta de solución así como la calificación a la que se ha hecho acreedor. En el caso de práctica, esto le permite incrementar su habilidad al experimentar constantemente.

Se ha propuesto que el mensaje confirmatorio del proceso así como de la calificación obtenida sea el siguiente:

"[FECHA] [HORA]  
Tu evaluación se realizó de manera adecuada.  
Tu resultado generó el siguiente sobretiro: [XX]. El tiempo de establecimiento fue de [YY] segundos. Tu calificación en base a estos resultados es: [ZZ]"

Con base en esto se procedió a diseñar un Subsistema que permitiera realizar dicha función. Se sabe, por lo tratado con anterioridad, que los procesos simulados entregarán tres resultados. El primero correspondiente a sobretiro, el segundo al tiempo de establecimiento y el tercero a la calificación del alumno. Se sabe también que el formato con que LabVIEW entregará estos datos es el de un registro bidimensional. Con el conocimiento de estos hechos se procede al diseño del subsistema (subVI).

Se comenzó por establecer un control que será asignado como entrada de nuestro VI, este control será numérico para aquí recibir la matrícula del alumno que fue previamente ingresada en el proceso que realizó y guardada en un archivo generado por el proceso mismo. Este controlador numérico es conectado a un bloque "Number

to Decimal String" con la finalidad de obtener el string de la matrícula para manipularlo de acuerdo a nuestras necesidades.

Una vez que esto se ha realizado, se establece una concatenación de strings, predefiniendo dos de ellas para así formular la dirección de correo electrónico del alumno. Este proceso de creación de dirección de correo electrónico se muestra en la figura 54.

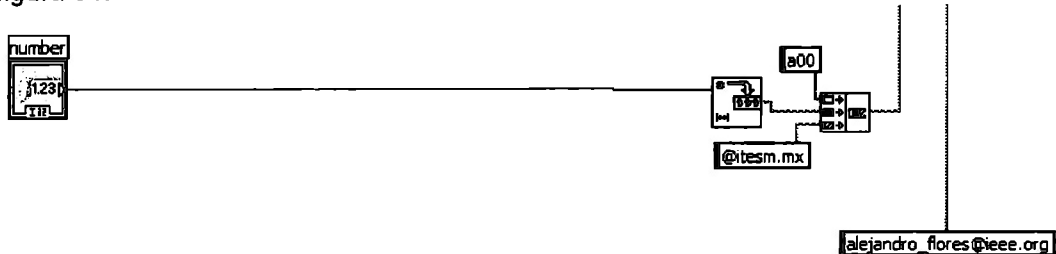


Figura 54. Entrada de matrícula

Ahora bien, los datos generados y la calificación también serán recibidos por el comentado control de datos de tipo arreglo de dos dimensiones. Estos arreglos se indexarán de manera que los datos divididos puedan pasar también a través de un bloque "number to decimal string" que permita después la concatenación de estos datos con strings o cadenas predefinidas para así establecer el texto deseado. Dentro de esta concatenación estarán incluidos los valores de fecha y hora para encabezar el mensaje. Este proceso es el que se muestra en la figura 55.

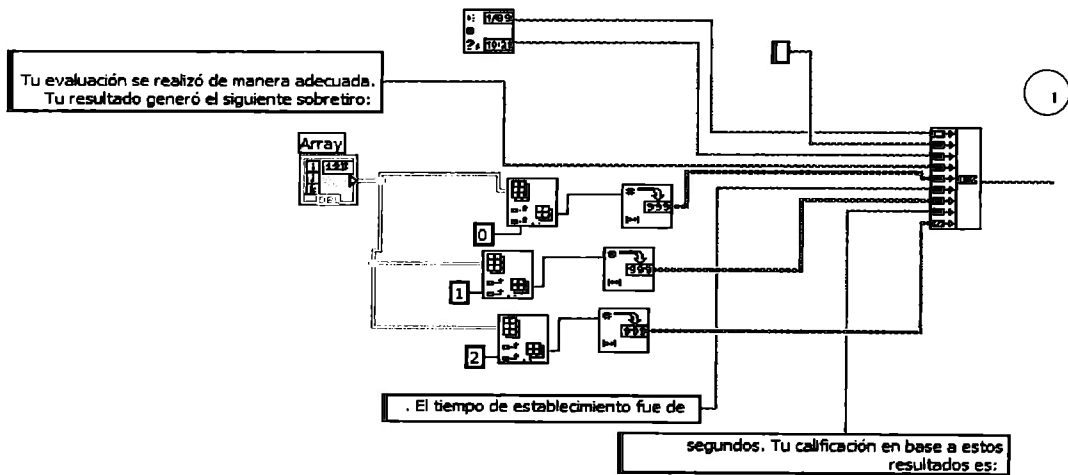


Figura 55: Entrada de resultados de simulación y generación de mensaje.

Ambos datos (dirección y resultados) forman la entrada del bloque de envió de correo electrónico junto con la dirección SMTP del correo electrónico utilizado y el subject del mensaje establecido como constante. (Ver figura 56)

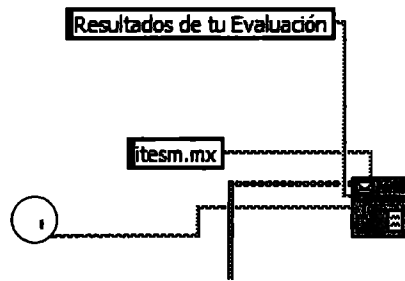


Figura 56: Envío de correo electrónico.

Así los resultados serán enviados al alumno quien podrá tener constancia del trabajo realizado.

## 9 Conclusiones

LabVIEW es un software adecuado para este proyecto porque responde positivamente a sus necesidades, tiene una versatilidad muy grande, por lo que nuestro proyecto puede abarcar muchas posibilidades.

La simulación del control de procesos es de gran ayuda para el entrenamiento académico. Interactuar con procesos como los simulados en este proyecto, permite, al usuario inexperto, desarrollar su habilidad en la Ingeniería de Control, comprender conceptos teóricos y relacionarlos con la práctica.

La inclusión de un evaluador basado en lógica difusa es una innovación que convierte al presente proyecto en una *herramienta didáctica de gran valor*. Diseñar este sistema tan complejo tuvo como intención principal la investigación, además de explorar las capacidades de LabVIEW.

El sistema completo es versátil, se podrán diseñar muchos ejercicios de distintos niveles de complejidad y basados en distintas estrategias de control. El sistema es fácilmente escalable, esta situación fue desde el principio un objetivo del proyecto. La plataforma está lista para que se le agreguen nuevos procesos.

Se pueden llegar a controlar procesos reales de manera remota. Se puede adquirir un módulo de adquisición de datos, que nos permitiría perfectamente controlar procesos a través de una red.

El resultado de la simulación de la mayoría de los procesos fue satisfactorio, salvo por un par de ellos. El primero es el sistema de frenado ABS que se programó con una herramienta incluida en LabVIEW llamada *Simulation ToolBox* que no es compatible con la simulación en tiempo real y mucho menos con controles e indicadores en línea como el resto de los procesos. El segundo caso es la planta termoeléctrica que en un principio nunca se pudo validar con Matlab pues sus resultados nunca fueron los esperados y por la falta de información detallada en las fuentes consultadas, no se pudo solucionar y por lo tanto nunca se programó en LabVIEW.

La paquetería de LabVIEW de Control llamada *Control ToolBox* es ineficiente para simulaciones en tiempo real pues utiliza muchos recursos del computador.

En general esta utilidad junto con el Simulation ToolBox deben de ser revisadas y mejoradas por los programadores del software pues muchas veces resulta mejor manejar ecuaciones diferenciales o en diferencia porque al contrario de las anteriores, LabVIEW si trabaja muy bien con este tipo de métodos numéricos.

Se cumplió con el objetivo de este proyecto y se llegó a los resultados esperados sobre el sistema propuesto inicialmente. A pesar de que un par de procesos no tuvieron resultados satisfactorios, el sistema general funciona perfectamente y se le puede acoplar cualquier proceso programado en LabVIEW que funcione adecuadamente.



## **10 Trabajo futuro**

- 1) Redacción de enunciados en la técnica de Aprendizaje Basado en Problemas para cada uno de los procesos completados, con la finalidad de brindar no sólo entrenamiento práctico, sino también teórico, de esta manera el alumno desarrollará por paralelo
- 2) Generación de plataformas de evaluación para válvula de diafragma, frenos ABS, tres reactores isotérmicos, reactor no isotérmico y columna de destilación.
- 3) Redacción de un artículo para la publicación de este proyecto.

# 11 Bibliografía

- [WEB01] [www.sec.upm.es/agustin/fmrlc/LVF\\_adaptativo.pdf](http://www.sec.upm.es/agustin/fmrlc/LVF_adaptativo.pdf)
- [OVE99] Overstreet, J.-Tzes, A: **An Internet-Based Real-Time Control Engineering Lab**. IEEE Control Systems, Octubre 1999.
- [VEG99] Vega Muro, Alfredo: **El alumno de Ingeniería en el mundo Moderno**; Universidad de Guadalajara Editorial. 1999
- [BIS04] Bishop, Judith: **Java Gently**;  
5<sup>th</sup> Edition, Addison-Wesley 2004.
- [LUY90] Luyben, William L.: **Process Modeling, Simulation, and Control for Chemical Engineers**; 2<sup>nd</sup> Edition, McGraw Hill, 1990.
- [HAR93] Harvey, J. K.: **Implementation of fixed and self-tuning controllers for wheel torque regulation**; Master's thesis, Ohio State Univ., Columbus, 1993.
- [WEI04] Weiss, A. E.: **A Guide to Genetic Algorithms**;  
Diciembre, 2004
- [DOR03] Dorf, Richard: **Modern Control System**; Prentice Hall, 2003
- [LEN99] Lennon, William K.; Passino, Kevin M.: **Intelligent Control for Brake Systems**; IEEE Transactions on Control Systems Technology; Marzo 1999.
- [VAN89] Vani Kola, Anjan Bose, Paul M Anderson: **Power Plant Models For Operator Training Simulations**; IEEE Transactions on Power Systems; Vol. 4, No. 2, Mayo 1989
- [FOG01] David B. Fogel; Zbigniew Michalewicz: **Why Evolutionary Algorithms?**; Current Trends in Theoretical Computer Science; 2001
- [SUG85] Sugeno M.; Takagi T.: **Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control**, IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. 15;1985.
- [BUC93] Buckley J. J.: **Sugeno type controllers are universal controllers**; Fuzzy Sets Syst., vol.53; 1993.