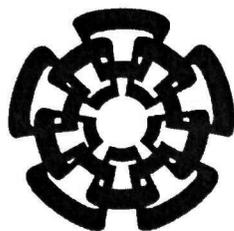




xx(133736.1)



# CINVESTAV

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del I.P.N.  
Unidad Guadalajara

---

## **Diseño de un controlador descentralizado usando lógica difusa para un prototipo de canal de riego**

Tesis que presenta:

**Evaristo Martínez Maldonado**

para obtener el grado de:

**Maestro en Ciencias**

en la especialidad de:

**Ingeniería Eléctrica**

Directores de Tesis

**Dra. Ofelia Begovich Mendoza**

**Dr. Víctor Manuel Ruíz Carmona**

**CINVESTAV IPN**  
USB INFORMACION Y DOCUMENTACION  
SERVICIO DOCUMENTAL

**CINVESTAV**  
IPN  
ADQUISICION  
DE LIBROS

Guadalajara, Jalisco, Abril de 2007.

CLAS	TK165.68 .M37 2007
ADQUIS	SSI-454
FECHA	7-IX-2007
PROCE	Don. - 2007

ID: 133274-2001

# **Diseño de un controlador descentralizado usando lógica difusa para un prototipo de canal de riego**

**Tesis de Maestría en Ciencias  
Ingeniería Eléctrica**

Por:

**Evaristo Martínez Maldonado**  
Ingeniero Eléctrico

Instituto Tecnológico de Chihuahua 1995-2000

Becario de CONACYT, expediente no. 169912

Directores de Tesis

**Dra. Ofelia Begovich Mendoza**  
**Dr. Víctor Manuel Ruíz Carmona**

CINVESTAV del IPN Unidad Guadalajara, Abril de 2007.

# Índice general

**Resumen**

**Resume**

**Agradecimientos**

<b>1. Introducción</b>	1
<b>2. Terminología y Modelo no Lineal</b>	6
2.1. Términos utilizados en canales de riego	6
2.2. Métodos usuales de operación	7
2.3. Conceptos de control	9
2.4 Comportamiento dinámico no lineal: Ecuaciones de Saint Venant	10
<b>3. Descripción del Prototipo de Canal</b>	12
3.1. Aspectos generales	12
3.2. Instrumentación	13
3.3. Características del software	15
3.4 Características del “software”de simulación	15
<b>4. Identificación</b>	16
4.1. Identificación de los modelos	17
4.2. Matriz de función de transferencia	21

<b>5. Problema de Control y Diseño del Controlador</b>	23
5.1. Preliminares del control LQG	23
5.2. Preliminares del control descentralizado	25
5.3. Preliminares de lógica difusa	29
5.4. Rechazo de perturbaciones	31
5.5. Modelos en variables de estado y diseño del controlador	32
5.6. Especificaciones para el diseño del controlador	35
5.7. Diseño de las ganancias LQ	36
5.8. Diseño de la conmutación con lógica difusa	37
<b>6. Resultados en simulación</b>	40
6.1. Banco de controladores con lógica difusa	41
6.2. Error máximo	48
6.3. Comparación con un controlador LQG	51
6.4. Comparación entre bancos de controladores	53
<b>7. Conclusiones y Trabajo Futuro</b>	57
<b>Referencias</b>	59
<b>Apéndice</b>	61
<b>1. Programa de lenguaje FORTRAN</b>	61
<b>2. Cálculos en MATLAB</b>	78

# **Diseño de un controlador descentralizado usando lógica difusa para un prototipo de canal de riego**

Evaristo Martínez Maldonado  
CINVESTAV del IPN  
Unidad Guadalajara

## **Resumen**

En el presente trabajo se diseña un controlador descentralizado, para un prototipo de canal de riego. Los controladores locales se diseñan como un banco de controladores LQG los cuales se conmutan mediante lógica difusa. Se regulan los niveles aguas abajo de cada tramo, mediante la acción de la compuerta aguas abajo del mismo tramo. Los resultados de simulación muestran la eficiencia del controlador descentralizado ante perturbaciones del flujo de entrada de magnitud importante.

## **Resume**

In the present work is designed a decentralized controller, for an irrigation canal prototype. Gain scheduling technique is used to design each local controller, but instead of using traditional logic, fuzzy logic is used. The aim is regulate the downstream level of each pool on using the downstream control gate position of each pool. The obtained closed-loop results show good performance in presence of big inflow variation.

# Agradecimientos

Todo mi agradecimiento a Dios por permitirme llegar a este momento y por todo lo que he recibido de Él.

Agradezco a toda mi familia, a mi papá que siempre me alentó con su ejemplo en el trabajo y sus consejos, a mi hermana Eugenia y Alberto su esposo por darme su apoyo incondicional en todo sentido.

Agradezco a Rosy, mi futura esposa, por sus palabras de aliento y todo el apoyo que me brindó con tanto cariño en la conclusión de este trabajo.

Agradezco a mis asesores de tesis, la Dra. Ofelia Begovich M. y el Dr. Víctor Manuel Ruiz C. por su ayuda en la realización de esta tesis, así como también a todos los doctores de control automático que me compartieron sus conocimientos.

Agradezco a mis amigos: de manera especial a Juan Carlos Felipe por su valiosísima ayuda para la realización de esta tesis, a Manuel Ávila por su motivación, a Jorge Salinas y a todos los compañeros de control automático, a Laura por su valioso apoyo, a Cocó, a Juan Carlos, a Verito y a Yola que me han brindado su sincera amistad.

Agradezco a CONACYT y CINVESTAV por brindarme el apoyo económico y académico.

# Capítulo 1

## Introducción

La correcta administración y distribución de los recursos hidráulicos de un país juega un papel muy importante debido al impacto social y económico. La agricultura es el más grande consumidor de agua y para distribuirla en las tierras de riego se requiere de extensas redes de canales para transportarla desde las reservas hasta los lugares donde va a ser utilizada. Estos canales deben satisfacer la demanda de agua a pesar de las condiciones climáticas, limitaciones físicas e hidráulicas de los canales de riego. Esto es un gran reto pues actualmente los canales de riego en México son operados en forma manual.

En México se tienen aproximadamente 20 millones de hectáreas dedicadas a la agricultura; de éstas, aproximadamente 6 millones se encuentran bajo riego en Distritos y Unidades de Riego. Éstas representan el 30% de la superficie dedicada a la agricultura y generan el 54% de la producción agrícola total y el 70% de las exportaciones en este rubro. En los Distritos de Riego se proporciona el servicio de riego a aproximadamente 531,000 agricultores, agrupados en 447 Asociaciones de Usuarios [14].

Para mejorar la calidad e incrementar la producción agrícola, es importante hacer más eficientes las áreas dedicadas a la agricultura, por una parte incrementando las áreas de riego y por otra, mejorando el uso de la infraestructura de las áreas que ya prestan el servicio de riego. Por lo tanto, es muy importante mejorar la eficiencia de los actuales sistemas de distribución de agua en México. [5]

En las décadas pasadas se han realizado muchos esfuerzos en investigaciones dedicadas al control de flujo de agua en canales abiertos. Se han propuesto un gran número de procedimientos de regulación. Una clasificación muy detallada ha sido hecha por Malaterre en su tesis de doctorado [6]. Esos métodos se clasifican por la elección de:

*Variables controladas:* descargas, niveles de agua o variaciones de niveles de agua: niveles aguas arriba, aguas abajo o en un punto medio del tramo; volúmenes o variaciones de volumen.

*Variables medidas:* Generalmente niveles y flujos de agua.

*Variables de control:* apertura de compuertas o variaciones de aperturas, descarga o variaciones de descarga.

*Lógica de control:* Lazo abierto o lazo cerrado, centralizado o descentralizado. [5]

Otras diferencias entre los métodos mencionados es la definición del modelo usado para la síntesis del control. Malaterre dividió los diferentes modelos en dos categorías [6]. La primera está basada en la construcción de los modelos a partir de leyes físicas donde las variables consideradas tienen un significado físico. En la segunda se hacen representaciones matemáticas del tipo caja negra. Para el primer caso, el comportamiento del agua en un canal abierto puede ser descrito por las ecuaciones de Saint-Venant; éstas son ecuaciones diferenciales parciales no lineales, lo que hace que el análisis sea muy complejo, es por esta razón que los trabajos en este sentido son escasos. El segundo tipo está basado en la identificación de funciones de transferencia entre las entradas y salidas consideradas, formando así una matriz de transferencia. Los inconvenientes de este procedimiento es que el vector de estados no tiene significado físico, además que el modelo lineal no es válido en todo el rango de operación. [5]

Los canales son sistemas dinámicos que involucran un gran número de variables: niveles aguas arriba, aguas abajo o en medio de cada tramo, aperturas de las compuertas, flujo de entrada al canal, descarga de salida, etc., por lo que resulta un trabajo complejo el control de estos sistemas.

Para automatizar un canal es posible tomar dos caminos: control centralizado y control descentralizado.

En el caso de un control centralizado, la totalidad de las mediciones de las variables del canal, tal como niveles de agua en posiciones seleccionadas, son dirigidas a una unidad central la cual, simultáneamente, con base en estas mediciones, sintetiza comandos adecuados para manipular todas las estructuras de control. El control Centralizado contempla las interacciones entre todas las estructuras de control y los correspondientes estados del canal, permitiendo así que el controlador cuente con mayor información para realizar su tarea. La principal desventaja del Control Centralizado está asociada al costo en la implementación y mantenimiento, ya que implica una alta telemetría.

Uno de los trabajos en el que se presenta un control centralizado se encuentra en la tesis de Jorge Alberto Salinas [10], en el cuál diseñó e implementó un banco de controladores LQG utilizando lógica difusa para conmutar tres de estos controladores. Este controlador presenta la ventaja de poder rechazar perturbaciones de flujo de mayor rango a las rechazadas por un sólo controlador. Los resultados obtenidos al implementarlo en el prototipo de canal de riego del IMTA muestran las ventajas mencionadas.

El Control Descentralizado regula los niveles de agua de cada tramo tomando como entrada al mismo, únicamente el nivel del tramo en cuestión, y como salida, por ejemplo, la posición de la compuerta aguas arriba de dicho tramo. Esto es, se usa sólo la información de los sensores particulares de cada tramo, como retroalimentación, con el objetivo de manipular las salidas específicas en dicho tramo. Lo anterior tiene como ventaja que existe un controlador independiente en cada tramo con la consecuente disminución en la telemetría. Intentar controlar un canal de varios tramos por medio de una serie de controladores locales puede parecer poco eficiente en comparación con un Controlador Centralizado, ya que las interacciones no consideradas explícitamente pueden provocar comportamientos no deseados. Sin embargo el control descentralizado es la opción más viable para grandes sistemas de canales de Riego, pues reducen la telemetría, y los riesgos

de perder comunicación debido a la topografía del terreno y/o cambios climáticos (estática), presentes en un control centralizado, como se puede constatar en [5] y [8].

En la tesis desarrollada por Juan Carlos Felipe [5] se diseña e implementa en tiempo real un control descentralizado para el prototipo de canal de riego de cuatro tramos del IMTA, en el cual se controla el nivel aguas abajo de cada tramo mediante la acción de la compuerta aguas abajo de cada tramo alrededor de un punto de operación. Cada controlador local se diseña con una técnica LQG. En ese trabajo realiza un análisis de las interacciones que se presentan entre los diferentes tramos del prototipo de canal del IMTA utilizando la medida conocida como RGA (Relative Gain Array). En ese trabajo se encuentra que las interacciones entre los diferentes tramos pueden considerarse mínimas y que entonces es factible el diseño de un control descentralizado. Las pequeñas interacciones presentes son tomadas en cuenta modelándolas como perturbaciones externas, e incluyendo un integrador dentro de los controladores locales para rechazar su efecto.

En [8] se reporta un proyecto pivote realizado en Australia, en donde se implementó con éxito un control descentralizado con controles locales PI con retroalimentación en cada tramo, en un canal que cuenta con 500 Km. de redes principales, alrededor de 500 estructuras de control y con más de 600 tomas para riego, con esta red de canales se riegan  $1.1 \text{ Gm}^2$  de tierras de cultivo y se distribuye anualmente alrededor de  $0.6 \text{ Gm}^3$  de agua. Esto pone de manifiesto la utilidad en un distrito de riego de los controles descentralizados.

En este trabajo de tesis se diseña y se implementa un control descentralizado, utilizando un banco de controladores LQG conmutados con lógica difusa para un prototipo de canal de riego del IMTA, en el cual se controla el nivel aguas abajo de cada tramo mediante la acción de la compuerta aguas abajo de cada tramo. Esta investigación es motivada por el buen desempeño que se presenta en [10] al conmutar con lógica difusa un banco de controladores, aunado a las ventajas que presenta en la práctica el control descentralizado en [5] y [8].

En el capítulo 2, se presenta la terminología empleada en canales de riego, así como los métodos más usuales de operación y regulación. Además se presentan las ecuaciones de Saint Venant que modelan la dinámica del flujo y el nivel en a lo largo del canal.

En el capítulo 3, se describen las características del software de simulación y del prototipo de canal de riego del IMTA.

En el capítulo 4, se describe el procedimiento de identificación para obtener los modelos lineales del sistema mediante la aplicación de entradas de tipo escalón, para 3 diferentes modelos.

En el capítulo 5, se presenta una descripción del control “LQG”, los aspectos preliminares de Lógica difusa, del Control Descentralizado y el Rechazo de Perturbaciones. También se realiza el diseño del controlador a utilizar.

En el capítulo 6, se muestran primeramente los resultados logrados, las gráficas obtenidas y posteriormente se muestran los resultados de una comparación entre el Banco de Controladores Conmutados con Lógica Difusa desarrollado en esta tesis y un Banco de Controladores del mismo tipo pero sin utilizar Lógica Difusa para su conmutación.

En el capítulo 7, se presentan las conclusiones y trabajo futuro.

# Capítulo 2

## Terminología y Modelo No Lineal

En este capítulo se presenta la terminología y los conceptos básicos para entender el trabajo realizado en esta tesis, así como la operación y funcionamiento de canales abiertos de riego. También se comenta brevemente el modelo matemático que describe el comportamiento del flujo de agua en canales de riego abiertos.

### 2.1. Términos utilizados en canales de riego [5]

*Canal abierto.* Son aquellos en los que la superficie libre de agua se encuentra a presión atmosférica. En la figura 2.1 se muestra un esquema de un canal abierto.

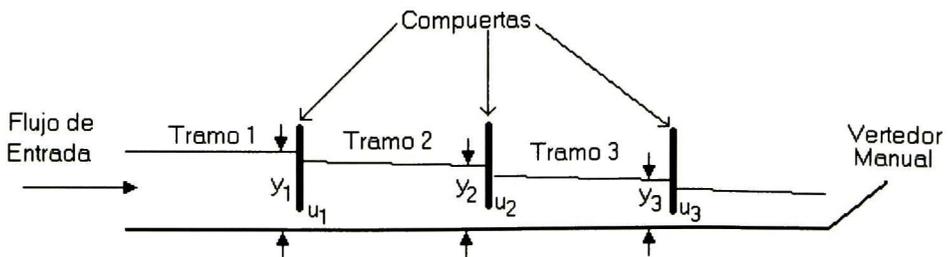


Figura 2.1 Esquema de un canal abierto

*Perímetro mojado.* Es la suma de las distancias de las paredes y la base de la sección transversal del canal.

*Drenajes.* Red de canales, tuberías y conductos que retiran el agua no deseada de una región determinada.

*Plantilla.* Es la base o fondo del canal a partir de la cual se mide el tirante.

*Tomas laterales.* Son salidas de agua, ubicadas usualmente aguas arriba de las compuertas de control y son usadas para extracciones de los usuarios del agua.

*Coefficiente de Manning.* Es un dato experimental que se asocia a la fricción entre el agua y las paredes del canal.

*Estructuras de control.* Es la obra civil equipada con compuertas y vertedores ubicada en algunos puntos a lo largo del canal y su objetivo es controlar el agua que circula por éste.

*Tirante.* Es la altura del nivel de agua en un punto determinado, medido con respecto a la plantilla o base del canal.

*Aguas arriba y aguas abajo.* Estos términos se emplean para indicar la posición de algún dato u objeto del canal, con respecto a un punto, este punto puede ser usualmente un tramo o una compuerta.

*Programa de riego.* Es el calendario de la entrega del agua. Éste se determina a partir de las solicitudes de riego de los usuarios y la capacidad de conducción de los canales.

## 2.2. Métodos usuales de operación

Los métodos de operación determinan el nivel a lo largo de cada tramo del canal, el cual se hace igual a una referencia para conducir en forma segura el agua en la red de canales. El método usado determinará la variable a controlar, por lo tanto también determinará la dinámica entre las variables de entrada y la salida a controlar.

Estos métodos se clasifican por la ubicación del tirante que se desea mantener constante a lo largo de cada tramo del canal. Al punto donde se ubica este tirante se le llama punto pivote, porque precisamente éste es el punto en el que el nivel del tirante no debe moverse, mientras que la pendiente de la superficie del agua, sí lo hace. Los tres métodos más comunes, clasificados por el punto en el que se localiza el punto pivote, son: nivel constante aguas arriba, nivel constante aguas abajo y volumen constante.

**Nivel constante aguas arriba**

Este método de operación se caracteriza por mantener constante el tirante aguas arriba al inicio de cada tramo. Con este método de operación, las tomas laterales deben estar ubicadas también al inicio de cada tramo y la superficie del agua varía su pendiente en relación a este punto pivote. Figura 2.2

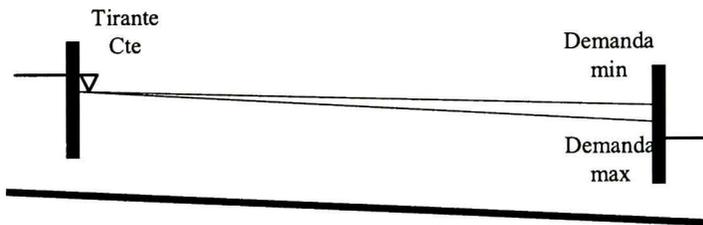


Figura 2.2 Método de operación: nivel constante aguas arriba

**Nivel constante aguas abajo**

En este método de operación se mantiene constante el tirante aguas abajo al final de cada tramo. Por lo anterior, las tomas laterales deben estar ubicadas también al final de cada tramo. Este método es el más usado en la operación manual de los canales. La superficie del agua varía su pendiente en relación a este punto pivote. Figura 2.3

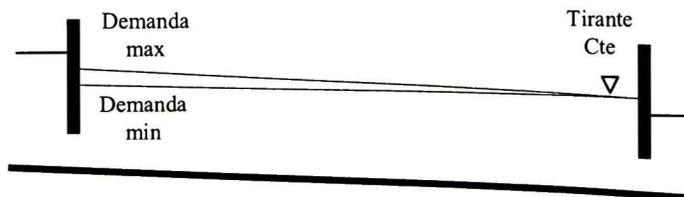


Figura 2.3 Método de operación: nivel constante aguas abajo

### Volumen constante

Este método se caracteriza por mantener constante el volumen de agua en cada tramo del canal; para lograr esto se pretende que el nivel en un punto más o menos a la mitad del tramo se mantenga constante, logrando de esta manera que la superficie del agua se mueva alrededor de este punto, quedando unas pequeñas porciones para el almacenamiento del agua, ubicadas en la mitad de la parte superior y en la mitad de la parte inferior, separadas por el punto pivote. Si el flujo disminuye, el volumen de la cuña superior disminuye y el volumen de la cuña inferior aumenta, pero si el flujo aumenta, reacciona de forma contraria. El método de operación de volumen constante es el que presenta una velocidad de respuesta más alta, ya que no es necesario cambiar el volumen de agua en cada tramo para cambiar el gasto que circula. Figura 2.4

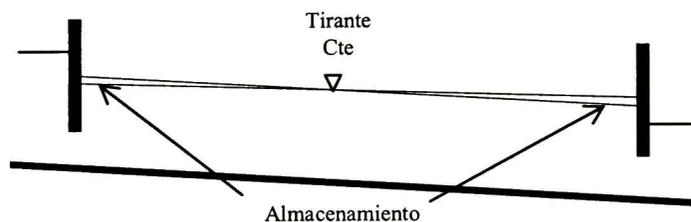


Figura 2.4 Método de operación: volumen constante

## 2.3. Conceptos de control

El concepto de regulación utilizado en canales de riego se define en función de la ubicación de la información usada por el esquema de control respecto a la estructura de control. Los conceptos de regulación se clasificarán como sigue: Control aguas arriba, control aguas abajo y control mixto.

### Control aguas arriba

El movimiento de la estructura de control (compuerta) está determinado por la información que se recibe de alguna variable ubicada aguas arriba de la compuerta. Esto se lleva a cabo mediante sensores que se ubican aguas arriba de la compuerta.

### Control aguas abajo

Los ajustes en la estructura de control están basados en la información que se recibe de sensores ubicados aguas abajo de la compuerta, o por información de alguna variable ubicada aguas abajo de la estructura de control.

### Control mixto

En este concepto de control, la estructura de control se mueve debido a la información que se obtiene de variables localizadas aguas abajo y aguas arriba de la compuerta.

La ventaja que se tiene con este método es la de transferir la demanda de los usuarios a la fuente de abastecimiento, que se ubica aguas arriba del canal.

Las variables de control usadas en la operación de canales son la posición de la compuerta y el gasto que por ésta circula. La variable de control más usada es la posición de la compuerta.

## 2.4. Comportamiento dinámico no lineal: ecuaciones de Saint Venant

El flujo de agua en un canal abierto es descrito por dos ecuaciones diferenciales parciales no lineales:

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{T} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{q}{T} = 0$$

Ecuación dinámica de momento (cantidad de movimiento)

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left( \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \left( \frac{\partial y}{\partial x} - S_0 + S_f \right) = 0$$

donde:

$Q$  = gasto o caudal a través del canal ( $m^3/s$ ).

$T$  = ancho de la superficie del agua ( $m$ ).

$y$  = altura del agua ( $m$ ).

$q$  = flujo lateral por unidad de longitud ( $(m^3/s)/m$ ).

$x$  = distancia a lo largo del canal ( $m$ ).

$t$  = tiempo ( $s$ ).

$g$  = aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ).

$S_0$  = pendiente del fondo del canal.

$S_f$  = fricción de la pendiente debida al tipo de material con que está construido el canal.

$A$  = área de la sección transversal del canal ( $m^2$ ).

El flujo a través de una compuerta es gobernada por una ecuación de orificio:

$$Q_{comp} = C_d W a \sqrt{2g(y_u - y_d)}$$

donde:

$Q_{comp}$  es el flujo a través de la compuerta ( $m^3/s$ )

$C_d$  es el coeficiente de descarga ( $m^{-1/2}/s$ )

$W$  es el ancho de la compuerta ( $m^2$ )

$a$  es la apertura de la compuerta ( $m$ )

$g$  es la fuerza de gravedad

$y_u$  es la profundidad aguas arriba de la compuerta ( $m$ )

$y_d$  es la profundidad aguas abajo de la compuerta ( $m$ )

## Capítulo 3

# Descripción del prototipo de canal y del software de simulación.

### 3.1. Aspectos Generales [5]

El prototipo de canal con el cual se trabaja es un canal experimental ubicado en el Laboratorio de Hidráulica “Dr. Enzo Levi” del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) en Cuernavaca, Morelos. Es un prototipo de geometría rectangular con pendiente cero, tiene una base construida de concreto y sus paredes son de cristal; tiene una longitud total de cincuenta metros, aproximadamente, dividida en cuatro tramos por tres compuertas deslizantes; su base es de 0.64 m y su altura de 1 m, además no cuenta con extracciones laterales. Las tres estructuras de control deslizantes (compuertas) están ubicadas a 13.0 m, 25.0 m y 37 m. (figura 3.1). Las dimensiones de éstas son: 0.45 m de ancho y 1.0 m de altura. El flujo de entrada máximo del prototipo es de 240 L/s. Cuenta con un coeficiente de Manning de 0.01.

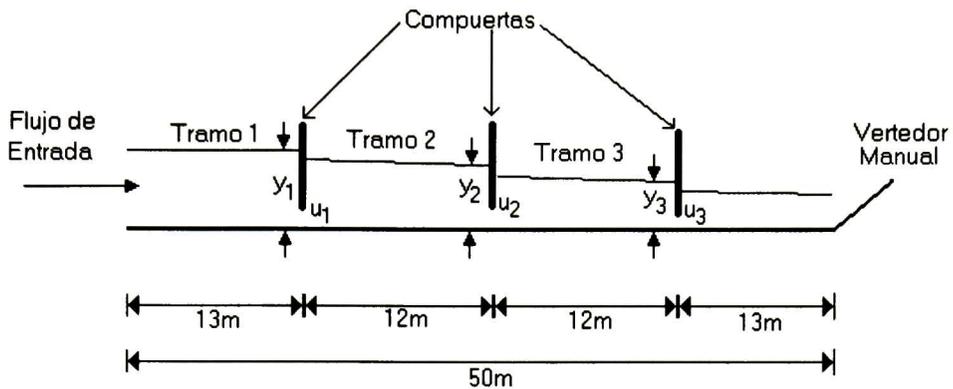


Figura 3.1 Dimensiones del prototipo de canal

## 3.2. Instrumentación

Cada tramo cuenta con dos sensores de nivel, uno ubicado aguas arriba de cada compuerta y otro, aguas abajo.

La posición de la compuerta se determina mediante un potenciómetro conectado al mecanismo de engranes que mueve a ésta.

Dos interruptores límite están instalados en cada compuerta (SL1 y SL2), de tal forma que cuando la compuerta llega a su apertura mínima o a su apertura máxima, la energía suministrada al actuador, es cortada. Figura 3.2

Para el movimiento de las compuertas se utilizan actuadores lineales de fácil operación y bajo costo; éstos son motores de corriente directa de 12 V, con un desplazamiento de 36 pulgadas (91 cm) y con una capacidad de 110 Kg. Además incorpora un sensor de tipo resistivo.

El panel consta de dos partes, la primera la constituyen tres interruptores que permiten conmutar los modos de operación mencionados; la segunda, la conforman un grupo de tres relevadores mediante los cuales, los PLC operan las compuertas.

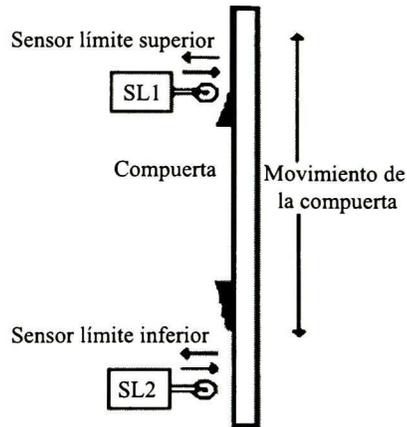


Figura 3.2 Interruptor límite

Los PLC utilizados en las compuertas dos y tres, son del tipo Modicom E984-245 compact 984-120.

En la compuerta uno, se cuenta con un sistema SCADAPack. El SCADAPack es un PLC compacto, más pequeño que otros dispositivos que tienen el mismo número de entradas/salidas y de menor peso.

El puesto central o estación maestra, en este sistema, es una computadora personal Pentium II a 233 MHz con 512 MB en RAM, a la cual se le insertó una tarjeta MODBUS+ para el intercambio de información con los PLC's.

Para poder realizar las tareas de monitoreo, la estación maestra hace uso de Windows 98 y del software Lookout; éste último es el encargado del monitoreo de las distintas variables del sistema. Además, se hace uso del software MatLab para calcular las nuevas posiciones de las estructuras de control por medio del algoritmo de control programado.

### 3.3. Características del “software”

La interface hombre-máquina en la unidad central se realizó por medio del programa Lookout de Nacional Instruments. Éste cuenta con tres paneles para operar cada compuerta y otro para operar el sistema en general.

En los paneles de cada compuerta se cuenta con una ventana en la cual se van graficando las variables asociadas; aquí se registra el comportamiento de estas variables durante todo el proceso.

En el panel correspondiente a la compuerta 2, se tiene un interruptor que sirve para activar el algoritmo de control que se calcula en MatLab.

En el panel correspondiente a la operación del sistema en general, se tiene una representación del canal, es decir se muestran las tres compuertas así como los valores instantáneos de cada variable a lo largo de todo el canal. También aparece una gráfica donde se van presentando los valores instantáneos de todas las variables medidas en el sistema.

### 3.4 Características del “software” de simulación. [10]

Para probar el desempeño en lazo cerrado con el controlador diseñado en este trabajo se utilizó un simulador comercial llamado “SIC” (Simulation of Irrigation Canals) desarrollado por la CEMAGREF (Centro Nacional de Maquinismo Agrícola, Ingeniería rural, Aguas y bosques) de Francia. Este programa es utilizado en el IMTA y en Francia. Este simulador se utiliza para análisis, pruebas y diseños de algoritmos de control para canales abiertos de riego. El SIC resuelve las ecuaciones diferenciales parciales no lineales de Saint Venant que aproximan el comportamiento dinámico presente en los canales abiertos. Este simulador tiene como principal característica que el algoritmo de control debe ser programado en FORTRAN.

Las opciones del menú principal las podemos ver en [10] páginas 50 y 51

# Capítulo 4

## Identificación

En este capítulo se muestra el procedimiento empleado para identificar los parámetros del sistema en tres puntos de operación. Se aplicaron entradas de tipo escalón a cada compuerta del canal y se registraron las curvas obtenidas; con base en estas curvas se diseñaron modelos lineales que aproximan el comportamiento de cada sistema. A partir de los modelos presentes entre cada entrada y salida, se construyeron las matrices de transferencia.

Se establecieron tres puntos de operación con los cuales se obtuvieron tres modelos lineales, tomando como base para la construcción de éstos un flujo de entrada de 80L/s con una apertura de 20cm en cada compuerta.

El procedimiento para establecer los puntos de operación consiste en abrir las compuertas de tal manera que al aplicar un flujo de entrada éstas queden en régimen ahogado. Para construir el modelo lineal con un flujo de 80 litros, se aplicaron 80L/s como flujo de entrada al canal, las compuertas del canal se abrieron 20cm y los niveles que se obtuvieron en estado estable fueron 70.71cm, 63.5cm y 53.5cm para el tramo uno, dos y tres respectivamente. Una vez obtenidos los puntos de operación, para obtener los otros modelos lineales, modelo de 65L/s y modelo de 50L/s, sólo se deben aplicar los flujos de entrada deseados y las compuertas se ubican de tal manera que los niveles alcancen los

puntos de operación ya establecidos. En la tabla 4.1 se muestran las aperturas de compuertas para cada uno de los modelos lineales.

Flujo de entrada	Apertura de compuerta 1	Apertura de compuerta 2	Apertura de compuerta 3	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
80L/s	20 cm	20cm	20cm	70.7cm	63.5cm	53.5cm
65L/s	14.7cm	14.7cm	15.6cm	70.7cm	63.5cm	57.3cm
50L/s	10.9cm	10.6cm	11.6cm	70.7cm	63.5cm	57.5cm

Tabla 4.1 Puntos de operación del canal

A continuación se presentan los pasos seguidos en la identificación de cada modelo.

## 4.1. Identificación de los modelos

En el elemento 1.1, se relaciona la entrada uno con la salida uno, es decir la apertura de la compuerta uno, con el nivel aguas abajo del tramo uno. Se aplicó una entrada de tipo escalón de 4 cm a esta compuerta, es decir se cerró la compuerta 4 cm y se registró el aumento en el nivel del tramo uno, con lo que se obtuvo la gráfica mostrada en la figura 4.1. Dicho escalón se aplicó a los 600 s en el simulador, por esta razón fue necesario normalizar las gráficas. Se normaliza el nivel con respecto al punto de operación y se toma como el origen de tiempo el momento en que es aplicado el escalón.

Lo anterior se logra eliminando todos los datos anteriores al tiempo en el que se aplicó el escalón. Con eso se lleva el eje del tiempo a cero; ahora, para llevar la amplitud a cero, restamos el valor del nivel en estado estable de cada tirante, en este caso 0.7071 m. [5]

El nivel para el elemento 1,1 en estado estable es 0.7071 m. y el máximo nivel del tramo 1 al aplicar el escalón es 0.741 m. Por lo tanto la amplitud de la gráfica se obtiene restando el estado estable al nivel máximo obtenido al aplicar el escalón que es 0.034m. Es decir

$$A_{SS}=0.741-0.707=0.034$$

Donde  $A_{SS}$  representa la amplitud de la gráfica en estado estable

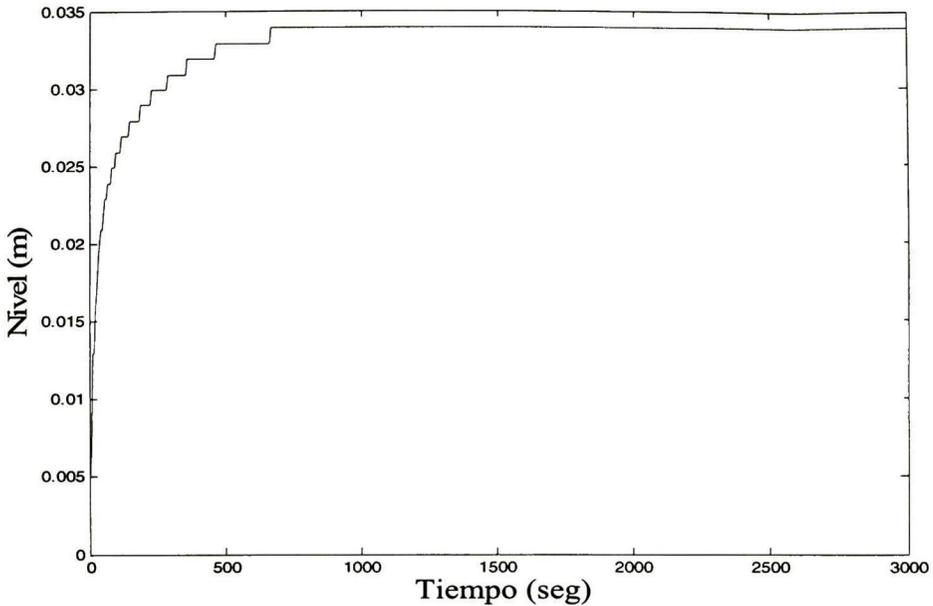


Figura 4.1 Comportamiento dinámico del elemento 1.1

Ahora que se conoce la amplitud de la gráfica, se determinan los parámetros del sistema; es decir, constante de tiempo y ganancia.

La constante de tiempo, es el tiempo en el que el sistema alcanza el 63.2% de su valor final.

$$A_{CT} = 0.034 * 63.2\% = 0.021488.$$

Donde  $A_{CT}$  es la amplitud para obtener la constante de tiempo.

En el archivo generado por el SIC encontramos esa amplitud a los 48 segundos. Con los datos obtenidos se procede a obtener el modelo de este elemento.

### Ganancia

Se puede aproximar este sistema a un sistema de primer orden, que tiene la forma:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k}{Ts + 1}$$

Del teorema del valor final:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sY(s)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} sY(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \left[ \frac{k}{Ts + 1} U(s) \right]$$

como se aplicó un escalón

$$u(t) = 0.04$$

entonces  $U(s)$  es

$$U(s) = 0.04/s,$$

entonces

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \left[ \frac{k}{Ts + 1} U(s) \right] = \lim_{s \rightarrow 0} s \left[ \frac{k}{48s + 1} \right] \left[ \frac{0.04}{s} \right] = \frac{0.04k}{1} = 0.04k$$

como el valor final es

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \left[ \frac{k}{Ts + 1} U(s) \right] = 0.034$$

entonces

$$k = \frac{0.034}{0.040} = 0.85$$

La función de transferencia de este sistema es

$$H(s) = \frac{0.850}{48s + 1}$$

Al realizar la gráfica de esta función de transferencia y comparándola con la obtenida en el simulador (SIC), observamos que la aproximación es bastante buena, con un error menor al 8 % del valor final, además se observa que no existe error en estado estable, ver figura 4.2.

El proceso de identificación se continúa con cada uno de los elementos del modelo completo; es decir al aplicar una entrada escalón a una compuerta se obtienen las funciones de transferencia de los niveles de cada uno de los tramos, por ejemplo, cuando se aplica la entrada escalón al tramo uno se obtienen los elementos (1,1), (1,2) y (1,3) con sus correspondientes funciones de transferencia que representan la interacción del tramo dos y tres con el tramo uno; cuando se aplica una entrada escalón al tramo dos se obtienen los elementos (2,1), (2,2) y (2,3), cuando se aplica una entrada escalón al tramo tres se obtiene (3,1), (3,2) y (3,3) formando una matriz de  $3 \times 3$ , esto se realiza para cada uno de los flujos de entrada elegidos, 80L/s, 65L/s y 50L/s.

Una vez obtenidas las funciones de transferencia se valida cada una de ellas con el comportamiento del nivel correspondiente obtenido con el SIC como lo que se hace en la figura 4.2 para el elemento 1,1 con el flujo de entrada de 80L/s.

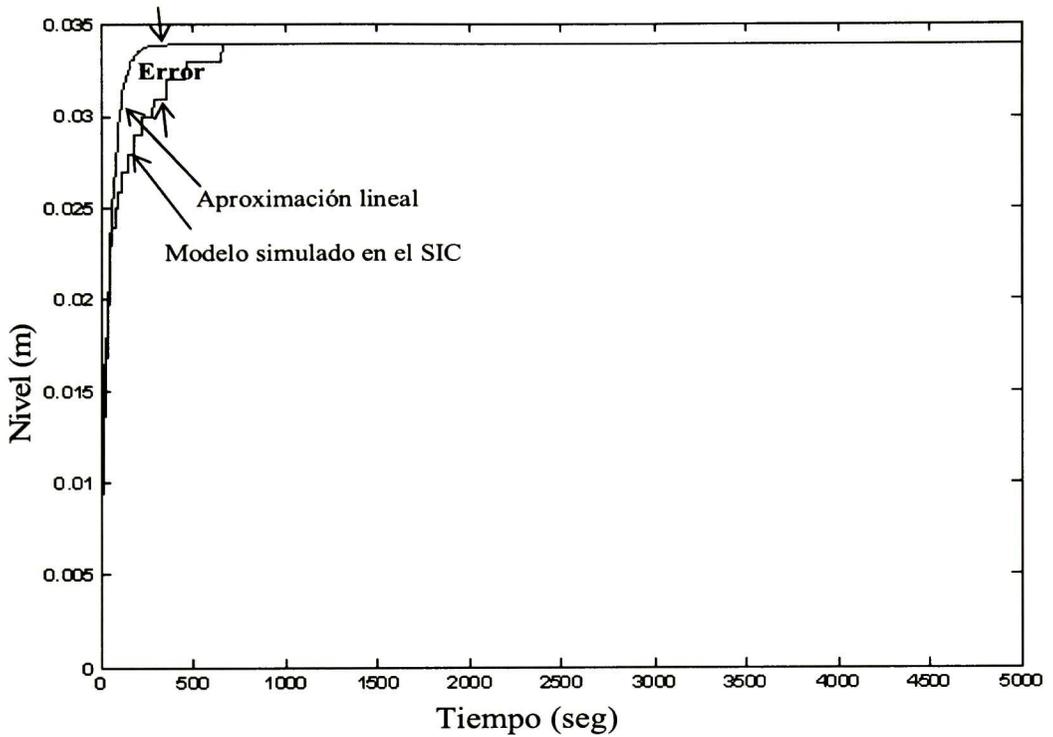


Figura 4.2 Comparación entre la aproximación lineal y el comportamiento real, obtenido en simulación, del elemento 1.1

## 4.2. Matriz de Función de Transferencia

En esta sección se presentan los modelos simplificados de cada modelo.

La matriz de transferencia que modela el sistema para el flujo de 80L/s es:

$$H_{80}(s) = \begin{bmatrix} \frac{0.85}{48s+1} & \frac{0.625}{168s+1} & \frac{4.2}{3890s^2+399s+1} \\ 0 & \frac{0.70}{149s+1} & \frac{4.675}{365s+1} \\ 0 & 0 & \frac{5.12}{326s+1} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

La matriz de transferencia que modela el sistema para el flujo de 65L/s es:

$$H_{65}(s) = \begin{bmatrix} \frac{1.21}{72s+1} & \frac{0.862}{245s+1} & \frac{6.806}{5420s^2+552s+1} \\ 0 & \frac{0.93}{216s+1} & \frac{7.064}{514s+1} \\ 0 & 0 & \frac{7.42}{462s+1} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

La matriz de transferencia que modela el sistema para el flujo de 50L/s es:

$$H_{50}(s) = \begin{bmatrix} \frac{2.04}{84s+1} & \frac{1.762}{348s+1} & \frac{10.609}{7150s^2+725s+1} \\ 0 & \frac{1.81}{360s+1} & \frac{10.739}{691s+1} \\ 0 & 0 & \frac{10.83}{653s+1} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

# Capítulo 5

## Problema de control y diseño del controlador

El objetivo del algoritmo de control que se diseña en este capítulo, es mantener constantes los niveles aguas abajo al final de cada tramo alrededor de un punto de operación, ante la presencia de perturbaciones en el flujo de entrada, por medio de la manipulación de las compuertas ubicadas aguas abajo de cada tramo. Por el análisis realizado en [5] por J.C. Felipe por medio de la medida de interacción llamada “RGA”, se estableció que las interacciones entre los diferentes tramos pueden considerarse mínimas y entonces es factible diseñar un control descentralizado. Por lo tanto el algoritmo propuesto es un control descentralizado que consiste en un banco de controladores LQG conmutados con lógica difusa. Por ser un control descentralizado cada tramo del canal contará con un banco de controladores que se encargará de regular su respectivo tramo utilizando únicamente la información de ese tramo.

### 5.1 Preliminares del control LQG [1]

Sea una realización mínima de un sistema lineal invariante en el tiempo de la forma:

$$\begin{aligned}x(t) &= Ax(t) + Bu(t) + v(t) \\y(t) &= Cx(t) + w(t)\end{aligned}$$

donde  $x, v \in R^n$ ;  $u \in R^m$ ,  $y, w \in R^p$

El diseño del control  $LQG$  para estos sistemas involucra un filtro de Kalman para la estimación de los estados de la planta y una ley de control tipo  $LQ$  para la regulación. Gracias al principio de separación [1], [3], la ley de control  $LQG$  puede ser diseñada generando un control  $LQ$  e independientemente el Filtro de Kalman. La ley  $LQG$  incorporará la ganancia obtenida del  $LQ$  y la ganancia obtenida para el Filtro de Kalman.

Para la obtención de la ganancia  $LQ$  se minimiza el siguiente criterio cuadrático:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T(t)Q_c x(t) + u^T(t)R_c u(t))dt$$

con  $Q_c=Q_c^T \geq 0$  (semidefinida positiva),  $R_c=R_c^T > 0$  (definida positiva) y el par  $(A,Q)$  detectable.

La ley de control que minimiza este criterio es de la forma:

$$u(t) = -Kx(t)$$

donde la ganancia  $LQ$ ,  $K_c$  es

$$K = R_c^{-1} B^T P_c$$

y  $P_c$  es una matriz semidefinida positiva, la cual debe de satisfacer la siguiente ecuación algebraica de Riccati:

$$P_c A + A^T P_c - P_c B R_c^{-1} B^T P_c + Q_c = 0$$

Para la obtención del estimador con el Filtro de Kalman, se consideran que  $v(t)$  y  $w(t)$  son ruidos blancos Gaussianos, independientes entre sí, de media cero y covarianzas:

$$E[v(t)v^T(\tau)] = Q_0 \delta(t - \tau)$$

$$E[w(t)w^T(\tau)] = R_0 \delta(t - \tau)$$

La ecuación dinámica del estimador con Filtro de Kalman está dada por:

$$\begin{aligned}x_e(t) &= Ax_e(t) + Bu(t) + L(y(t) - Cx_e(t)) \\y_e(t) &= Cx_e(t)\end{aligned}$$

donde la ganancia de Kalman  $K_0$  es

$$L = P_e CR_f^{-1}$$

y  $P_e$  es una matriz semidefinida positiva que satisface la siguiente ecuación de Riccati:

$$P_e A^T + AP_e - P_e CR_f^{-1} C^T P_e + Q_f = 0$$

Una vez obtenidas las ganancias  $K$  del  $LQ$  y la ganancia  $L$  del estimador, la ley de control  $LQG$  está dada por:

$$u(t) = -Kx_e(t)$$

Esta ley minimiza el siguiente criterio:

$$J = E\{z^T(t)Q_c z(t) + u^T(t)R_c u(t)\}$$

con

$$z = Dx(t)$$

$$Q = D^T D$$

## 5.2 Preliminares del control descentralizado [11]

El diseño de un sistema de control descentralizado involucra dos puntos fundamentales:

1. La elección de los pares de entrada-salida.
2. El diseño de cada controlador.

En nuestro caso, el primer punto es omitido ya que los pares de entrada-salida en el prototipo de canal quedan establecidos por su estructura física, es decir interesa controlar el nivel aguas abajo de cada tramo con la compuerta ubicada aguas abajo de cada tramo.

En la figura. 5.1 se muestra un diagrama de bloques de un control descentralizado, también llamado control diagonal. La idea fundamental de esta estructura es que las señales de entrada y de salida utilizadas por un controlador no son utilizadas por otro.

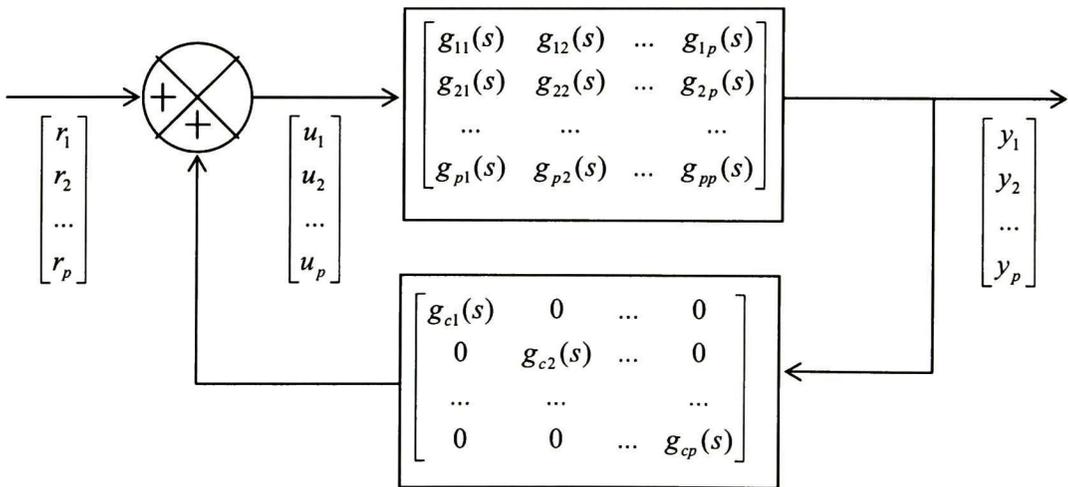


Figura 5.1 Diagrama de bloques de un control descentralizado

Este tipo de control funcionará si  $G(s)$  se comporta como una planta “casi” diagonal porque de esta manera  $G(s)$  podría considerarse como una colección de subplantas independientes y cada elemento  $G_c(s)$  podría diseñarse individualmente. Si los elementos que están fuera de la diagonal de  $G(s)$  son muy significativos, el control podría no ser eficiente debido a las interacciones ocasionadas por estos elementos. De aquí que el principal problema que surge en el diseño de este tipo de controles es determinar el grado de interacción que existe entre los diferentes controladores individuales del sistema. Para analizar si es factible el uso de estructuras de este tipo se cuenta con diferentes herramientas que miden el grado de interacción entre controladores, algunas de ellas son:

- El RIA (Arreglo de Interacción Relativa) o en inglés “Relative Interaction Array”

- El GDRG (Ganancias Relativas Dinámicas Generalizadas) o en inglés “Generalized Dynamic Relative Gains”
- El RGA (Arreglo de Ganancias Relativas) o en inglés “Relative Gain Array”

### Arreglo de Ganancias Relativas (RGA)

El Arreglo de Ganancias Relativas (RGA) [11], [2] de una matriz no singular cuadrada  $G$  es la matriz definida como:

$$RGA(G(s)) = G(s) \otimes (G(s)^{-1})^T$$

donde  $\otimes$  denota multiplicación elemento a elemento (producto Schur).

Esta definición fue originalmente dada por Bristol [2]; se define como una medida de interacción en estado estable ( $w=0$ ). Sin embargo, el uso de la medida RGA juega también un papel importante en frecuencias cercanas a la frecuencia de corte del sistema (“crossover frequencies”) [11]. También se requiere que los controladores tengan implícita una acción integral. Este último requerimiento se cumplirá, en nuestro caso, por el hecho de incorporar la acción integral en cada controlador para garantizar el rechazo de perturbaciones, como se explica en la siguiente sección.

El análisis de las interacciones en un sistema de control con múltiples lazos de control, se realiza para cada lazo en forma independiente. En la figura 5.2 se muestra el sistema de control para analizar el  $i$ -ésimo lazo, manteniendo cerrados todos los otros lazos de control. Bristol [2] indica que si  $u_j$  y  $y_i$  denotan una entrada y salida particular para una planta multivariable  $G(s)$  y si suponemos que se usará  $u_j$  para controlar  $y_i$  entonces se darán dos casos extremos:

- Todos los otros lazos están abiertos, por lo que todas las otras entradas serán constantes ( $u_k = 0, \forall k \neq j$ ).
- Todos los otros lazos están cerrados, por lo que todas las otras salidas serán constantes ( $y_k = 0, \forall k \neq i$ )

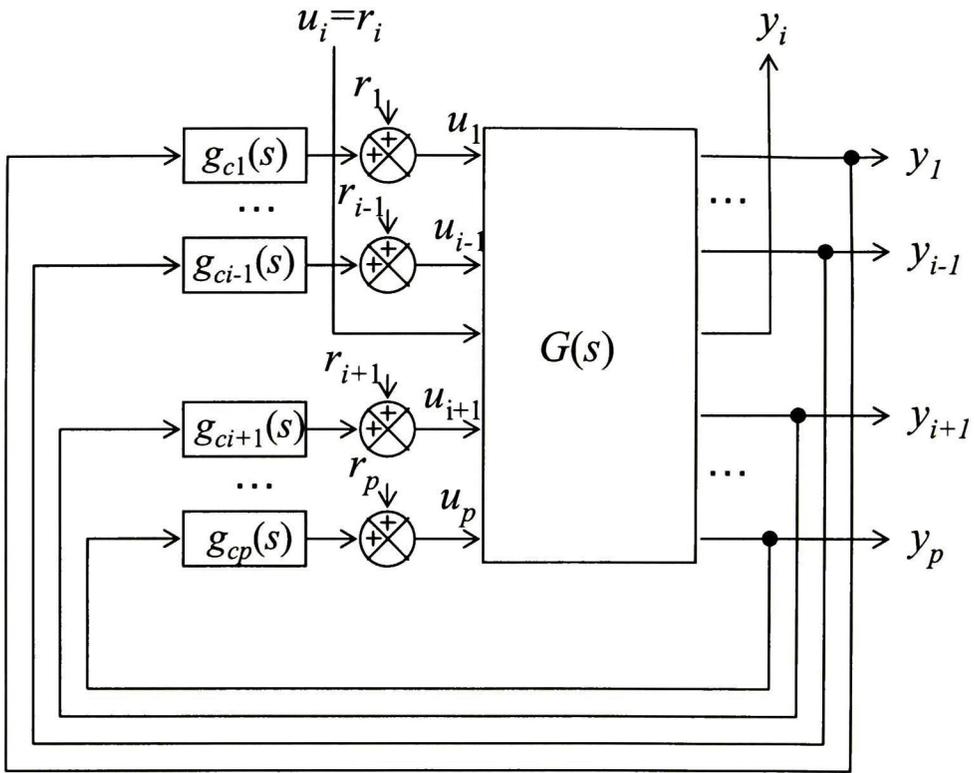


Figura 5.2 Esquema de control descentralizado con el i-ésimo lazo de control abierto

Se define entonces la ganancia relativa entre la entrada  $u_i$  y la salida  $y_i$  como la relación de dos ganancias en estado estable:

- La ganancia entre  $y_i$  y  $u_j$  cuando todos los otros lazos de control están abiertos.  
Expresado matemáticamente:

$$\left( \frac{\partial y_i}{\partial u_j} \right)_{u_k=0, k \neq j}$$

- La ganancia entre  $y_i$  y  $u_j$  cuando todos los otros lazos de control están cerrados.  
Expresado matemáticamente:

$$\left( \frac{\partial y_i}{\partial u_j} \right)_{y_k=0, k \neq i}$$

por lo que:

$$RGA_{ij}(G) = \lambda_{ij}(G) = \frac{\left( \frac{\partial y_i}{\partial u_j} \right)_{u_k=0, k \neq j}}{\left( \frac{\partial y_i}{\partial u_j} \right)_{y_k=0, k \neq i}}$$

Un RGA que sea cercano a la matriz identidad será deseable, es decir las interacciones serán pequeñas. Particularmente con un RGA igual a la matriz identidad, las interacciones serán mínimas. El RGA es igual a la identidad si y sólo si  $G(s)$  es diagonal o triangular. En esta tesis, se obtuvo un modelo lineal de la planta triangular. Aplicando el RGA a esta planta obtenemos una matriz identidad, por lo cual las interacciones son mínimas y podemos aplicar un control descentralizado. Haciendo la consideración de que el RGA es válido tanto para frecuencias cercanas a cero como a frecuencias cercanas a la frecuencia de corte del sistema, podemos aplicar esta medida de interacción, en nuestro caso, ya que las frecuencias de operación de nuestro sistema son bajas.

### 5.3 Preliminares de lógica difusa [13]

Un conjunto difuso está definido por  $F = \{(\mu, \mu_F(\mu)) \mid \mu \in U\}$

donde :

$U$  : es el universo discurso

$\mu_F$  : es la función de pertenencia del conjunto difuso

Ejemplo 1: Sea  $U = \{3,4,5,7,8,9\}$  el conjunto de los números cercanos al 6, entonces la función de pertenencia de los elementos de  $U$  con respecto al número 6 puede ser calculada como:

$$\mu_6(x) = \frac{1}{1 + (x - 6)^2}$$

De esta forma el conjunto difuso está dado por:

$$F = \{(3,0.1), (4,0.3), (5,0.6), (7,0.6), (8,0.3), (9,0.1)\}$$

Una variable lingüística toma valores del lenguaje natural, como ejemplo la variable color puede ser rojo, amarillo, azul, etcétera. Estas variables al ser utilizadas como etiquetas sirven para darle interpretación matemática a expresiones lingüísticas por medio de los conjuntos difusos.

Un sistema difuso funcional tiene  $i$ -ésimas reglas de la forma:

Si  $z_1$  es  $M_{i1}$  y ... y  $z_j$  es  $M_{ij}$  y ... y  $z_g$  es  $M_{ig}$

**Entonces**  $b_i = h_i(\cdot)$

Donde  $(\cdot)$  representa el argumento de la función  $h_i$ ;  $i = 1, 2, \dots, r$ ;  $r$  es el número de reglas;  $z_1(t), \dots, z_j(t), \dots, z_g(t)$  son las variables premisas;  $M_{ij}$  son los conjuntos difusos del antecedente de la regla  $i$ , con  $j = 1, 2, \dots, j, \dots, g$ .

El antecedente de las reglas está definido como un sistema difuso normal. Sin embargo en los consecuentes de las reglas, en lugar de un término lingüístico asociado con una función de pertenencia, se usa una función  $b_i = h_i(\cdot)$  (de ahí el nombre de “Sistema Difuso Funcional”) que no tiene una función de pertenencia asociada. El argumento de  $h_i$  puede ser función de los términos  $z_j$ , pero también se pueden usar otras variables. Cualquier función puede ser usada en la parte consecuente lo cual hace al sistema difuso funcional muy general. Una descripción más completa sobre los conceptos de lógica difusa se encuentra en [9] y [4].

Para el sistema difuso funcional, se puede usar una operación apropiada para representar el antecedente (por ejemplo el mínimo o el producto), y de esta forma la defusificación puede ser calculada usando el método del centroide (centro de área o gravedad), como:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^r \lambda_i[z] \cdot b_i}{\sum_{i=1}^r \lambda_i[z]}$$

donde  $\lambda_i[z] = \prod_{j=1}^g M_{ij}[z_j]$  si se usa el producto,  $M_{ij}[z]$  es el grado de pertenencia de  $z_j$  en  $M_{ij}$  y  $z = [z_1 z_2 \dots z_g]$ .

Este sistema difuso está definido para que independientemente del valor de entrada, se tenga que  $\sum_{i=1}^r \lambda_i[z] \neq 0$ . Se puede apreciar al sistema difuso como una interpolación no lineal entre las transformaciones que son definidas por las funciones en el consecuente de las reglas [7].

## 5.4 Rechazo de perturbaciones

Para lograr el rechazo de perturbaciones, el principio del modelo interno establece que la función de transferencia en lazo abierto “planta-controlador” debe contener el modelo interno de la perturbación que se desea rechazar [12].

El tipo de perturbaciones a las cuales están expuestos los canales son principalmente las debidas a las extracciones de agua en las tomas laterales. Por la forma en que se extrae el agua de estas tomas, las perturbaciones pueden ser representadas por señales de tipo escalón. En esta tesis no se tomarán en cuenta las perturbaciones provocadas por estas tomas laterales, sin embargo se tienen perturbaciones al variar el gasto de entrada al canal, que provocan un efecto parecido al generado por tomas laterales. Las perturbaciones logradas de esta forma pueden aproximarse a perturbaciones de tipo escalón. Por otro lado, debido a que en este trabajo se diseña un control descentralizado (controlador diagonal), las interacciones entre tramos, que el controlador no toma en cuenta, se modelarán como perturbaciones afectando al sistema; de esta forma el efecto de las interacciones se incluirá en el diseño de la ley de control. El modelo generador de estas perturbaciones se aproximará también por un integrador.

De acuerdo a lo anterior consideramos que el canal será afectado por la suma de dos perturbaciones de tipo escalón. Por lo que el modelo generador de la suma de los efectos de ambas perturbaciones es un integrador.

El modelo generador de la suma de las dos perturbaciones transferido al prototipo multivariable es representado por:

$$H_p = \begin{bmatrix} \frac{1}{s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{s} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Dado que los modelos lineales obtenidos del canal en (4.1), (4.2) y (4.3) no contienen dicho modelo generador, se introducirá (5.1) en cada uno de ellos para asegurar el rechazo a este tipo de perturbaciones [12].

### 5.5 Modelos en variables de estado y diseño del controlador

Como la finalidad es aplicar un banco de controladores descentralizado, únicamente determinaremos la realización en variables de estado de las funciones de transferencia sobre la diagonal de las matrices de transferencia (4.1), (4.2) y (4.3) obtenidas en el capítulo 4. A estas funciones de transferencia, se agrega el modelo de la perturbación como se muestra en la figura 5.3.

La forma de agregar el modelo interno de la perturbación a cada función de transferencia es

$$g_{ij}(s) = H_{ij}(s) \left( \frac{1}{s} \right), \quad \text{para } i = 1,2,3; \quad j = 80,65,50$$

Para los modelos obtenidos de 80L/s, 65L/s y 50L/s

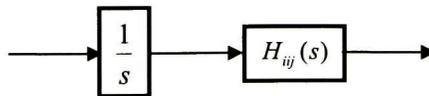


Figura 5.3 Modelo de la perturbación aplicado al *ii*-ésimo elemento de la matriz de transferencia

Las realizaciones en variables de estado las obtenemos directamente de MatLab con las instrucciones que se muestran a continuación.

Para la matriz de transferencia (4.1) que modela el comportamiento del sistema con un flujo de 80L/s agregando el modelo interno de la perturbación tenemos:

Para el elemento (1,1)

$$g_{1180}(s) = \left( \frac{0.85}{48s+1} \right) \left( \frac{1}{s} \right)$$

$$g_{1180}(s) = \frac{0.85}{48s^2 + s}$$

```
num1=[0 0.85];
```

```
den1=[48 1];
```

```
G1=tf(num1,den1);
```

```
SYS1=SS(G1,'min');
```

```
[A1,B1,C1,D1]=SSdata(SYS1);
```

Con lo que obtenemos la realización en variables de estado:

$$x = \begin{bmatrix} -0.020833 & 0 \\ 0.25 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0.25 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

$$y = [0 \quad 0.28333]x$$

De la misma manera tenemos que para

Para el elemento (2,2)

$$g_{2280}(s) = \left( \frac{0.70}{149s+1} \right) \left( \frac{1}{s} \right)$$

$$g_{2280}(s) = \frac{0.70}{149s^2 + s}$$

se tiene

$$x = \begin{bmatrix} -0.0067114 & 0 \\ 0.25 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0.125 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

$$y = [0 \quad 0.1557]x$$

y para el elemento (3,3)

$$g_{3380}(s) = \left( \frac{5.125}{326s+1} \right) \left( \frac{1}{s} \right)$$

$$g_{3380}(s) = \frac{5.125}{326s^2 + s}$$

se tiene

$$\begin{aligned} x &= \begin{bmatrix} -0.0030675 & 0 \\ 0.25 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0.25 \\ 0 \end{bmatrix} u \\ y &= [0 \quad 0.25153]x \end{aligned}$$

De la misma manera se procede con los elementos de la matriz de transferencia (4.2) con un flujo de 65L/s.

Para el elemento (1,1)

$$g_{1165}(s) = \frac{1.206}{72s^2 + s}$$

se tiene

$$\begin{aligned} x &= \begin{bmatrix} -0.013889 & 0 \\ 0.25 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0.25 \\ 0 \end{bmatrix} u \\ y &= [0 \quad 0.268]x \end{aligned}$$

Para el elemento (2,2)

$$g_{2265}(s) = \frac{.93103}{216s^2 + s}$$

se tiene

$$\begin{aligned} x &= \begin{bmatrix} -0.0046296 & 0 \\ 0.125 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0.125 \\ 0 \end{bmatrix} u \\ y &= [0 \quad 0.27586]x \end{aligned}$$

Para el elemento (3,3)

$$g_{3365}(s) = \frac{7.41935}{462s^2 + s}$$

se tiene

$$x = \begin{bmatrix} -0.0021645 & 0 \\ 0.25 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0.25 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

$$y = [0 \quad 0.25695]x$$

De la misma manera se procede con los elementos de la matriz de transferencia (4.3) con un flujo de 50 L/s.

Para el elemento (1,1)

$$g_{1150}(s) = \frac{2.0454}{84s^2 + s}$$

se tiene

$$x = \begin{bmatrix} -0.01190 & 0 \\ 0.25 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0.25 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

$$y = [0 \quad 0.3896]x$$

Para el elemento (2,2)

$$g_{2250}(s) = \frac{1.80952}{360s^2 + s}$$

se tiene

$$x = \begin{bmatrix} -0.00278 & 0 \\ 0.25 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0.125 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

$$y = [0 \quad 0.16085]x$$

Para el elemento (3,3)

$$g_{3350}(s) = \frac{10.826}{653s^2 + s}$$

se tiene

$$x = \begin{bmatrix} -0.00153 & 0 \\ 0.25 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0.25 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

$$y = [0 \quad 0.26526]x$$

## 5.6 Especificaciones para el diseño del controlador

Las especificaciones que debe satisfacer el sistema en lazo cerrado son las siguientes:

- Para los tres primeros tramos se deben regular los tirantes aguas abajo alrededor de los puntos de operación.

- Ante un cambio en el gasto de entrada, la variación en los niveles regulados deberá ser inferior al 10% con respecto a los puntos de operación.
- La velocidad de apertura de la compuerta no debe ser mayor a 0.02m/s
- La apertura de la compuerta no debe de exceder los límites físicos del canal que está en el rango de 0 a 80cm.

## 5.7 Diseño de las ganancias LQ

Habiendo obtenido las representaciones en variables de estado de cada subsistema, y una vez descritas las especificaciones que se deben satisfacer, podemos ahora determinar las ganancias  $LQ$  y de Kalman para el controlador, dichas ganancias se calcularon en MatLab.

Los parámetros de síntesis del LQ fueron elegidos de tal manera que  $\|R_c\| \gg \|Q_c\|$  para garantizar un control suave, de acuerdo a las propiedades asintóticas del LQ. De igual forma para los parámetros de síntesis del filtro de Kalman, se eligió  $\|R_f\| \gg \|Q_f\|$ . Las instrucciones de MatLab utilizadas fueron las siguientes:

```
[Ki,Si,Ei] = LQR(Ai,Bi,Qci,Rci);           %para obtener la ganancia LQ
[KESTi,Li,Pi] = KALMAN(SYSi,Qfi,Rfi);    %para obtener la ganancia de Kalman
```

Con  $i=1,2,3$ , representando el  $i$ -ésimo modelo se obtuvieron, las ganancias mostradas en la tabla 5.1.

		Elemento (1,1)	Elemento (2,2)	Elemento (3,3)
<b>Flujo de 80L/s</b>	Ganancias LQ	$K_1=(1.259, 8.960e-1)$	$K_2=(1.350, 4.924e-1)$	$K_3=(2.231, 2.515)$
	Ganancias de Kalman	$L_1=(9.243e-1, 1.277)^T$	$L_2=(1.844, 2.433)^T$	$L_3=(7.025, 3.737)^T$
<b>Flujo de 65L/s</b>	Ganancias LQ	$K_1=(1.247,8.475e-1)$	$K_2=(1.284,8.723e-1)$	$K_3=(2.258,2.569)$
	Ganancias de Kalman	$L_1=(1.355,1.590)^T$	$L_2=(2.737,1.575)^T$	$L_3=(3.795,2.718)^T$
<b>Flujo de 50L/s</b>	Ganancias LQ	$K_1=(3.066e-1,6.160e-2)$	$K_2=(2.56e-1,1.922e-2)$	$K_3=(5.473e-1,1.53e-1)$
	Ganancias de Kalman	$L_1=(5.464,2.648)$	$L_2=(1.362e+1,6.507)$	$L_3=(4.077e+1,8.766)$

Tabla 5.1 Ganancias LQ y de Kalman obtenidas en MATLAB

## 5.8 Diseño de la conmutación con Lógica Difusa

Después de haber calculado las ganancias de cada observador y de cada ley de control LQ, se diseña la conmutación usando lógica difusa del banco de controladores LQG. Esta conmutación se realiza por medio de tres conjuntos difusos los cuales se definen tomando en cuenta el comportamiento del canal y las características de cada controlador

La variable premisa es el flujo de entrada al canal y los conjuntos difusos se definen en base a la de observación del rango de perturbaciones que regula cada controlador, en forma independiente. La figura 5.4 muestra los conjuntos difusos con los que se realiza la conmutación del banco de controladores en cada tramo del canal.

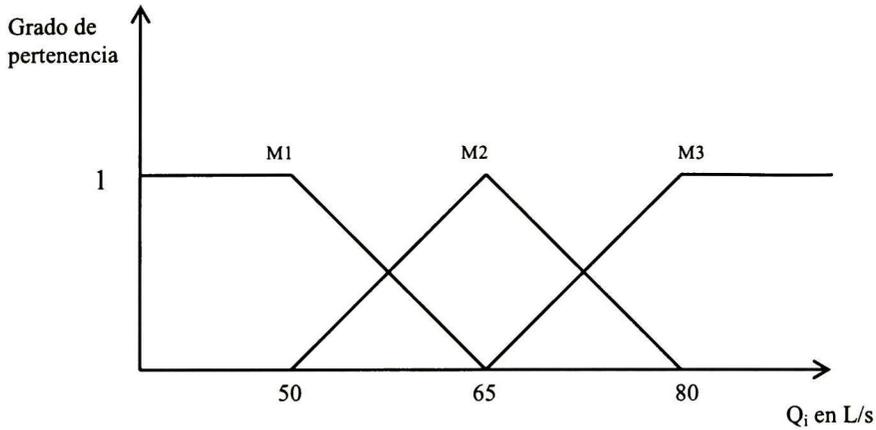


Figura 5.4 Conjuntos difusos y funciones de membresía

Con  $Q_i$  denotando al flujo de entrada a cada tramo del canal.

Los conjuntos de la figura 5.4 definen las siguientes reglas difusas para cada tramo del canal:

$$\text{Si } Q_i \text{ es } M1 \text{ entonces } v_1 = \frac{1}{s} g_{LQGi}(s)y_n$$

$$\text{Si } Q_i \text{ es } M2 \text{ entonces } v_2 = \frac{1}{s} g_{LQGi}(s)y_n$$

$$\text{Si } Q_i \text{ es } M3 \text{ entonces } v_3 = \frac{1}{s} g_{LQGi}(s)y_n$$

Para  $i = 1,2,3$

Con  $g_{LQGi}$  la transferencia del i-ésimo LQG.  $g_{LQGi} = L(SI - (A - BK_i - L_iC)^{-1}K_i)$

Donde  $Q_i$  es el flujo de entrada a cada tramo del canal,  $\frac{1}{s}$  es el modelo interno de la perturbación,  $g_{LQGi}$  es la matriz de transferencia diseñada para cada uno de los modelos aumentados y  $y_n = y - y_0$  es la diferencia entre la salida y la referencia. La señal de control para cada tramo del canal está dada por:

$$u_i(k) = \frac{\sum_{i=1}^3 \mu(Q)(v_i(k) + u_0^i)}{\sum_{i=1}^3 \mu(Q)} \quad \text{para } i = 1,2,3$$

La acción de control final, para cada tramo del canal, es una interpolación de los tres controladores lineales que interactúan dependiendo de la variable premisa, que en este caso es el flujo de entrada a cada tramo del canal, los controladores actúan de acuerdo al grado de pertenencia, del flujo de cada tramo, a su función de membresía. Los controladores regulan con esa regla participando a los más dos controladores a la vez, esto por la forma en que se definieron los conjuntos difusos.

En la figura 5.5 se muestra la conmutación con lógica difusa de los tres controladores para un tramo del canal, se requieren tres diagramas como éste para representar los tres tramos el canal, cada controlador de este tramo fue diseñado para un flujo de entrada diferente que son 80, 65 y 50 L/s, LQG<sub>1i</sub>, LQG<sub>2i</sub> y LQG<sub>3i</sub>, respectivamente, para  $i = 1,2,3$  que representa cada uno de los tramos del canal.

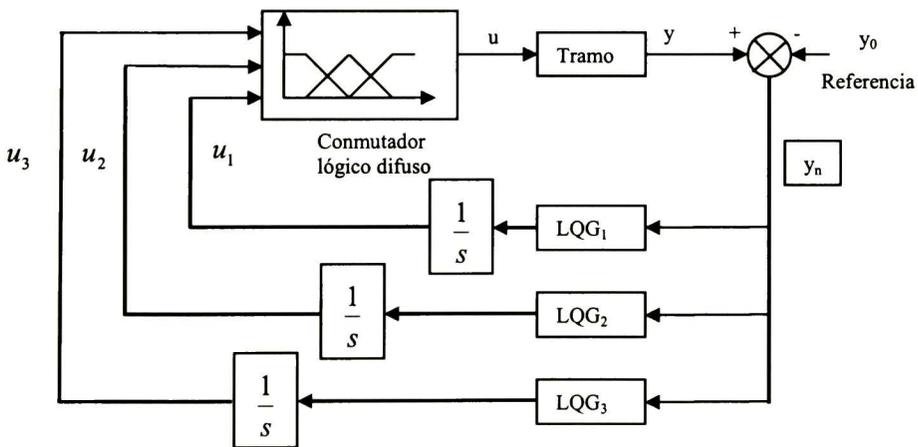


Figura 5.5 Conmutación de 3 controladores con lógica difusa para un tramo del canal.

# Capítulo 6

## Resultados en simulación

En este capítulo se presentan primeramente los resultados obtenidos con el banco de controladores conmutados con lógica difusa al aplicar variaciones al flujo de entrada al canal, ahí podremos observar cómo este controlador es capaz de rechazar un importante rango de perturbaciones en flujo de entrada.

Se observará más adelante que el controlador regula los tirantes aguas abajo alrededor de los puntos de operación con un sobrepaso máximo en cada tirante menor al 10% del valor del tirante en estado estable. En la tabla 1 aparecen los puntos de operación aguas abajo de cada tramo y el sobrepaso máximo aceptable para cada tramo. También podremos ver que ante una perturbación en el flujo de entrada los niveles se mantienen dentro de los límites exigidos por las características físicas del canal, con un adecuado desplazamiento de las compuertas sin exceder sus límites de desplazamiento.

	Puntos de operación en estado estable	Sobrepaso máx. permitido
Tramo 1	70.7cm	7.07cm
Tramo 2	63.5cm	6.35cm
Tramo 3	57.3cm	5.73cm

Tabla 1. Puntos de operación del canal y sobrepaso máximo permitido en este diseño.

Posteriormente se mostrarán dos comparaciones de estos resultados, la primera comparación se hace con los resultados obtenidos por un control descentralizado LQG con un controlador en cada tramo, como el diseñado por J. C. Felipe en [5], y la segunda comparación se hace con los resultados obtenidos con un banco de controladores LQG conmutado con lógica estándar (gain scheduling clásico). Entendiendo por lógica estándar la operación de un sólo controlador a la vez, según sea el flujo de entrada al canal.

### 6.1 Banco de controladores con lógica difusa.

En el experimento mostrado en esta sección se aplicaron variaciones al flujo de entrada al canal con la finalidad de observar la capacidad que tiene cada banco de controladores de cada tramo para regular el nivel aguas abajo de ese tramo ante esta perturbación.

Este experimento consiste en aplicar un flujo inicial de 65L/s durante 10 minutos al canal, posteriormente se aplican variaciones al flujo de entrada al canal en el siguiente orden 55, 70, 40, 65, 75 y 60 L/s, aplicados durante 20 minutos cada uno de ellos. En total son 2 horas 10 minutos de simulación. Ver tabla 2.

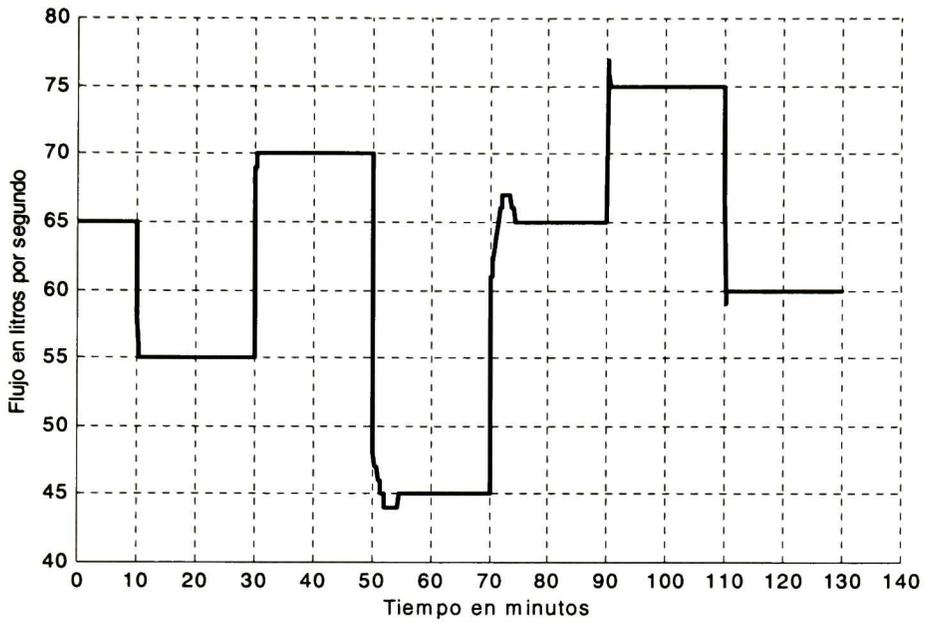
	1	2	3	4	5	6	7
Flujo L/s	65	55	70	40	65	75	60
Tiempo min	0	10	30	50	1:10	1:30	1:50

Tabla 2. Tiempo en que se aplicaron las variaciones de flujo y la magnitud de éstos.

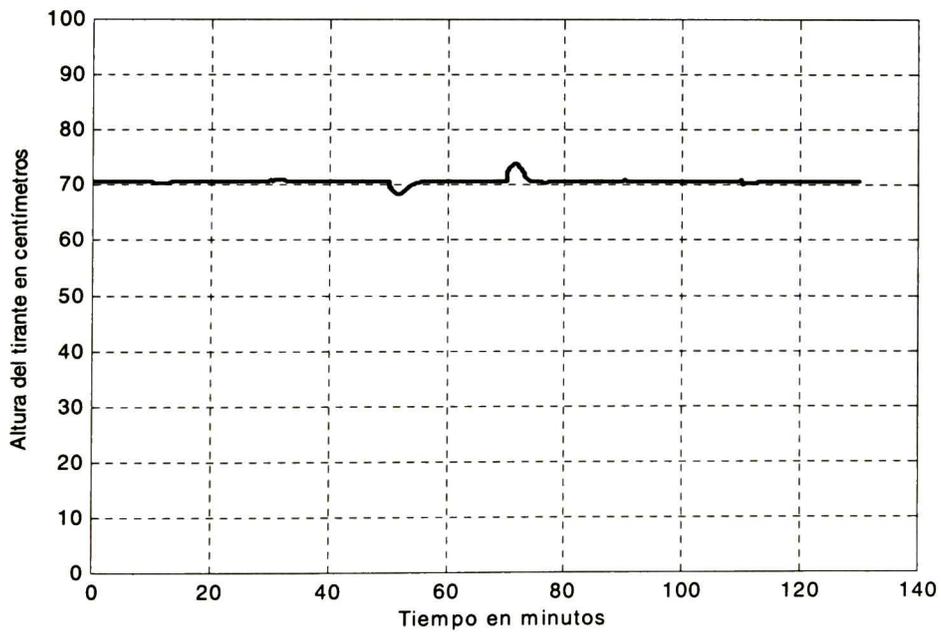
En las figuras 6.1a, 6.2a y 6.3a se presenta el flujo de entrada a cada tramo del canal, en donde se pueden observar las grandes variaciones de flujo a los que fue sometido cada control local para poner de manifiesto su eficacia. En las figuras 6.1b, 6.2b y 6.3b se muestra la regulación del nivel de agua realizada por cada banco de controladores del tramo correspondiente alrededor de cada punto de operación, ver tabla 1.

Se puede observar en la parte inferior de estas figuras una muy buena regulación de los tirantes aguas abajo de cada tramo de canal realizada por el controlador para cada flujo de entrada, pues el sobrepaso máximo es menor a 3.5cm en los tirantes, a pesar de las grandes variaciones aplicadas al flujo de entrada.

Así también el tiempo máximo en regresar el tirante al punto de operación es de tan sólo 10 minutos.

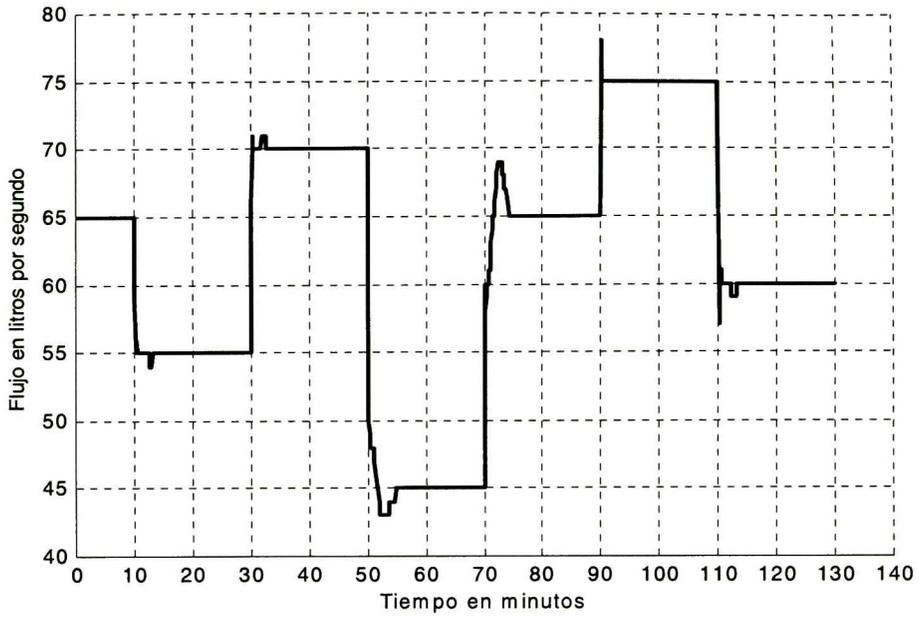


(a)

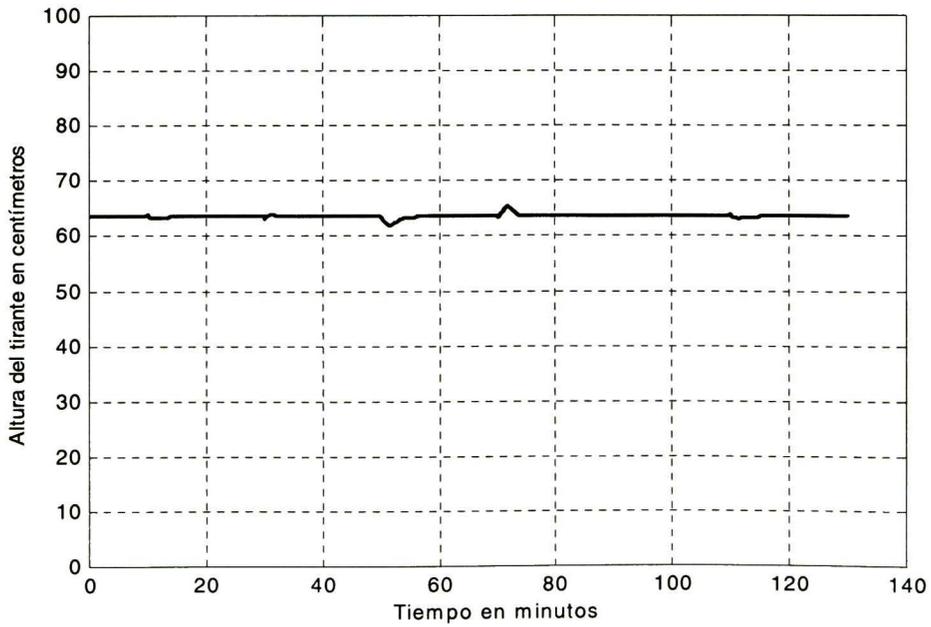


(b)

Figura 6.1 (a) Flujo de entrada al primer tramo del canal. (b) Regulación en el tirante aguas abajo del primer tramo del canal.

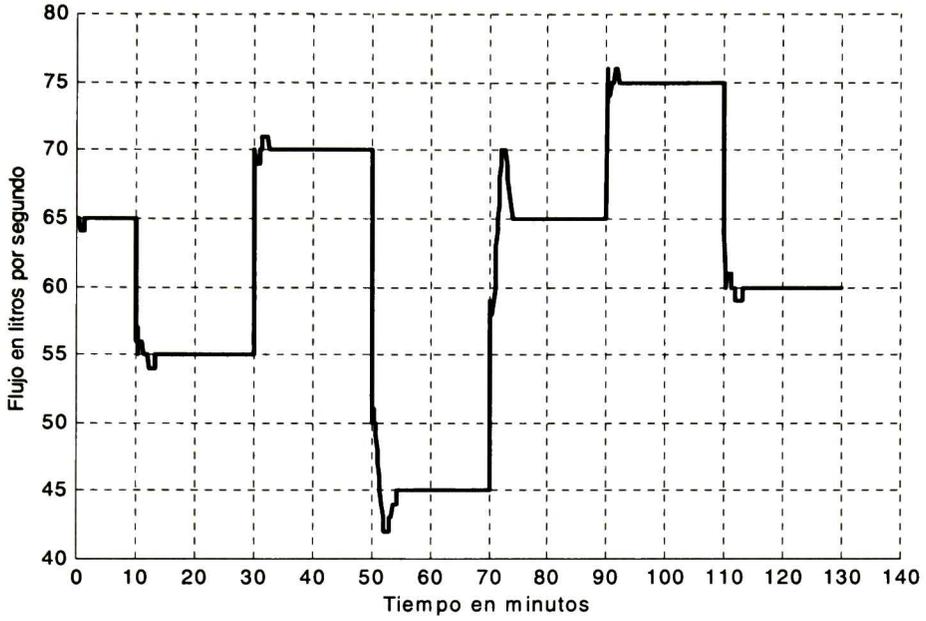


(a)

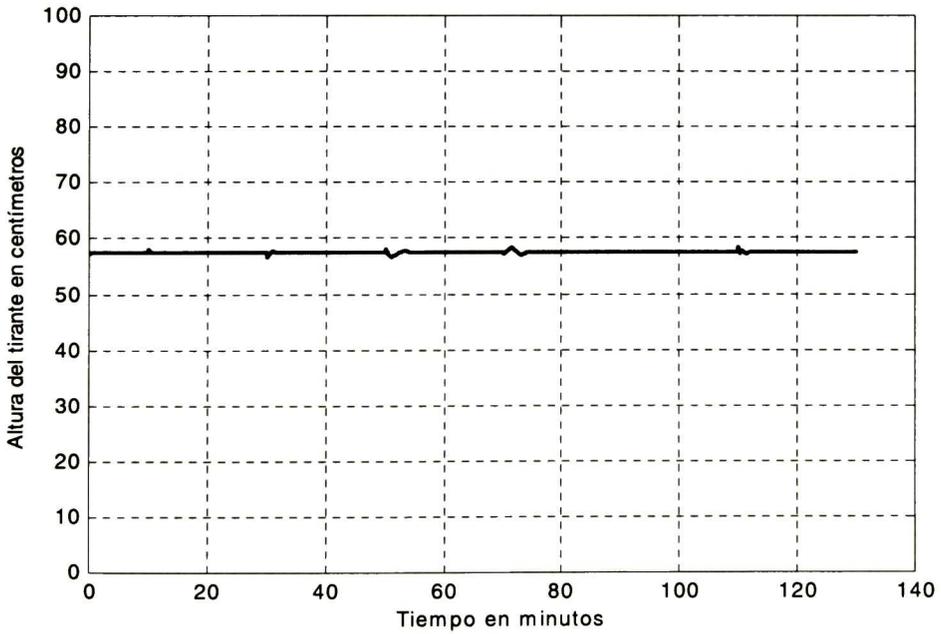


(b)

Figura 6.2 (a) Flujo de entrada al segundo tramo del canal. (b) Regulación en el tirante aguas abajo del segundo tramo del canal.



(a)



(b)

Figura 6.3 (a) Flujo de entrada al tercer tramo del canal. (b) Regulación en el tirante aguas abajo del tercer tramo del canal.

En las figuras 6.4, 6.5 y 6.6 se muestran las acciones de control, en estas figuras puede verse que el desplazamiento de las compuertas necesario para regular el tirante aguas abajo de cada tramo es muy pequeño y el máximo desplazamiento se presenta entre los 40 y 60 minutos en la compuerta 3 con un desplazamiento menor a 8cm, ver figura 6.6, y puede verse que la apertura no excede sus límites físicos.

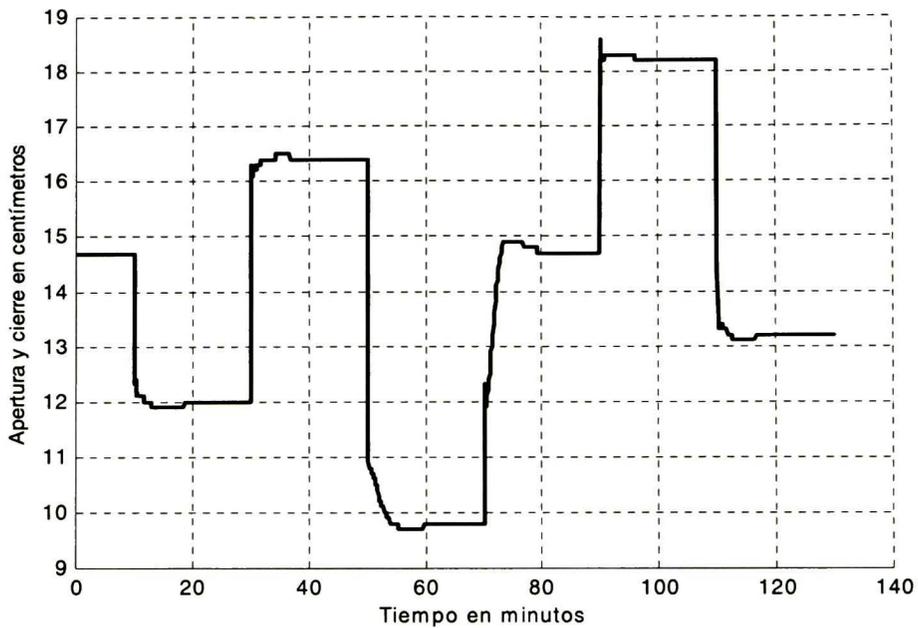


Figura 6.4 Desplazamientos de la compuerta 1 para regular el tirante 1

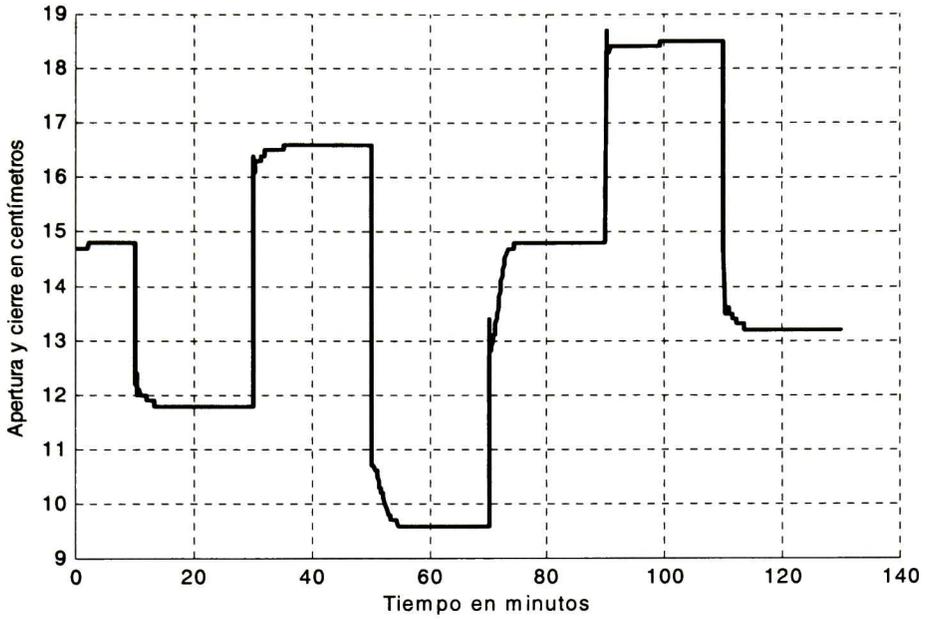


Figura 6.5 Desplazamientos de la compuerta 2 para regular el tirante 2

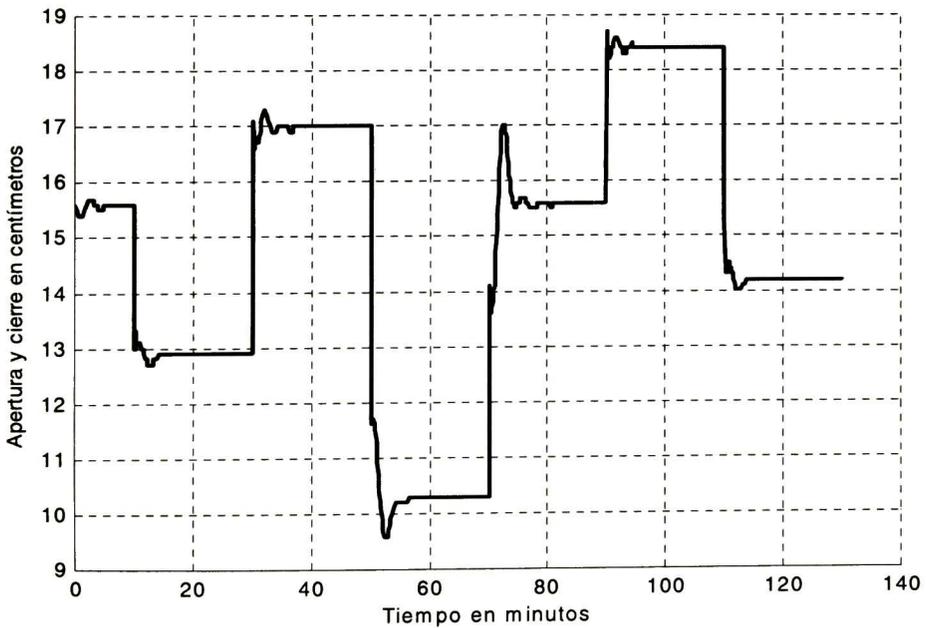
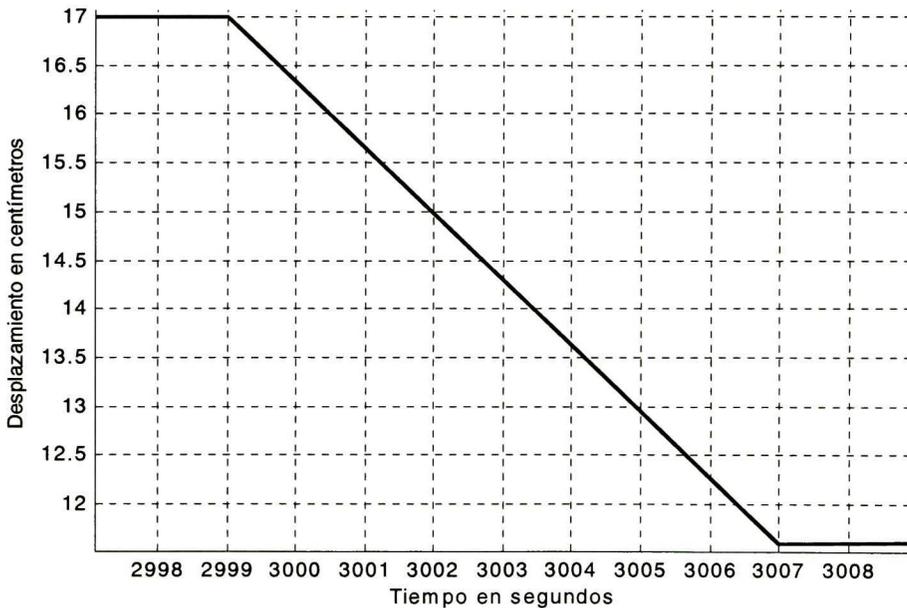


Figura 6.6 Desplazamientos de la compuerta 3 para regular el tirante 3

En la figura 6.7 se muestra la velocidad máxima de desplazamiento de las tres compuertas, esta velocidad se presenta en la compuerta 2 entre los 40 y 60 minutos. Para observar a detalle esta velocidad la gráfica se muestra en cm/s. Ahí se puede observar que entre 2999 3007 segundos se presenta la velocidad máxima de desplazamiento y es menor a 1cm/s. Como se puede ver no se excede el límite de velocidad establecido que es de 2cm/s.



6.7 Velocidad máxima de desplazamiento para regulación de los tirantes.

## 6.2 Error máximo

En esta sección presentamos el sobrepaso máximo del tirante que se presentó al hacer regulación en cada uno de los tramos del canal con el experimento de la sección 6.1.

De acuerdo con lo establecido en la tabla 1, el sobrepaso máximo de regulación no debe ser mayor al 10% del valor del tirante en el punto de operación para cada tramo al aplicar perturbaciones positivas y negativas al flujo de entrada dentro de los límites del diseño.

En la figura 6.7, 6.8 y 6.9 se muestra el sobrepaso máximo presentado en cada uno de los tramos del canal y como podemos observar son muy pequeños y no se exceden las especificaciones pues el error está por debajo de 7.07cm, 6.35cm y 5.73cm para el tramo uno dos y tres respectivamente siendo valores menores al 10% del valor del tirante en cada tramo del canal.

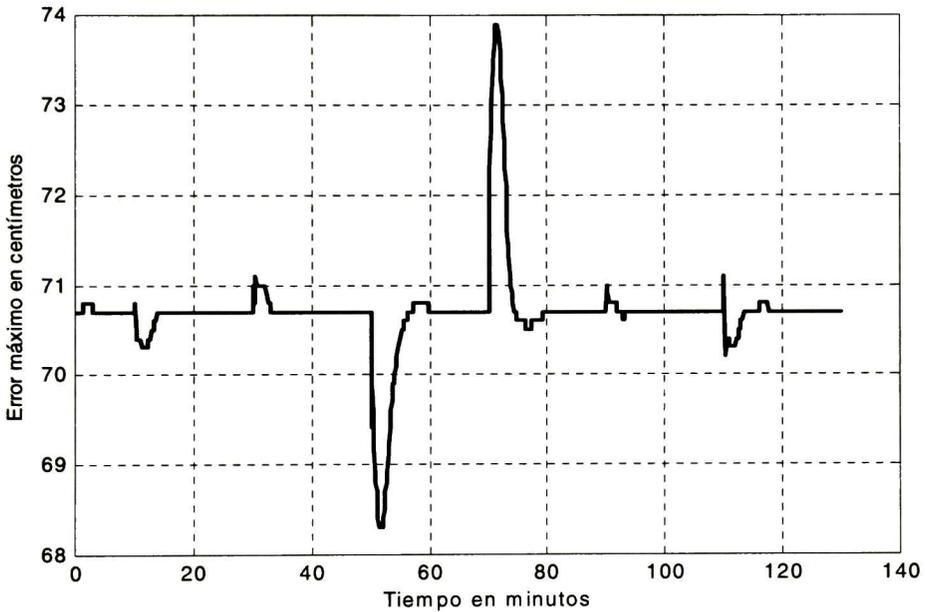


Figura 6.8 Error máximo de regulación en el tirante 1.

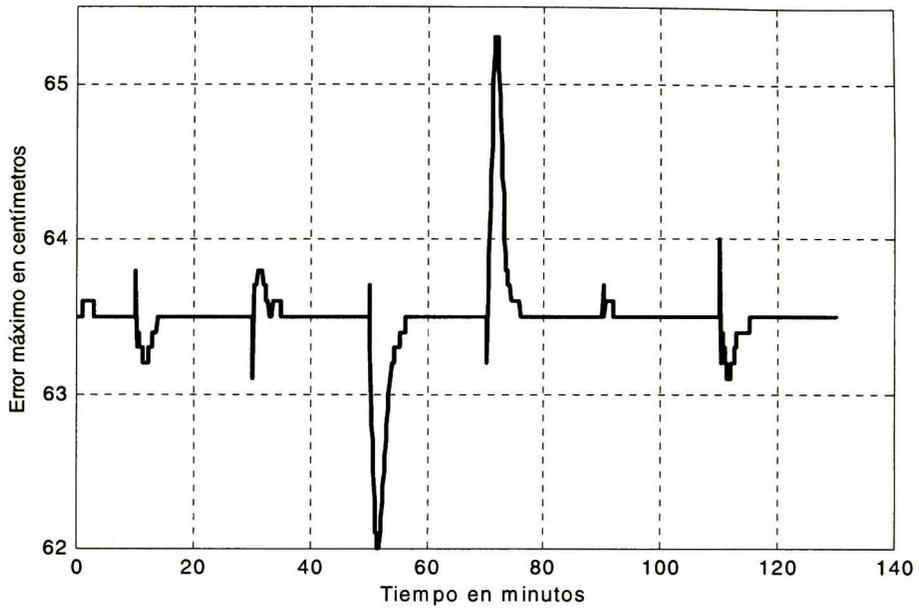


Figura 6.9 Error máximo de regulación en el tirante 2.

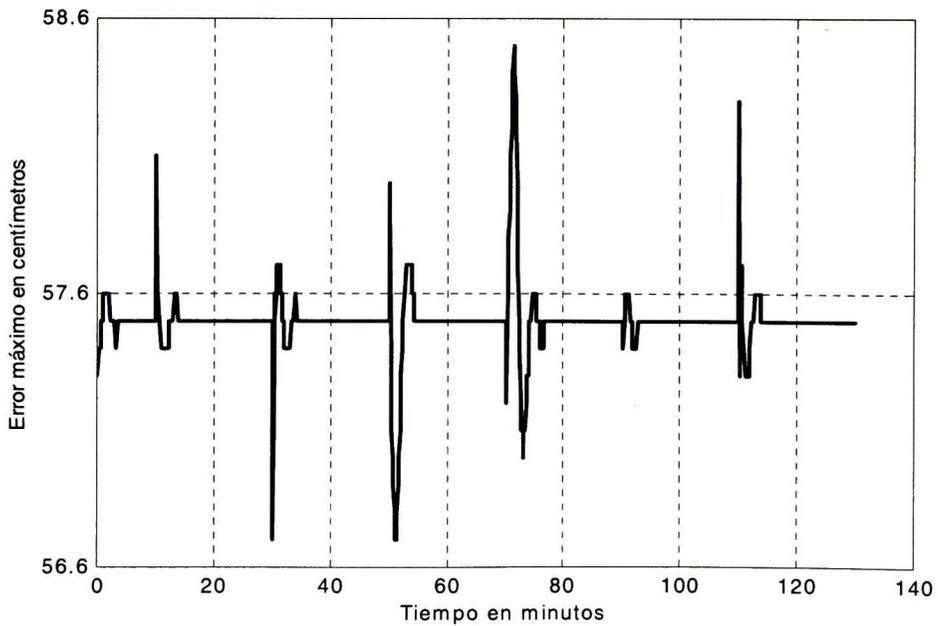


Figura 6.10 Error máximo de regulación en el tirante 3.

### 6.3 Comparación con un controlador LQG.

En esta sección se presenta una comparación entre el banco de controladores diseñado en esta tesis y un controlador LQG descentralizado como el diseñado en el trabajo de tesis de Juan Carlos Felipe [5], el controlador LQG fue diseñado para un flujo de entrada de 65L/s. Se mostrará que el rango de regulación, en cada tramo del canal, obtenido con el banco de controladores diseñado en esta tesis es superior respecto a un solo controlador para el rango de variaciones de flujo utilizado.

En las figuras 6.11, 6.12 y 6.13 se muestran dichas comparaciones apareciendo en la parte superior de la figura la regulación realizada por el banco de controladores con lógica difusa y en la parte inferior de la figura la regulación realizada con un sólo controlador, para cada tramo.

La comparación está hecha con el experimento de la sección 6.1, es decir se aplicaron las mismas variaciones al flujo de entrada al canal pero esta vez realizando la regulación con un solo controlador LQG para cada tramo, diseñado para los puntos de operación de la tabla 1 con un flujo de 65L/s.

Estas figuras muestran que con un sólo controlador en cada tramo la regulación es de menor calidad en un rango tan amplio, ante variaciones al flujo de entrada. Mientras que la calidad de regulación del banco de controladores conmutados con lógica difusa en cada tramo es mucho mejor. También se puede observar que la regulación realizada por el controlador LQG presenta sobrepasos mayores al 10% del valor del tirante en cada tramo, debido a que las variaciones al flujo de entrada son muy grandes.

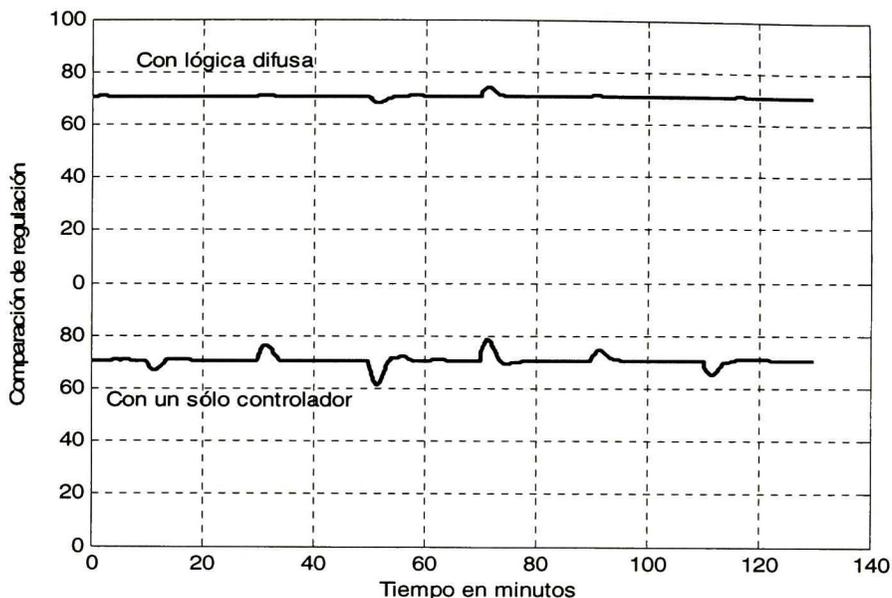


Figura 6.11 Comparación de regulación en el tramo 1. En la parte superior de la figura se muestra la regulación la realizada por el banco de controladores con lógica difusa y en la parte inferior la regulación realizada por un sólo controlador LQG.

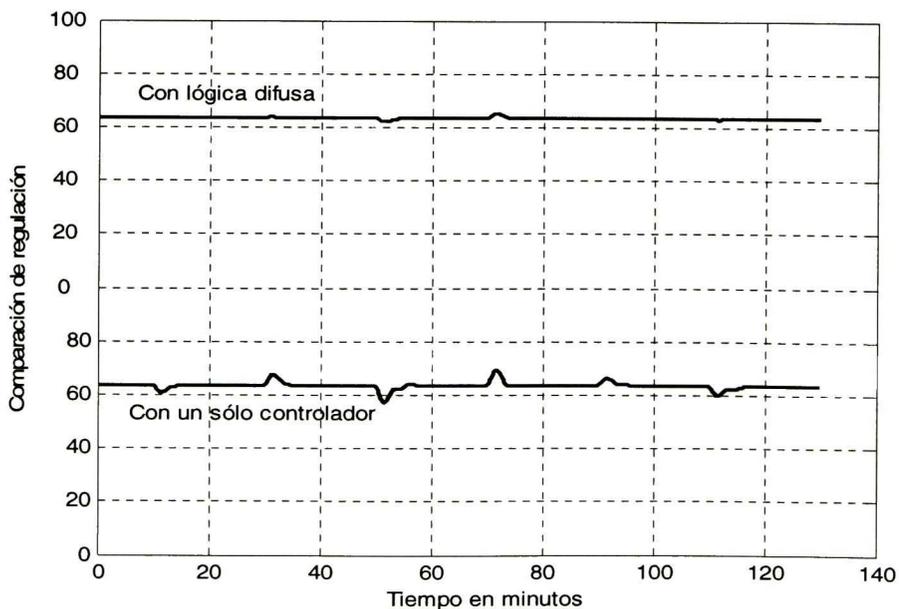


Figura 6.12 Comparación de regulación en el tramo 2 entre el banco de controladores con lógica difusa y un sólo controlador LQG

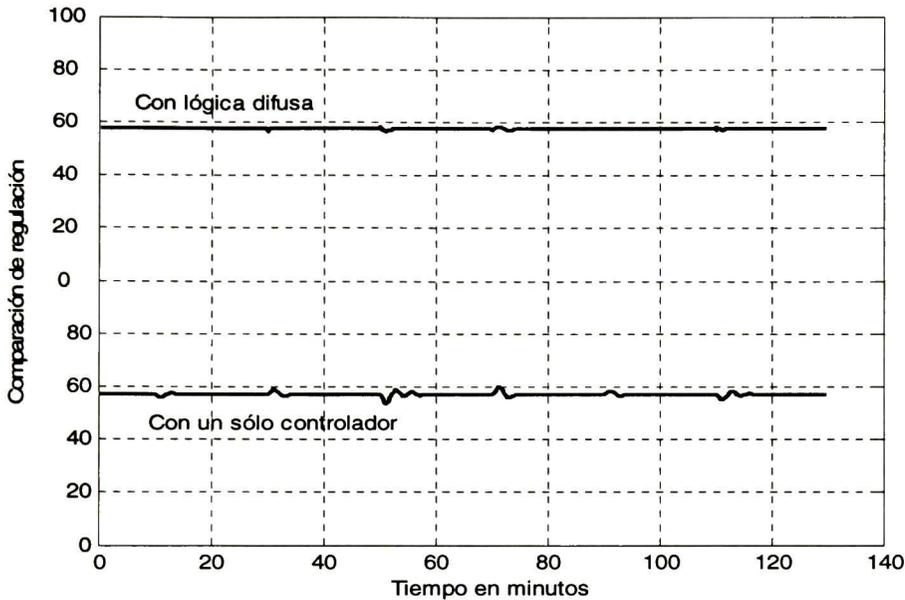


Figura 6.13 Comparación de regulación en el tramo 3 entre el banco de controladores con lógica difusa y un sólo controlador LQG.

## 6.4 Comparación entre bancos de controladores

En esta sección se muestran los resultados obtenidos con el Banco de Controladores LQG conmutados con Lógica Difusa y los resultados obtenidos con un banco de controladores LQG conmutados con lógica estándar (gain scheduling clásico), con el fin de comparar los desempeños

Entiéndase por conmutación con lógica estándar al hecho de elegir entre el banco de controladores a únicamente un controlador a la vez de acuerdo con las siguientes reglas:

Si  $(Q_i < 60L/s)$  entonces realizará la regulación el controlador diseñado para el punto de operación alrededor de 57.3cm, diseño de 50L/s.

Si  $(60 \leq Q_i < 75 L/s)$  entonces realizará la regulación el controlador diseñado para el punto de operación alrededor de 63.5cm, diseño de 65L/s.

Si ( $Q_i \geq 75$  L/s) entonces realizará la regulación el controlador diseñado para el punto de operación alrededor de 70.7cm, diseño de 80L/s.

Para  $i = 1,2,3$

donde  $Q_i$  es el flujo de entrada a cada tramo del canal.

En la figura 6.14 se muestra una conmutación de tres controladores con lógica estándar, ahí se puede observar que se selecciona únicamente un controlador a la vez. Este diagrama es para un solo tramo y cada tramo de canal tiene un banco de controladores con esta estructura. Cada controlador de este banco se diseñó para un flujo de entrada 80, 65 y 50 L/s,  $LQG_{1i}$ ,  $LQG_{2i}$  y  $LQG_{3i}$  respectivamente. Donde  $i = 1,2,3$  indica cada tramo del canal.

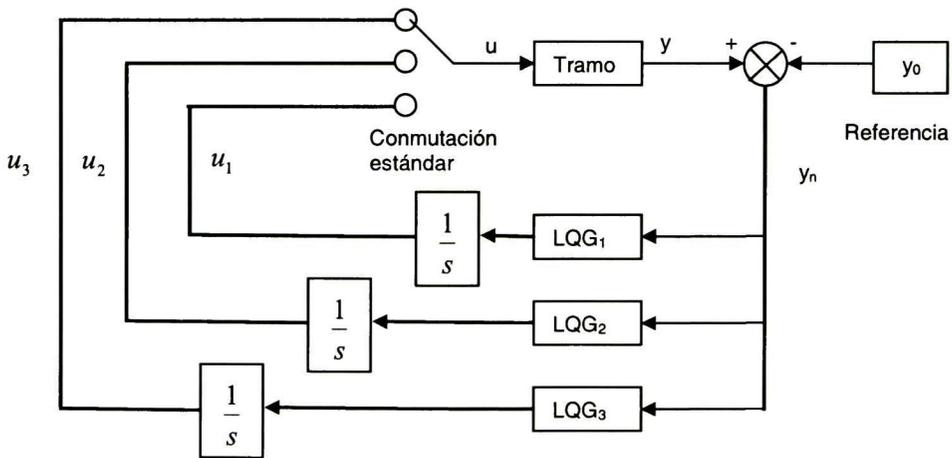


Figura 6.14 Conmutación de tres controladores con lógica estándar en un tramo del canal

En las figuras 6.15, 6.16 y 6.17 se muestran los resultados de esta comparación aplicando las mismas variaciones al flujo de entrada que en el primer experimento, sección 6.1. En la parte superior de las figuras se muestra la regulación hecha por el banco de controladores conmutados con lógica difusa y en la parte inferior se muestra la regulación hecha por el banco de controladores conmutados con lógica estándar.

La comparación mostrada en las figuras pone de manifiesto las ventajas que la lógica difusa tiene sobre la lógica estándar al conmutar un banco de controladores.

Los controladores lineales son los mismos para los dos bancos cambiando únicamente la forma en que se conmutan y puede observarse entre los minutos 40 y 80 que para un flujo de entrada en donde sólo actúa un controlador en cada tramo la regulación es similar para los dos controladores; es decir, para  $Q < 50L/s$  y  $Q = 65L/s$  en este experimento. Pero para un flujo de entrada diferente, la regulación realizada con el controlador conmutado con lógica difusa es mucho mejor que la realizada con el controlador conmutado con lógica estándar.

Se puede observar en la parte inferior de las figuras, en la regulación realizada con el controlador conmutado con lógica estándar, que cuando el flujo se encuentra en los límites en donde operan dos controladores,  $Q = 60L/s$  y  $Q = 75L/s$ , éstos se están conmutando continuamente presentándose una oscilación en la regulación. En las gráficas se observó este hecho cuando se aplicó un flujo de  $60L/s$  a la entrada del canal, lo cual no se observa con el controlador conmutado con lógica difusa.

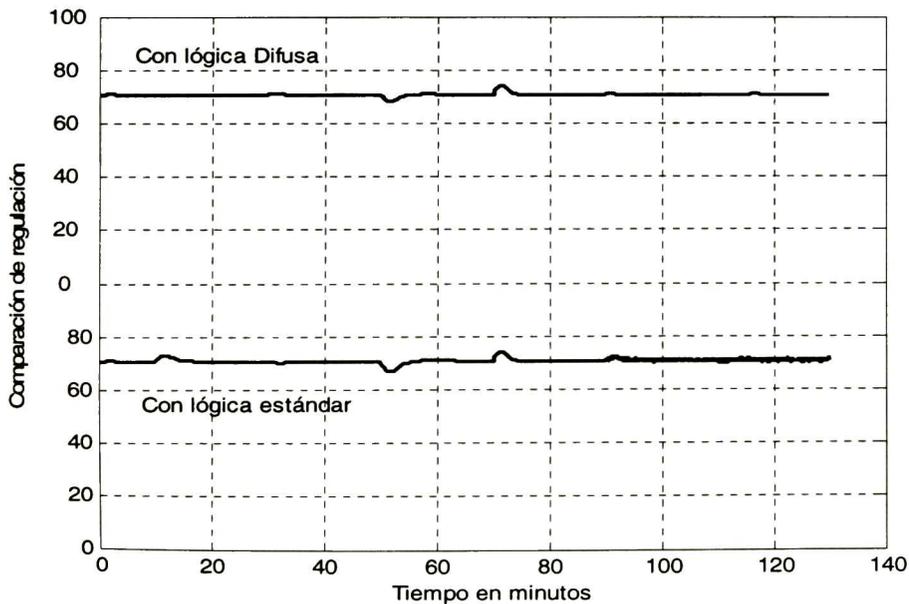


Figura 6.15 Comparación de regulación en el tramo 1. La gráfica superior de la figura muestra la realizada por el banco de controladores con lógica difusa y la gráfica inferior muestra la realizada con el banco de controladores con lógica estándar.

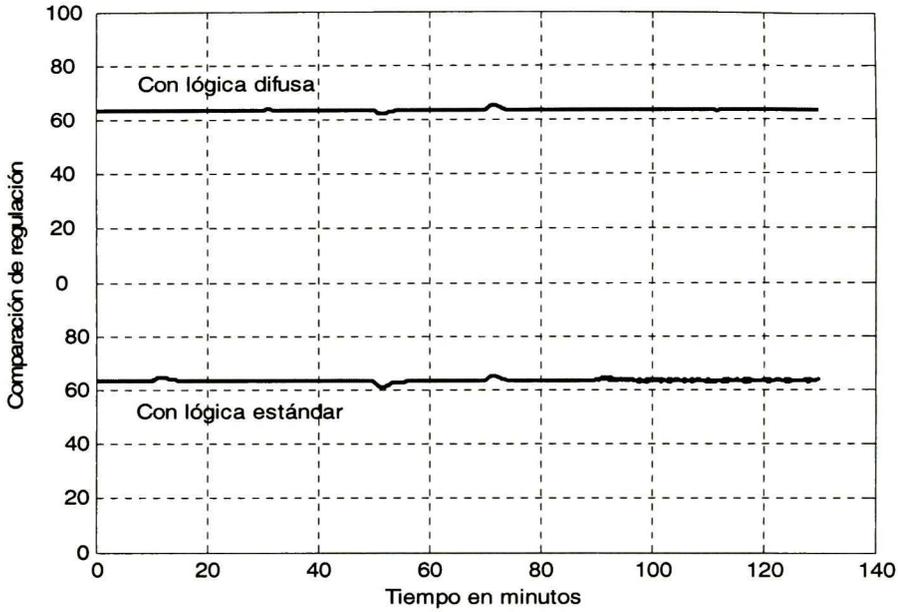


Figura 6.16 Comparación de regulación en el tramo 2 entre el banco de controladores con lógica difusa y el banco de controladores con lógica estándar.

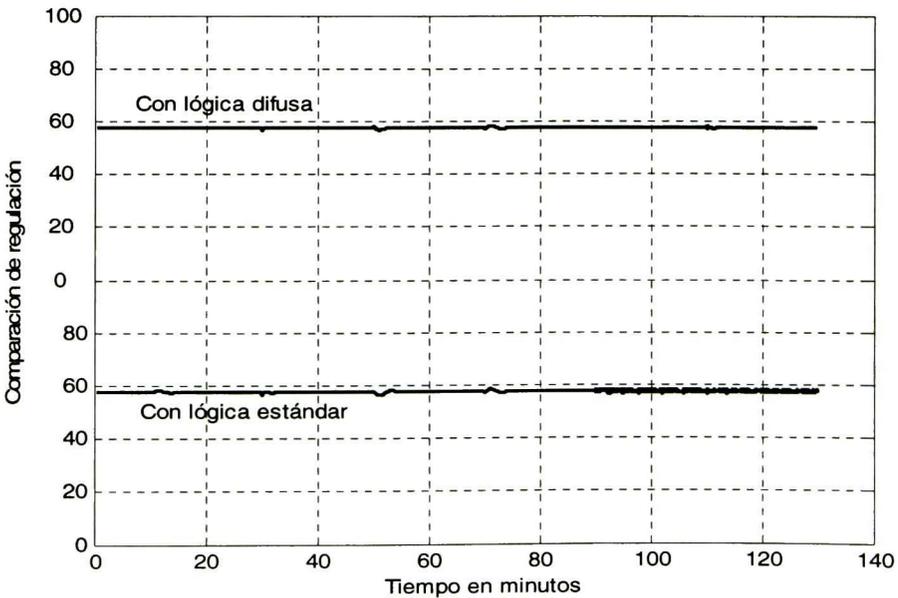


Figura 6.17 Comparación de regulación en el tramo 3 entre el banco de controladores con lógica difusa y el banco de controladores con lógica estándar.

# Capítulo 7

## Conclusiones y trabajo futuro

En este trabajo de tesis se diseñó y se probó en simulación un banco de controladores LQG conmutado con lógica difusa. Los resultados mostraron que el controlador es capaz de regular adecuadamente los niveles en cada tramo a pesar de las grandes perturbaciones en el flujo a la entrada de cada tramo. Durante la regulación no se excedieron los límites físicos de nivel y apertura de compuerta, se obtuvieron sobrepasos aceptables en el tirante y una velocidad de apertura y cierre de compuertas que respetó las especificaciones.

Para constatar la eficiencia del presente controlador, el desempeño de éste se comparó con el desempeño obtenido con un control descentralizado en el cual los controladores en cada tramo son simples LQG. Dicha comparación mostró que la regulación del controlador diseñado en este trabajo fue mucho mejor. También se efectuó una comparación con un control descentralizado en el cual cada controlador consiste de un banco de controladores LQG pero conmutados con lógica estándar (gain scheduling clásico) en cada tramo del canal. Nuevamente el desempeño del controlador diseñado en esta tesis fue mucho mejor.

Los resultados satisfactorios muestran que este controlador puede ser una buena opción para efectuar la regulación de los niveles en un canal en campo.

Como trabajo futuro se pretende implementar el controlador diseñado en tiempo real en el prototipo estudiado y el diseño de un estimador para el flujo a la entrada a cada tramo, que evite el uso de un sensor de flujo para el mismo.

## Referencias

- [1] Anderson B. D. O. And J. B. Moore, *Optimal Control: Linear Quadratic Methods*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. Y., USA, 1990.
- [2] Bristol E. H. "On a new measure of interaction for multivariable process control" *IEEE Trans. Automatic Control*, AC-II, pp. 133-134, 1966.
- [3] Dorato P., C. Abdallah and V. Cerone, *Linear-Quadratic Control: An Introduction*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J., USA, 1995.
- [4] Driankov D., Hellendoorn H and Reinfrank M., *An introduction to Fuzzy Control*, 2<sup>nd</sup> ed., Springer, USA, 1996.
- [5] Felipe J. C., "Diseño de un control LQG descentralizado para un prototipo de canal de riego y su implementación en tiempo real", *Tesis de Maestría*, Cinvestav, México, Noviembre, 2004.
- [6] Malaterre P. O., Modelization, "Analysis and LQR Optimal Control of an Irrigation Canal", *Ph.D Thesis*", LAAS-CNRS-ENGREF-Cemagref, Motpellier, 1994.
- [7] Maldonado C. M., "Seguimiento de trayectoria utilizando Control Difuso Tipo Takagi-Sugeno", *Tesis de Maestría*, México, 1999.

- [8] Mareels I., E. Weyer, S.-K. Ooi, M. Cantoni, Y. Li and G. Nair, "Systems engineering for irrigation systems: Successes and challenges." *16th IFAC World Congress*, Prague, Czech Republic, July, 2005
- [9] Passino K. M. and Yurkovich S., *Fuzzy Control*, Addison-Wesley, USA, 1998.
- [10] Salinas J. A., "Banco de Controladores conmutados con Lógica Difusa para un Prototipo de Canal de Riego", *Tesis de Maestría*, Cinvestav, México, Julio, 2003.
- [11] Skogestad S., I. Postlethwaite, *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design*, John Wiley and Sons, N. Y., USA, 1996.
- [12] Wonham W., *Linear Multivariable Control: A Geometric Approach*, Springer-Verlang, N. Y., USA, 1985.
- [13] Zadeh L. A., "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes", *IEEE Trans. Syst. Man. Cyber.*, SMC-3(1): pp. 28-44, January, 1973.
- [14] Zapien J. C., Begovich O., Ruiz V. M., "Control óptimo aguas arriba en la operación del canal largo del IMTA", *Memorias en CD del XI Congreso Nacional de Irrigación*, Guanajuato, Guanajuato, México, pp. 13-20, Septiembre, 2001.

# Apéndice

## 1. Programa en lenguaje FORTRAN

```

SUBROUTINE SUSER1
C-----Routine de supervision eventuelle
END

SUBROUTINE LUSER1(CHAIN,PARA)
CHARACTER CHAIN*(*)
COMMON/F1/IERORR
DIMENSION PARA(*)
C      READ (CHAIN,'(F3.0)',ERR=100)
PARA(1)
C-----The following lines are just to prevent
warning F4202 of the
C-----Fortran compiler
CHAIN=CHAIN
PARA(1)=PARA(1)
RETURN
100 CONTINUE
IERORR=2
END

SUBROUTINE CUSER1(U,Y,YT,Z,PARA)
C-----Calcul de la commande U a partir des
variables controlles Y
C-----des consignes correspondantes YT et des
variables mesurees Z
C-----Exemple d'utilisation de CUSER1 pour
imprimer des variables sur
C-----le fichier .LST

COMMON/TEMPS/FIC1,TDEB,FIC2,DT,T,TFI
N,FIC3

COMMON/P1/ILNPS,INURE,INUAP(100),IRE
GS
DIMENSION U(*),Y(*),YT(*),Z(*),PARA(*)
C      ----DEFINICION DE LAS VARIABLES Y
CONSTANTES A UTILIZAR----

C      *****CONSTANTES
PARA EL MODELO DE 80

C ----ENTRADA U80 PARA EL CONTROL
DEL MODELO DE 80L
DIMENSION U80(3)

C ----MATRIZ Acoda DEL FILTRO DE
KALMAN
DIMENSION A8011(2,2)
DIMENSION A8022(2,2)
DIMENSION A8033(2,2)

C-----MATRIZ Bcoda DEL FILTRO DE
KALMAN
DIMENSION B8011(2,1)
DIMENSION B8022(2,1)
DIMENSION B8033(2,1)

C-----MATRIZ Ccoda DEL FILTRO DE
KALMAN
DIMENSION C8011(1,2)
DIMENSION C8022(1,2)
DIMENSION C8033(1,2)

C-----MATRIZ DE GANANCIA Ld DEL
FILTRO DE KALMAN

```

```

DIMENSION GKALM8011(2,1)
DIMENSION GKALM8022(2,1)
DIMENSION GKALM8033(2,1)

C----MATRIZ Kcd DEL CONTROL LQR
DIMENSION GLQ8011(1,2)
DIMENSION GLQ8022(1,2)
DIMENSION GLQ8033(1,2)

C----SALIDAS ESTIMADAS
DIMENSION YE80(3)

C----ESTADOS ESTIMADOS
DIMENSION XBARRA8011(2,1)
DIMENSION XBARRA8022(2,1)
DIMENSION XBARRA8033(2,1)

DIMENSION AX8011(2,1)
DIMENSION AX8022(2,1)
DIMENSION AX8033(2,1)

C----CONTROL ANTES DEL INTEGRADOR
DIMENSION UP80(3)

C----entrada antes del sumador
DIMENSION XP8011(2,1)
DIMENSION XP8022(2,1)
DIMENSION XP8033(2,1)

C----SEÑAL DE ERROR
DIMENSION ERROR80(3)

C----SEÑAL DEL ERROR POR LAC
GANACIA DE KALMAN
DIMENSION XERROR8011(2,1)
DIMENSION XERROR8022(2,1)
DIMENSION XERROR8033(2,1)

C----LA DERIVADA DEL ESTADO
DIMENSION DERX8011(2,1)
DIMENSION DERX8022(2,1)
DIMENSION DERX8033(2,1)

C----TIRANTES NORMALIZADOS
DIMENSION YTIRANTES(3)

C----VARIABLE AUXILIAR PARA
CALCULAR LA INTEGRAL AL CONTROL
DIMENSION UAUX80(3)

DIMENSION UPPAS80(3)

DIMENSION UREAL80(3)

C----VARIABLE AUXI PARA CALCULAR EL
PRODUCTO DEL ERROR POR LA
GANACIA DE KALMAN
C DIMENSION AUXI(3)

DIMENSION DERANT8011(2,1)
DIMENSION DERANT8022(2,1)
DIMENSION DERANT8033(2,1)

C *****CONSTANTES
PARA EL MODELO DE
65*****

C ---ENTRADA U65 PARA EL CONTROL
DEL MODELO DE 65L
DIMENSION U65(3)

C ---MATRIZ Acoda DEL FILTRO DE
KALMAN
DIMENSION A6511(2,2)
DIMENSION A6522(2,2)
DIMENSION A6533(2,2)

C----MATRIZ Bcoda DEL FILTRO DE
KALMAN
DIMENSION B6511(2,1)
DIMENSION B6522(2,1)
DIMENSION B6533(2,1)

C----MATRIZ Ccoda DEL FILTRO DE
KALMAN
DIMENSION C6511(1,2)
DIMENSION C6522(1,2)
DIMENSION C6533(1,2)

C----MATRIZ DE GANACIA Ld DEL
FILTRO DE KALMAN
DIMENSION GKALM6511(2,1)
DIMENSION GKALM6522(2,1)
DIMENSION GKALM6533(2,1)

C----MATRIZ Kcd DEL CONTROL LQR
DIMENSION GLQ6511(1,2)
DIMENSION GLQ6522(1,2)
DIMENSION GLQ6533(1,2)

C----SALIDAS ESTIMADAS
DIMENSION YE65(3)

C----ESTADOS ESTIMADOS
DIMENSION XBARRA6511(2,1)
DIMENSION XBARRA6522(2,1)

```

```

DIMENSION XBARRA6533(2,1)
DIMENSION AX6511(2,1)
DIMENSION AX6522(2,1)
DIMENSION AX6533(2,1)
C-----CONTROL ANTES DEL INTEGRADOR
DIMENSION UP65(3)
C-----entrada antes del sumador
DIMENSION XP6511(2,1)
DIMENSION XP6522(2,1)
DIMENSION XP6533(2,1)
C-----SEÑAL DE ERROR
DIMENSION ERROR65(3)
C-----SEÑAL DEL ERROR POR LAC
GANACIA DE KALMAN
DIMENSION XERROR6511(2,1)
DIMENSION XERROR6522(2,1)
DIMENSION XERROR6533(2,1)
C-----LA DERIVADA DEL ESTADO
DIMENSION DERX6511(2,1)
DIMENSION DERX6522(2,1)
DIMENSION DERX6533(2,1)
C-----TIRANTES NORMALIZADOS
C DIMENSION YTIRANTES(3)
C-----VARIABLE AUXILIAR PARA
CALCULAR LA INTEGRAL AL CONTROL
DIMENSION UAUX65(3)
DIMENSION UPPAS65(3)
DIMENSION UREAL65(3)
C-----VARIABLE AUXI PARA CALCULAR EL
PRODUCTO DEL ERROR POR LA
GANANCIA DE KALMAN
C DIMENSION AUXI(3)
DIMENSION DERANT6511(2,1)
DIMENSION DERANT6522(2,1)
DIMENSION DERANT6533(2,1)
C *****CONSTANTES
PARA EL MODELO DE 65 hacia
abajo*****
C ----ENTRADA U60 PARA EL CONTROL
DEL MODELO DE 65L hacia abajo
DIMENSION U60(3)
C ----MATRIZ Acoda DEL FILTRO DE
KALMAN
DIMENSION A6011(2,2)
DIMENSION A6022(2,2)
DIMENSION A6033(2,2)
C-----MATRIZ Bcoda DEL FILTRO DE
KALMAN
DIMENSION B6011(2,1)
DIMENSION B6022(2,1)
DIMENSION B6033(2,1)
C-----MATRIZ Ccoda DEL FILTRO DE
KALMAN
DIMENSION C6011(1,2)
DIMENSION C6022(1,2)
DIMENSION C6033(1,2)
C-----MATRIZ DE GANANCIA Ld DEL
FILTRO DE KALMAN
DIMENSION GKALM6011(2,1)
DIMENSION GKALM6022(2,1)
DIMENSION GKALM6033(2,1)
C-----MATRIZ Kcd DEL CONTROL LQR
DIMENSION GLQ6011(1,2)
DIMENSION GLQ6022(1,2)
DIMENSION GLQ6033(1,2)
C-----SALIDAS ESTIMADAS
DIMENSION YE60(3)
C-----ESTADOS ESTIMADOS
DIMENSION XBARRA6011(2,1)
DIMENSION XBARRA6022(2,1)
DIMENSION XBARRA6033(2,1)
DIMENSION AX6011(2,1)
DIMENSION AX6022(2,1)
DIMENSION AX6033(2,1)
C-----CONTROL ANTES DEL INTEGRADOR
DIMENSION UP60(3)
C-----entrada antes del sumador
DIMENSION XP6011(2,1)
DIMENSION XP6022(2,1)
DIMENSION XP6033(2,1)
C-----SEÑAL DE ERROR
DIMENSION ERROR60(3)

```

```

C----SEÑAL DEL ERROR POR LAC
GANACIA DE KALMAN
  DIMENSION XERROR6011(2,1)
  DIMENSION XERROR6022(2,1)
  DIMENSION XERROR6033(2,1)

C----LA DERIVADA DEL ESTADO
  DIMENSION DERX6011(2,1)
  DIMENSION DERX6022(2,1)
  DIMENSION DERX6033(2,1)

C----TIRANTES NORMALIZADOS
C  DIMENSION YTIRANTES(3)

C----VARIABLE AUXILIAR PARA
CALCULAR LA INTEGRAL AL CONTROL
  DIMENSION UAUX60(3)

  DIMENSION UPPAS60(3)

  DIMENSION UREAL60(3)

C----VARIABLE AUXI PARA CALCULAR EL
PRODUCTO DEL ERROR POR LA
GANACIA DE KALMAN
C  DIMENSION AUXI(3)

  DIMENSION DERANT6011(2,1)
  DIMENSION DERANT6022(2,1)
  DIMENSION DERANT6033(2,1)

C          *****CONSTANTES
PARA      EL      MODELO      DE
50*****

C----ENTRADA U50 PARA EL CONTROL
DEL MODELO DE 50L
  DIMENSION U50(3)

C----MATRIZ Acoda DEL FILTRO DE
KALMAN
  DIMENSION A5011(2,2)
  DIMENSION A5022(2,2)
  DIMENSION A5033(2,2)

C----MATRIZ Bcoda DEL FILTRO DE
KALMAN
  DIMENSION B5011(2,1)
  DIMENSION B5022(2,1)
  DIMENSION B5033(2,1)

C----MATRIZ Ccoda DEL FILTRO DE
KALMAN
  DIMENSION C5011(1,2)
  DIMENSION C5022(1,2)
  DIMENSION C5033(1,2)

C----MATRIZ DE GANANCIA Ld DEL
FILTRO DE KALMAN
  DIMENSION GKALM5011(2,1)
  DIMENSION GKALM5022(2,1)
  DIMENSION GKALM5033(2,1)

C----MATRIZ Kcd DEL CONTROL LQR
  DIMENSION GLQ5011(1,2)
  DIMENSION GLQ5022(1,2)
  DIMENSION GLQ5033(1,2)

C----SALIDAS ESTIMADAS
  DIMENSION YE50(3)

C----ESTADOS ESTIMADOS
  DIMENSION XBARRA5011(2,1)
  DIMENSION XBARRA5022(2,1)
  DIMENSION XBARRA5033(2,1)

  DIMENSION AX5011(2,1)
  DIMENSION AX5022(2,1)
  DIMENSION AX5033(2,1)

C----CONTROL ANTES DEL INTEGRADOR
  DIMENSION UP50(3)

C----entrada antes del sumador
  DIMENSION XP5011(2,1)
  DIMENSION XP5022(2,1)
  DIMENSION XP5033(2,1)

C----SEÑAL DE ERROR
  DIMENSION ERROR50(3)

C----SEÑAL DEL ERROR POR LAC
GANACIA DE KALMAN
  DIMENSION XERROR5011(2,1)
  DIMENSION XERROR5022(2,1)
  DIMENSION XERROR5033(2,1)

C----LA DERIVADA DEL ESTADO
  DIMENSION DERX5011(2,1)
  DIMENSION DERX5022(2,1)
  DIMENSION DERX5033(2,1)

C----TIRANTES NORMALIZADOS
C  DIMENSION YTIRANTES(3)

C----VARIABLE AUXILIAR PARA
CALCULAR LA INTEGRAL AL CONTROL
  DIMENSION UAUX50(3)

```

DIMENSION UPPAS50(3)

DIMENSION UREAL50(3)

C-----VARIABLE AUXI PARA CALCULAR EL PRODUCTO DEL ERROR POR LA GANANCIA DE KALMAN

C DIMENSION AUXI(3)

DIMENSION DERANT5011(2,1)

DIMENSION DERANT5022(2,1)

DIMENSION DERANT5033(2,1)

C

\*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*

C-----The following lines are just to prevent warning F4202 of the

C-----Fortran compiler

U(1)=U(1)

Y(1)=Y(1)

YT(1)=YT(1)

Z(1)=Z(1)

PARA(1)=PARA(1)

C

\*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*

C

\*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*

C \*\* PROGRAMA PARA EL CANAL DE RIEGO DEL \*\*

C \*\* LABORATORIO DEL IMTA \*\*

C \*\* Elaborado en enero del 2006 Evaristo Mtz. Maldonado \*\*

C \*\* CINVESTAV, Unidad Gualadajara \*\*

C \*\* CON CONTROL EN TIEMPO DISCRETO FUNCIONANDO \*\*

C \*\* MODIFICADO PARA LA VERSION 3.8 06-02-2006 \*\*

C

\*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*

C

\*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*

C \*\*\*\*\*IDENTIFICACIÓN,  
 GANANCIAS Y TIRANTES DE 80  
 L\*\*\*\*\*

C-----SISTEMA 1.1

A8011(1,1)=-0.02083

A8011(1,2)=0.0

A8011(2,1)=0.25

A8011(1,2)=0.0

B8011(1,1)=0.25

B8011(2,1)=0.0

C8011(1,2)=0.0

C8011(2,2)=0.28333

C-----SISTEMA 2.2

A8022(1,1)=-0.00671

A8022(1,2)=0.0

A8022(2,1)=0.25

A8022(1,2)=0.0

B8022(1,1)=0.125

B8022(2,1)=0.0

C8022(1,2)=0.0

C8022(2,2)=0.15570

C-----SISTEMA 3.3

A8033(1,1)=-0.00306

A8033(1,2)=0.0

A8033(2,1)=0.25

A8033(1,2)=0.0

B8033(1,1)=0.25

B8033(2,1)=0.0

C8033(1,2)=0.0

C8033(2,2)=0.25153

C-----GANANCIAS LQ Kc

GLQ8011(1,1)=1.257898e+000

GLQ8011(1,2)=8.959787e-001

GLQ8022(1,1)=1.350733e+000

GLQ8022(1,2)=4.923815e-001

GLQ8033(1,1)=2.230680e+000

GLQ8033(1,2)=2.515337e+000

C-----GANANCIAS KALMAN Ld

GKALM8011(1,1)=9.243445e-001

GKALM8011(2,1)=1.277183e+000

GKALM8022(1,1)=1.844079e+000

GKALM8022(2,1)=2.433458e+000

GKALM8033(1,1)=7.025216e+000  
 GKALM8033(2,1)=3.736945e+000

GLQ6522(1,2)=8.723483e-001  
 GLQ6533(1,1)=2.258282e+000  
 GLQ6533(1,2)=2.569472e+000

DELTA=DT

C-----GANANCIAS KALMAN Ld

C----NORMALIZACION DE NIVELES

YTIRANTES(1)=Y(1)-.707000000  
 YTIRANTES(2)=Y(2)-.635000000  
 YTIRANTES(3)=Y(3)-.575000000

GKALM6511(1,1)=1.355043e+000  
 GKALM6511(2,1)=1.589989e+000  
 GKALM6522(1,1)=2.736757e+000  
 GKALM6522(2,1)=1.574864e+000  
 GKALM6533(1,1)=3.795284e+000  
 GKALM6533(2,1)=2.717598e+000

C \*\*\*\*\*IDENTIFICACIÓN, GANANCIAS  
 Y TIRANTES DE 65 L\*\*\*\*\*

C DELTA=DT

C----NORMALIZACION DE NIVELES

C-----SISTEMA 1.1

A6511(1,1)=-0.013889  
 A6511(1,2)=0.0  
 A6511(2,1)=0.25  
 A6511(1,2)=0.0  
 B6511(1,1)=0.25  
 B6511(2,1)=0.0  
 C6511(1,2)=0.0  
 C6511(2,2)=0.268

C YTIRANTES(1)=Y(1)-.707000000  
 C YTIRANTES(2)=Y(2)-.635000000  
 C YTIRANTES(3)=Y(3)-.571000000

C \*\*\*\*\*IDENTIFICACIÓN, GANANCIAS  
 Y TIRANTES DE 65 L hacia  
 abajo\*\*\*\*\*

C-----SISTEMA 2.2

A6522(1,1)=-0.0046296  
 A6522(1,2)=0.0  
 A6522(2,1)=0.125  
 A6522(1,2)=0.0  
 B6522(1,1)=0.125  
 B6522(2,1)=0.0  
 C6522(1,2)=0.0  
 C6522(2,2)=0.27586

C-----SISTEMA 1.1

A6011(1,1)=-0.0233  
 A6011(1,2)=0  
 A6011(2,1)=0.125  
 A6011(1,2)=0  
 B6011(1,1)=0.125  
 B6011(2,1)=0  
 C6011(1,2)=0  
 C6011(2,2)=-0.1027

C-----SISTEMA 3.3

A6533(1,1)=-0.0021645  
 A6533(1,2)=0.0  
 A6533(2,1)=0.25  
 A6533(1,2)=0.0  
 B6533(1,1)=0.25  
 B6533(2,1)=0.0  
 C6533(1,2)=0.0  
 C6533(2,2)=0.25695

C-----SISTEMA 2.2

A6022(1,1)=-0.0072  
 A6022(1,2)=0  
 A6022(2,1)=0.125  
 A6022(1,2)=0  
 B6022(1,1)=0.125  
 B6022(2,1)=0  
 C6022(1,2)=0  
 C6022(2,2)=-0.2542

C-----GANANCIAS LQ Kc

GLQ6511(1,1)=1.247544e+000  
 GLQ6511(1,2)=8.474904e-001  
 GLQ6522(1,1)=1.284352e+000

C-----SISTEMA 3.3

A6033(1,1)=-0.0051  
 A6033(1,2)=0  
 A6033(2,1)=0.25

A6033(1,2)=0  
 B6033(1,1)=0.25  
 B6033(2,1)=0  
 C6033(1,2)=0  
 C6033(2,2)=-0.2986

C-----GANANCIAS Kcd

GLQ6011(1,1)=6.410753e-001  
 GLQ6011(1,2)=3.247586e-001  
 GLQ6022(1,1)=1.211600e+000  
 GLQ6022(1,2)=8.037190e-001  
 GLQ6033(1,1)=1.614176e+000  
 GLQ6033(1,2)=1.335557e+000

C-----GANANCIAS Ld

GKALM6011(1,1)=-3.416321e+000  
 GKALM6011(2,1)=-2.883826e+000  
 GKALM6022(1,1)=-2.701269e+000  
 GKALM6022(2,1)=-1.630053e+000  
 GKALM6033(1,1)=-1.240746e+001  
 GKALM6033(2,1)=-4.557773e+000

C DELTA=DT

C----NORMALIZACION DE NIVELES

C YTIRANTES(1)=Y(1)-.707000000  
 C YTIRANTES(2)=Y(2)-.635000000  
 C YTIRANTES(3)=Y(3)-.571000000

C \*\*\*\*\*IDENTIFICACIÓN, GANANCIAS  
 Y TIRANTES DE 50 L\*\*\*\*\*

C-----SISTEMA 1.1

A5011(1,1)=-0.01190  
 A5011(1,2)=0.0  
 A5011(2,1)=0.25  
 A5011(1,2)=0.0  
 B5011(1,1)=0.25  
 B5011(2,1)=0.0  
 C5011(1,2)=0.0  
 C5011(2,2)=0.3896

C-----SISTEMA 2.2

A5022(1,1)=-0.00278  
 A5022(1,2)=0.0  
 A5022(2,1)=0.25  
 A5022(1,2)=0.0

B5022(1,1)=0.125  
 B5022(2,1)=0.0  
 C5022(1,2)=0.0  
 C5022(2,2)=0.16085

C-----SISTEMA 3.3

A5033(1,1)=-0.00153  
 A5033(1,2)=0.0  
 A5033(2,1)=0.25  
 A5033(1,2)=0.0  
 B5033(1,1)=0.25  
 B5033(2,1)=0.0  
 C5033(1,2)=0.0  
 C5033(2,2)=0.26526

C-----GANANCIAS LQ Kc

GLQ5011(1,1)=3.065983e-001  
 GLQ5011(1,2)=6.160117e-002  
 GLQ5022(1,1)=2.559738e-001  
 GLQ5022(1,2)=1.922480e-002  
 GLQ5033(1,1)=5.473503e-001  
 GLQ5033(1,2)=1.531490e-001

C-----GANANCIAS KALMAN Ld

GKALM5011(1,1)=5.464070e+000  
 GKALM5011(2,1)=2.648096e+000  
 GKALM5022(1,1)=1.362076e+001  
 GKALM5022(2,1)=6.506992e+000  
 GKALM5033(1,1)=4.077113e+001  
 GKALM5033(2,1)=8.766454e+000

C DELTA=DT

C----NORMALIZACION DE NIVELES

C YTIRANTES(1)=Y(1)-.707000000  
 C YTIRANTES(2)=Y(2)-.635000000  
 C YTIRANTES(3)=Y(3)-.575000000

C----- DISEÑO DEL  
 CONTROL PARA 80 L-----

C----CALCULO DEL ERROR

DO 54 I=1,3  
 ERROR80(I)=YTIRANTES(I)-YE80(I)  
 54 CONTINUE

## C-----MULTIPLICACION DEL ERROR POR LA GANACIA DE KALMAN

$$XERROR8011(1,1)=GKALM8011(1,1)*ERROR80(1)$$

$$XERROR8011(2,1)=GKALM8011(2,1)*ERROR80(1)$$

$$XERROR8022(1,1)=GKALM8022(1,1)*ERROR80(2)$$

$$XERROR8022(2,1)=GKALM8022(2,1)*ERROR80(2)$$

$$XERROR8033(1,1)=GKALM8033(1,1)*ERROR80(3)$$

$$XERROR8033(2,1)=GKALM8033(2,1)*ERROR80(3)$$

## C-----MULTIPLICACION DE LA MATRIZ A POR LOS ESTADOS

$$AX8011(1,1)=A8011(1,1)*XBARRA8011(1,1)$$

$$AX8011(2,1)=A8011(2,1)*XBARRA8011(1,1)$$

$$AX8022(1,1)=A8022(1,1)*XBARRA8022(1,1)$$

$$AX8022(2,1)=A8022(2,1)*XBARRA8022(1,1)$$

$$AX8033(1,1)=A8033(1,1)*XBARRA8033(1,1)$$

$$AX8033(2,1)=A8033(2,1)*XBARRA8033(1,1)$$

## C-----MULTIPLICACION DE LA ENTRADA POR LA MATRIZ Bcoda

$$XP8011(1,1)=UP80(1)*B8011(1,1)$$

$$XP8011(2,1)=UP80(1)*B8011(2,1)$$

$$XP8022(1,1)=UP80(2)*B8022(1,1)$$

$$XP8022(2,1)=UP80(2)*B8022(2,1)$$

$$XP8033(1,1)=UP80(3)*B8033(1,1)$$

$$XP8033(2,1)=UP80(3)*B8033(2,1)$$

## C-----SUMADOR

$$DERX8011(1,1)=AX8011(1,1)+XERROR8011(1,1)+XP8011(1,1)$$

$$DERX8011(2,1)=AX8011(2,1)+XERROR8011(2,1)+XP8011(2,1)$$

$$DERX8022(1,1)=AX8022(1,1)+XERROR8022(1,1)+XP8022(1,1)$$

$$DERX8022(2,1)=AX8022(2,1)+XERROR8022(2,1)+XP8022(2,1)$$

$$DERX8033(1,1)=AX8033(1,1)+XERROR8033(1,1)+XP8033(1,1)$$

$$DERX8033(2,1)=AX8033(2,1)+XERROR8033(2,1)+XP8033(2,1)$$

## C-----MULTIPLICACION DE LA MATRIZ Kcd POR LOS ESTADOS

$$UP80(1)=GLQ8011(1,1)*XBARRA8011(1,1)+GLQ8011(1,2)*XBARRA8011(2,1)$$

$$UP80(2)=GLQ8022(1,1)*XBARRA8022(1,1)+GLQ8022(1,2)*XBARRA8022(2,1)$$

$$UP80(3)=GLQ8033(1,1)*XBARRA8033(1,1)+GLQ8033(1,2)*XBARRA8033(2,1)$$

## C-----MULTIPLICACION DEL ESTADO POR LA SALIDA

$$YE80(1)=C8011(1,1)*XBARRA8011(1,1)+C8011(1,2)*XBARRA8011(2,1)$$

$$YE80(2)=C8022(1,1)*XBARRA8022(1,1)+C8022(1,2)*XBARRA8022(2,1)$$

$$YE80(3)=C8033(1,1)*XBARRA8033(1,1)+C8033(1,2)*XBARRA8033(2,1)$$

<p>C-----INTEGRACION DE LA ENTRADA</p> <p>UAUX80(1)=0.0015*((UP80(1)+UPPAS80(1))/2)          UREAL80(1)=UREAL80(1)+UAUX80(1)</p> <p>UAUX80(2)=0.0015*((UP80(2)+UPPAS80(2))/2)          UREAL80(2)=UREAL80(2)+UAUX80(2)</p> <p>UAUX80(3)=0.0015*((UP80(3)+UPPAS80(3))/2)          UREAL80(3)=UREAL80(3)+UAUX80(3)</p> <p>C DO 50 I=1,3          C U(I)=0.20+UREAL80(I)          U80(1)=0.20+UREAL80(1)          U80(2)=0.20+UREAL80(2)          U80(3)=0.20+UREAL80(3)</p> <p>C----- DISEÑO DEL          CONTROL PARA 65 L-----</p> <p>C----CALCULO DEL ERROR</p> <p>DO 55 I=1,3          ERROR65(I)=YTIRANTES(I)-YE65(I)          55 CONTINUE</p> <p>C----MULTIPLICACION DEL ERROR POR          LA GANACIA DE KALMAN</p> <p>XERROR6511(1,1)=GKALM6511(1,1)*ERROR          65(1)</p> <p>XERROR6511(2,1)=GKALM6511(2,1)*ERROR          65(1)</p> <p>XERROR6522(1,1)=GKALM6522(1,1)*ERROR          65(2)</p> <p>XERROR6522(2,1)=GKALM6522(2,1)*ERROR          65(2)</p> <p>XERROR6533(1,1)=GKALM6533(1,1)*ERROR          65(3)</p>	<p>XERROR6533(2,1)=GKALM6533(2,1)*ERROR          65(3)</p> <p>C----MULTIPLICACION DE LA MATRIZ A          POR LOS ESTADOS</p> <p>AX6511(1,1)=A6511(1,1)*XBARRA6511(1,1)</p> <p>AX6511(2,1)=A6511(2,1)*XBARRA6511(1,1)</p> <p>AX6522(1,1)=A6522(1,1)*XBARRA6522(1,1)</p> <p>AX6522(2,1)=A6522(2,1)*XBARRA6522(1,1)</p> <p>AX6533(1,1)=A6533(1,1)*XBARRA6533(1,1)</p> <p>AX6533(2,1)=A6533(2,1)*XBARRA6533(1,1)</p> <p>C----MULTIPLICACION DE LA ENTRADA          POR LA MATRIZ Bcoda</p> <p>XP6511(1,1)=UP65(1)*B6511(1,1)          XP6511(2,1)=UP65(1)*B6511(2,1)</p> <p>XP6522(1,1)=UP65(2)*B6522(1,1)          XP6522(2,1)=UP65(2)*B6522(2,1)</p> <p>XP6533(1,1)=UP65(3)*B6533(1,1)          XP6533(2,1)=UP65(3)*B6533(2,1)</p> <p>C----SUMADOR</p> <p>DERX6511(1,1)=AX6511(1,1)+XERROR6511(1,          1)+XP6511(1,1)</p> <p>DERX6511(2,1)=AX6511(2,1)+XERROR6511(2,          1)+XP6511(2,1)</p> <p>DERX6522(1,1)=AX6522(1,1)+XERROR6522(1,          1)+XP6522(1,1)</p> <p>DERX6522(2,1)=AX6522(2,1)+XERROR6522(2,          1)+XP6522(2,1)</p>
---	---

```

DERX6533(1,1)=AX6533(1,1)+XERROR6533(1,
1)+XP6533(1,1)
DERX6533(2,1)=AX6533(2,1)+XERROR6533(2,
1)+XP6533(2,1)

C-----MULTIPLICACION DE LA MATRIZ Kcd
POR LOS ESTADOS

UP65(1)=GLQ6511(1,1)*XBARRA6511(1,1)+G
LQ6511(1,2)*XBARRA6511(2,1)
UP65(2)=GLQ6522(1,1)*XBARRA6522(1,1)+G
LQ6522(1,2)*XBARRA6522(2,1)
UP65(3)=GLQ6533(1,1)*XBARRA6533(1,1)+G
LQ6533(1,2)*XBARRA6533(2,1)

C-----MULTIPLICACION DEL ESTADO POR
LA SALIDA

YE65(1)=C6511(1,1)*XBARRA6511(1,1)+C651
1(1,2)*XBARRA6511(2,1)
YE65(2)=C6522(1,1)*XBARRA6522(1,1)+C652
2(1,2)*XBARRA6522(2,1)
YE65(3)=C6533(1,1)*XBARRA6533(1,1)+C653
3(1,2)*XBARRA6533(2,1)

C-----INTEGRACION DE LA ENTRADA

UAUX65(1)=0.0015*((UP65(1)+UPPAS65(1))/2)
UREAL65(1)=UREAL65(1)+UAUX65(1)

UAUX65(2)=0.0015*((UP65(2)+UPPAS65(2))/2)
UREAL65(2)=UREAL65(2)+UAUX65(2)

UAUX65(3)=0.0015*((UP65(3)+UPPAS65(3))/2)
UREAL65(3)=UREAL65(3)+UAUX65(3)

C DO 50 I=1,3
C U(I)=0.20+UREAL65(I)
U65(1)=0.147+UREAL65(1)
U65(2)=0.147+UREAL65(2)

U65(3)=0.156+UREAL65(3)

C----- DISEÑO DEL
CONTROL PARA 65 L hacia abajo -----

C----CALCULO DEL ERROR

DO 56 I=1,3

ERROR60(I)=YTIRANTES(I)-YE60(I)

56 CONTINUE

C-----MULTIPLICACION DEL ERROR POR
LA GANANCIA DE KALMAN

XERROR6011(1,1)=GKALM6011(1,1)*ERROR
60(1)
XERROR6011(2,1)=GKALM6011(2,1)*ERROR
60(1)

XERROR6022(1,1)=GKALM6022(1,1)*ERROR
60(2)
XERROR6022(2,1)=GKALM6022(2,1)*ERROR
60(2)

XERROR6033(1,1)=GKALM6033(1,1)*ERROR
60(3)
XERROR6033(2,1)=GKALM6033(2,1)*ERROR
60(3)

C-----MULTIPLICACION DE LA MATRIZ A
POR LOS ESTADOS

AX6011(1,1)=A6011(1,1)*XBARRA6011(1,1)
AX6011(2,1)=A6011(2,1)*XBARRA6011(1,1)

AX6022(1,1)=A6022(1,1)*XBARRA6022(1,1)
AX6022(2,1)=A6022(2,1)*XBARRA6022(1,1)

```

AX6033(1,1)=A6033(1,1)\*XBARRA6033(1,1)

AX6033(2,1)=A6033(2,1)\*XBARRA6033(1,1)

C-----MULTIPLICACION DE LA ENTRADA  
POR LA MATRIZ Bcoda

XP6011(1,1)=UP60(1)\*B6011(1,1)

XP6011(2,1)=UP60(1)\*B6011(2,1)

XP6022(1,1)=UP60(2)\*B6022(1,1)

XP6022(2,1)=UP60(2)\*B6022(2,1)

XP6033(1,1)=UP60(3)\*B6033(1,1)

XP6033(2,1)=UP60(3)\*B6033(2,1)

C-----SUMADOR

DERX6011(1,1)=AX6011(1,1)+XERROR6011(1,  
1)+XP6011(1,1)

DERX6011(2,1)=AX6011(2,1)+XERROR6011(2,  
1)+XP6011(2,1)

DERX6022(1,1)=AX6022(1,1)+XERROR6022(1,  
1)+XP6022(1,1)

DERX6022(2,1)=AX6022(2,1)+XERROR6022(2,  
1)+XP6022(2,1)

DERX6033(1,1)=AX6033(1,1)+XERROR6033(1,  
1)+XP6033(1,1)

DERX6033(2,1)=AX6033(2,1)+XERROR6033(2,  
1)+XP6033(2,1)

C-----MULTIPLICACION DE LA MATRIZ Kcd  
POR LOS ESTADOS

UP60(1)=GLQ6011(1,1)\*XBARRA6011(1,1)+G  
LQ6011(1,2)\*XBARRA6011(2,1)

UP60(2)=GLQ6022(1,1)\*XBARRA6022(1,1)+G  
LQ6022(1,2)\*XBARRA6022(2,1)

UP60(3)=GLQ6033(1,1)\*XBARRA6033(1,1)+G  
LQ6033(1,2)\*XBARRA6033(2,1)

C-----MULTIPLICACION DEL ESTADO POR  
LA SALIDA

YE60(1)=C6011(1,1)\*XBARRA6011(1,1)+C601  
1(1,2)\*XBARRA6011(2,1)

YE60(2)=C6022(1,1)\*XBARRA6022(1,1)+C602  
2(1,2)\*XBARRA6022(2,1)

YE60(3)=C6033(1,1)\*XBARRA6033(1,1)+C603  
3(1,2)\*XBARRA6033(2,1)

C-----INTEGRACION DE LA ENTRADA

UAUX60(1)=0.0015\*((UP60(1)+UPPAS60(1))/2)  
UREAL60(1)=UREAL60(1)+UAUX60(1)

UAUX60(2)=0.0015\*((UP60(2)+UPPAS60(2))/2)  
UREAL60(2)=UREAL60(2)+UAUX60(2)

UAUX60(3)=0.0015\*((UP60(3)+UPPAS60(3))/2)  
UREAL60(3)=UREAL60(3)+UAUX60(3)

C DO 50 I=1,3  
C U60(1)=0.20-UREAL60(1)  
U60(1)=0.147-UREAL60(1)  
U60(2)=0.147-UREAL60(2)  
U60(3)=0.156-UREAL60(3)

C----- DISEÑO DEL CONTROL  
PARA 50 L-----

C-----CALCULO DEL ERROR

DO 57 I=1,3  
ERROR50(I)=YTIRANTES(I)-YE50(I)  
57 CONTINUE

C-----MULTIPLICACION DEL ERROR POR  
LA GANANCIA DE KALMAN

XERROR5011(1,1)=GKALM5011(1,1)\*ERROR  
50(1)

XERROR5011(2,1)=GKALM5011(2,1)\*ERROR  
50(1)

XERROR5022(1,1)=GKALM5022(1,1)\*ERROR  
50(2)

XERROR5022(2,1)=GKALM5022(2,1)\*ERROR  
50(2)

XERROR5033(1,1)=GKALM5033(1,1)\*ERROR  
50(3)

XERROR5033(2,1)=GKALM5033(2,1)\*ERROR  
50(3)

C-----MULTIPLICACION DE LA MATRIZ A  
POR LOS ESTADOS

AX5011(1,1)=A5011(1,1)\*XBARRA5011(1,1)

AX5011(2,1)=A5011(2,1)\*XBARRA5011(1,1)

AX5022(1,1)=A5022(1,1)\*XBARRA5022(1,1)

AX5022(2,1)=A5022(2,1)\*XBARRA5022(1,1)

AX5033(1,1)=A5033(1,1)\*XBARRA5033(1,1)

AX5033(2,1)=A5033(2,1)\*XBARRA5033(1,1)

C-----MULTIPLICACION DE LA ENTRADA  
POR LA MATRIZ Bcoda

XP5011(1,1)=UP50(1)\*B5011(1,1)  
XP5011(2,1)=UP50(1)\*B5011(2,1)

XP5022(1,1)=UP50(2)\*B5022(1,1)  
XP5022(2,1)=UP50(2)\*B5022(2,1)

XP5033(1,1)=UP50(3)\*B5033(1,1)  
XP5033(2,1)=UP50(3)\*B5033(2,1)

C-----SUMADOR

DERX5011(1,1)=AX5011(1,1)+XERROR5011(1,  
1)+XP5011(1,1)

DERX5011(2,1)=AX5011(2,1)+XERROR5011(2,  
1)+XP5011(2,1)

DERX5022(1,1)=AX5022(1,1)+XERROR5022(1,  
1)+XP5022(1,1)

DERX5022(2,1)=AX5022(2,1)+XERROR5022(2,  
1)+XP5022(2,1)

DERX5033(1,1)=AX5033(1,1)+XERROR5033(1,  
1)+XP5033(1,1)

DERX5033(2,1)=AX5033(2,1)+XERROR5033(2,  
1)+XP5033(2,1)

C-----MULTIPLICACION DE LA MATRIZ Kcd  
POR LOS ESTADOS

UP50(1)=GLQ5011(1,1)\*XBARRA5011(1,1)+G  
LQ5011(1,2)\*XBARRA5011(2,1)

UP50(2)=GLQ5022(1,1)\*XBARRA5022(1,1)+G  
LQ5022(1,2)\*XBARRA5022(2,1)

UP50(3)=GLQ5033(1,1)\*XBARRA5033(1,1)+G  
LQ5033(1,2)\*XBARRA5033(2,1)

C-----MULTIPLICACION DEL ESTADO POR  
LA SALIDA

YE50(1)=C5011(1,1)\*XBARRA5011(1,1)+C501  
1(1,2)\*XBARRA5011(2,1)

YE50(2)=C5022(1,1)\*XBARRA5022(1,1)+C502  
2(1,2)\*XBARRA5022(2,1)

YE50(3)=C5033(1,1)\*XBARRA5033(1,1)+C503  
3(1,2)\*XBARRA5033(2,1)

C-----INTEGRACION DE LA ENTRADA

```

UAUX50(1)=0.0015*((UP50(1)+UPPAS50(1))/2)
  UREAL50(1)=UREAL50(1)+UAUX50(1)

UAUX50(2)=0.0015*((UP50(2)+UPPAS50(2))/2)
  UREAL50(2)=UREAL50(2)+UAUX50(2)

UAUX50(3)=0.0015*((UP50(3)+UPPAS50(3))/2)
  UREAL50(3)=UREAL50(3)+UAUX50(3)

C DO 50 I=1,3
C U(I)=0.20+UREAL50(I)
  U50(1)=0.109+UREAL50(1)
  U50(2)=0.106+UREAL50(2)
  U50(3)=0.116+UREAL50(3)

C-----
*****
*****
C-----**          CONTROL DIFUSO
**
C-----
*****
*****

C *****INICIO DEL
CONTROLADOR
DIFUSO*****

C-----INICIO
C-----LEER EL VALOR DE Z(4)
C
C-----VER SI Z(4) ES MENOR QUE 0.050 L/s
C
  IF ( Z(4) .LT. 0.050 ) GO TO 60
C
C-----AHORA VER SI Z(4) ES MAYOR O
IGUAL QUE 0.050 L/s Y MENOR O IGUAL
QUE 0.060 L/s
C
  IF ( Z(4) .GE. 0.050 .AND. Z(4) .LE. 0.060 )
GO TO 50
C
C-----AHORA VER SI Z(4) ES MAYOR O
IGUAL QUE 0.060 L/s Y MENOR O IGUAL
QUE 0.070 L/s
C
  IF ( Z(4) .GE. 0.060 .AND. Z(4) .LE. 0.070 )
GO TO 40

C
C-----AHORA VER SI Z(4) ES MAYOR O
IGUAL QUE 0.070 L/s Y MENOR O IGUAL
QUE 0.080 L/s
C
  IF ( Z(4) .GE. 0.070 .AND. Z(4) .LE. 0.080 )
GO TO 30
C
C-----SI LLEGAMOS HASTA AQUÍ Z(4) ES
MAYOR QUE 0.080 L/s,
C-----ENTONCES HACER SU FUNCIÓN DE
MEMBRESÍA IGUAL A UNO
C
  EM80 = 1.0
  EM65 = 0.0
  EM60 = 0.0
  EM50 = 0.0

C
C-----DESPUÉS CONTINUAR CON EL
PROGRAMA EN LA PROPOSICIÓN 80
C
  GO TO 80

C
C-----EJECUTAR LA PROPOSICIÓN 60
CUANDO Z(4) ES MENOR QUE 0.050 L/s,
C-----ENTONCES HACER SU FUNCIÓN DE
MEMBRESÍA IGUAL A UNO.
C
  60 EM80 = 0.0
  EM65 = 0.0
  EM60 = 0.0
  EM50 = 1.0

C
C-----DESPUÉS CONTINUAR CON EL
PROGRAMA EN LA PROPOSICIÓN 80
C
  GO TO 80

C
C-----MEZCLAR LEYES DE CONTROL DE
0.050 L/s Y EL DE 0.060 L/s
C
  50 EM80 = 0.0
  EM65 = 0.0
  EM60 = ( Z(4) - 0.050 ) / ( 0.060 - 0.050 )
  EM50 = ( 0.060 - Z(4) ) / ( 0.060 - 0.050 )

C
C-----CONTINUAR CON EL PROGRAMA EN
LA PROPOSICIÓN 80
C
  GO TO 80

C
C-----MEZCLAR LEYES DE CONTROL DE
0.060 L/s Y EL DE 0.065 L/s
C
  40 EM80 = 0.0
  EM65 = ( Z(4) - 0.060 ) / ( 0.070 - 0.060 )

```

EM60 = ( 0.070 - Z(4) ) / ( 0.070 - 0.060 )  
EM50 = 0.0

C  
C----CONTINUAR CON EL PROGRAMA EN  
LA PROPOSICIÓN 80

C  
GO TO 80

C  
C----MEZCLAR LEYES DE CONTROL DE  
0.065 L/s Y EL DE 0.080 L/s

C  
30 EM80 = ( Z(4) - 0.070 ) / ( 0.080 - 0.070 )  
EM65 = ( 0.080 - Z(4) ) / ( 0.080 - 0.070 )  
EM60 = 0.0  
EM50 = 0.0

C  
C----APLICAR UNA ACCIÓN DE CONTROL  
ADECUADA AL FLUJO

C \*\*\*\*\* APLICANDO EL  
CONTROLADOR DIFUSO  
\*\*\*\*\*

80  
U(1)=U80(1)\*EM80+U65(1)\*EM65+U60(1)\*EM  
60+U50(1)\*EM50

U(2)=U80(2)\*EM80+U65(2)\*EM65+U60(2)\*EM  
60+U50(2)\*EM50

U(3)=U80(3)\*EM80+U65(3)\*EM65+U60(3)\*EM  
60+U50(3)\*EM50

C\*\*\*\*\* FIN DEL CONTROLADOR  
DIFUSO \*\*\*\*\*

DO 51 I=1,3  
IF(U(I).GT.0.80)THEN  
U(I)=0.80  
ENDIF  
IF(U(I).LT.0)THEN  
U(I)=0  
ENDIF  
51 CONTINUE

C----ACTUALIZACION DE DATOS  
PASADOS 80L-----

XBARRA8011(1,1)=(DERX8011(1,1)+DERANT  
8011(1,1))/2

XBARRA8011(2,1)=(DERX8011(2,1)+DERANT  
8011(2,1))/2  
DERANT8011(1,1)=DERX8011(1,1)  
DERANT8011(2,1)=DERX8011(2,1)

XBARRA8022(1,1)=(DERX8022(1,1)+DERANT  
8022(1,1))/2

XBARRA8022(2,1)=(DERX8022(2,1)+DERANT  
8022(2,1))/2  
DERANT8022(1,1)=DERX8022(1,1)  
DERANT8022(2,1)=DERX8022(2,1)

XBARRA8033(1,1)=(DERX8033(1,1)+DERANT  
8033(1,1))/2

XBARRA8033(2,1)=(DERX8033(2,1)+DERANT  
8033(2,1))/2  
DERANT8033(1,1)=DERX8033(1,1)  
DERANT8033(2,1)=DERX8033(2,1)

DO 45 I=1,3  
UPPAS80(I)=UP80(I)  
45 CONTINUE

C----ACTUALIZACION DE DATOS  
PASADOS 65L-----

XBARRA6511(1,1)=(DERX6511(1,1)+DERANT  
6511(1,1))/2

XBARRA6511(2,1)=(DERX6511(2,1)+DERANT  
6511(2,1))/2  
DERANT6511(1,1)=DERX6511(1,1)  
DERANT6511(2,1)=DERX6511(2,1)

XBARRA6522(1,1)=(DERX6522(1,1)+DERANT  
6522(1,1))/2

XBARRA6522(2,1)=(DERX6522(2,1)+DERANT  
6522(2,1))/2  
DERANT6522(1,1)=DERX6522(1,1)

```

DERANT6522(2,1)=DERX6522(2,1)

XBARRA6533(1,1)=(DERX6533(1,1)+DERANT
6533(1,1))/2

XBARRA6533(2,1)=(DERX6533(2,1)+DERANT
6533(2,1))/2
  DERANT6533(1,1)=DERX6533(1,1)
  DERANT6533(1,1)=DERX6533(1,1)

  DO 46 I=1,3
    UPPAS65(I)=UP65(I)
  46 CONTINUE

C-----ACTUALIZACION DE DATOS
PASADOS 65L hacia abajo-----

XBARRA6011(1,1)=(DERX6011(1,1)+DERANT
6011(1,1))/2

XBARRA6011(2,1)=(DERX6011(2,1)+DERANT
6011(2,1))/2
  DERANT6011(1,1)=DERX6011(1,1)
  DERANT6011(2,1)=DERX6011(2,1)

XBARRA6022(1,1)=(DERX6022(1,1)+DERANT
6022(1,1))/2

XBARRA6022(2,1)=(DERX6022(2,1)+DERANT
6022(2,1))/2
  DERANT6022(1,1)=DERX6022(1,1)
  DERANT6022(2,1)=DERX6022(2,1)

XBARRA6033(1,1)=(DERX6033(1,1)+DERANT
6033(1,1))/2

XBARRA6033(2,1)=(DERX6033(2,1)+DERANT
6033(2,1))/2
  DERANT6033(1,1)=DERX6033(1,1)
  DERANT6033(1,1)=DERX6033(1,1)

  DO 47 I=1,3
    UPPAS60(I)=UP60(I)
  47 CONTINUE

C-----ACTUALIZACION DE DATOS
PASADOS 50L-----

XBARRA5011(1,1)=(DERX5011(1,1)+DERANT
5011(1,1))/2

XBARRA5011(2,1)=(DERX5011(2,1)+DERANT
5011(2,1))/2
  DERANT5011(1,1)=DERX5011(1,1)
  DERANT5011(2,1)=DERX5011(2,1)

XBARRA5022(1,1)=(DERX5022(1,1)+DERANT
5022(1,1))/2

XBARRA5022(2,1)=(DERX5022(2,1)+DERANT
5022(2,1))/2
  DERANT5022(1,1)=DERX5022(1,1)
  DERANT5022(2,1)=DERX5022(2,1)

XBARRA5033(1,1)=(DERX5033(1,1)+DERANT
5033(1,1))/2

XBARRA5033(2,1)=(DERX5033(2,1)+DERANT
5033(2,1))/2
  DERANT5033(1,1)=DERX5033(1,1)
  DERANT5033(1,1)=DERX5033(1,1)

  DO 48 I=1,3
    UPPAS50(I)=UP50(I)
  48 CONTINUE

C*****PROTECCIO
NES DEL PROGRAMA DE ERRORES DE
COMPILACIÓN*****

  write(IREGS,100)
T,U(1),U(2),U(3),Y(1),Y(2),Y(3)
100 FORMAT (2X,8F15.9)

  END

SUBROUTINE SUSER2
END

SUBROUTINE LUSER2(CHAIN,PARA)
CHARACTER CHAIN*(*)
DIMENSION PARA(*)

```

C-----The following lines are just to prevent warning F4202 of the

```
C-----Fortran compiler
  CHAINE=CHAINE
  PARA(1)=PARA(1)
  END
```

```
  SUBROUTINE CUSER2(U,Y,YT,Z,PARA)
  DIMENSION U(*),Y(*),YT(*),Z(*),PARA(*)
```

C-----The following lines are just to prevent warning F4202 of the

```
C-----Fortran compiler
  U(1)=U(1)
  Y(1)=Y(1)
  YT(1)=YT(1)
  Z(1)=Z(1)
  PARA(1)=PARA(1)
  END
```

```
  SUBROUTINE SUSER3
  END
```

```
  SUBROUTINE LUSER3(CHAIN,PARA)
  CHARACTER CHAIN*(*)
  DIMENSION PARA(*)
```

C-----The following lines are just to prevent warning F4202 of the

```
C-----Fortran compiler
  CHAINE=CHAINE
  PARA(1)=PARA(1)
  END
```

```
  SUBROUTINE CUSER3(U,Y,YT,Z,PARA)
  DIMENSION U(*),Y(*),YT(*),Z(*),PARA(*)
```

C-----The following lines are just to prevent warning F4202 of the

```
C-----Fortran compiler
  U(1)=U(1)
  Y(1)=Y(1)
  YT(1)=YT(1)
  Z(1)=Z(1)
  PARA(1)=PARA(1)
  END
```

```
  SUBROUTINE SUSER4
  END
```

```
  SUBROUTINE LUSER4(CHAIN,PARA)
  CHARACTER CHAIN*(*)
  DIMENSION PARA(*)
```

C-----The following lines are just to prevent warning F4202 of the

```
C-----Fortran compiler
  CHAINE=CHAINE
  PARA(1)=PARA(1)
  END
```

```
  SUBROUTINE CUSER4(U,Y,YT,Z,PARA)
  DIMENSION U(*),Y(*),YT(*),Z(*),PARA(*)
```

C-----The following lines are just to prevent warning F4202 of the

```
C-----Fortran compiler
  U(1)=U(1)
  Y(1)=Y(1)
  YT(1)=YT(1)
  Z(1)=Z(1)
  PARA(1)=PARA(1)
  END
```

```
  SUBROUTINE SUSER5
  END
```

```
  SUBROUTINE LUSER5(CHAIN,PARA)
  CHARACTER CHAIN*(*)
  DIMENSION PARA(*)
```

C-----The following lines are just to prevent warning F4202 of the

```
C-----Fortran compiler
  CHAINE=CHAINE
  PARA(1)=PARA(1)
  END
```

```
  SUBROUTINE CUSER5(U,Y,YT,Z,PARA)
  DIMENSION U(*),Y(*),YT(*),Z(*),PARA(*)
```

C-----The following lines are just to prevent warning F4202 of the

```
C-----Fortran compiler
  U(1)=U(1)
  Y(1)=Y(1)
  YT(1)=YT(1)
  Z(1)=Z(1)
  PARA(1)=PARA(1)
  END
```

```
  SUBROUTINE SUSER6
  END
```

```
  SUBROUTINE LUSER6(CHAIN,PARA)
  CHARACTER CHAIN*(*)
  DIMENSION PARA(*)
```

C-----The following lines are just to prevent warning F4202 of the

```
C-----Fortran compiler
  CHAINE=CHAINE
  PARA(1)=PARA(1)
  END
```

```
  SUBROUTINE CUSER6(U,Y,YT,Z,PARA)
  DIMENSION U(*),Y(*),YT(*),Z(*),PARA(*)
```

C-----The following lines are just to prevent warning F4202 of the

```
C-----Fortran compiler
```

```

U(1)=U(1)
Y(1)=Y(1)
YT(1)=YT(1)
Z(1)=Z(1)
PARA(1)=PARA(1)
END

SUBROUTINE SUSER7
END

SUBROUTINE LUSER7(CHAIN,PARA)
CHARACTER CHAIN*(*)
DIMENSION PARA(*)
C-----The following lines are just to prevent
warning F4202 of the
C-----Fortran compiler
CHAIN=CHAIN
PARA(1)=PARA(1)
END

SUBROUTINE CUSER7(U,Y,YT,Z,PARA)
DIMENSION U(*),Y(*),YT(*),Z(*),PARA(*)
C-----The following lines are just to prevent
warning F4202 of the
C-----Fortran compiler
U(1)=U(1)
Y(1)=Y(1)
YT(1)=YT(1)
Z(1)=Z(1)
PARA(1)=PARA(1)
END

SUBROUTINE SUSER8
END

SUBROUTINE LUSER8(CHAIN,PARA)
CHARACTER CHAIN*(*)
DIMENSION PARA(*)
C-----The following lines are just to prevent
warning F4202 of the
C-----Fortran compiler
CHAIN=CHAIN
PARA(1)=PARA(1)
END

SUBROUTINE CUSER8(U,Y,YT,Z,PARA)
DIMENSION U(*),Y(*),YT(*),Z(*),PARA(*)
C-----The following lines are just to prevent
warning F4202 of the
C-----Fortran compiler
U(1)=U(1)
Y(1)=Y(1)
YT(1)=YT(1)
Z(1)=Z(1)
PARA(1)=PARA(1)
END

SUBROUTINE SUSER9
END

SUBROUTINE LUSER9(CHAIN,PARA)
CHARACTER CHAIN*(*)
DIMENSION PARA(*)
C-----The following lines are just to prevent
warning F4202 of the
C-----Fortran compiler
CHAIN=CHAIN
PARA(1)=PARA(1)
END

SUBROUTINE CUSER9(U,Y,YT,Z,PARA)
DIMENSION U(*),Y(*),YT(*),Z(*),PARA(*)
C-----The following lines are just to prevent
warning F4202 of the
C-----Fortran compiler
U(1)=U(1)
Y(1)=Y(1)
YT(1)=YT(1)
Z(1)=Z(1)
PARA(1)=PARA(1)
END

SUBROUTINE SGPC
END

SUBROUTINE LGPC(U,PARA)
C-----Lecture des parametres specifiques pour
cette methode
CHARACTER U*(*)
COMMON/F1/ERROR
DIMENSION PARA(*)
C-----Debut de la routine
READ(U,'(3(F8.2,1X),F8.2)',ERR=10)
(PARA(I),I=1,4)
RETURN
10 CONTINUE
ERROR=2
END

SUBROUTINE CGPC(U,Y,YT,Z,PARA)
C-----Calcul pour cette methode
DIMENSION Y(*),YT(*),Z(*),U(*),PARA(*)
C-----The following lines are just to prevent
warning F4202 of the
C-----Fortran compiler
U(1)=U(1)
Y(1)=Y(1)
YT(1)=YT(1)
Z(1)=Z(1)
PARA(1)=PARA(1)
END

```

```

SUBROUTINE SUBOPT
C-----Supervision pour optimisation
LOGICAL  BOOL,BOOL2
CHARACTER INTERF*1

COMMON/INTERC/ INTERF

      IF      (INTERF.EQ.'1'.OR.INTERF.EQ.'5')
REWIND(83)

      CALL LECT(BOOL,BOOL2)
      IF(BOOL) THEN
        CALL TRANSI(BOOL,BOOL2)
      ENDIF
      CALL FERM
END
    
```

## 2. Cálculos en MATLAB

```

clc
clear all
num1=[0 1.206];
den1=[72 1 0];
G1=tf(num1,den1);
sys1=ss(G1,'min');
%o si se desea el siguiente arreglo
[A1,B1,C1,D1]=ssdata(sys1);

num2=[0 0.93103];
den2=[216 1 0];
G2=tf(num2,den2);
sys2=ss(G2,'min');
%o si se desea el siguiente arreglo
[A2,B2,C2,D2]=ssdata(sys2);

num3=[0 7.41935];
den3=[462 1 0];
G3=tf(num3,den3);
sys3=ss(G3,'min');
%o si se desea el siguiente arreglo
[A3,B3,C3,D3]=ssdata(sys3);

NN=[0;0];
N=[0;0];

Q1=(C1)*C1;
Q2=(C2)*C2;
Q3=(C3)*C3;

[K1,S1,E1]=LQR(A1,B1,Q1,R1);
[KEST1,L1,P1] = KALMAN(sys1,QN1,RN1);
K1;
L1;

[K2,S2,E2]=LQR(A2,B2,Q2,R2);
[KEST2,L2,P2] = KALMAN(sys2,QN2,RN2);
K2;
L2;

[K3,S3,E3]=LQR(A3,B3,Q3,R3);
[KEST3,L3,P3] = KALMAN(sys3,QN3,RN3);
K3;
L3;

fprintf('C-----GANANCIAS LQ Kc\r\r');
fprintf('  GLQd1(1,1)=%d\r',K1(1,1));
fprintf('  GLQd1(1,2)=%d\r',K1(1,2));
fprintf('  GLQd2(1,1)=%d\r',K2(1,1));
fprintf('  GLQd2(1,2)=%d\r',K2(1,2));
fprintf('  GLQd3(1,1)=%d\r',K3(1,1));
fprintf('  GLQd3(1,2)=%d\r',K3(1,2));
fprintf('C-----GANANCIAS KALMAN Ld\r\r');
fprintf('  GKALMd1(1,1)=%d\r',L1(1,1));
fprintf('  GKALMd1(2,1)=%d\r',L1(2,1));
fprintf('  GKALMd2(1,1)=%d\r',L2(1,1));
fprintf('  GKALMd2(2,1)=%d\r',L2(2,1));
fprintf('  GKALMd3(1,1)=%d\r',L3(1,1));
fprintf('  GKALMd3(2,1)=%d\r',L3(2,1));
    
```



# CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL I.P.N. UNIDAD GUADALAJARA

El Jurado designado por la Unidad Guadalajara del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional aprobó la tesis

Diseño de un controlador descentralizado usando lógica difusa  
para un prototipo de canal de riego

del (la) C.

Evaristo MARTÍNEZ MALDONADO

el día 20 de Abril de 2007.

Dr. Arturo del Sagrado Corazón  
Sánchez Carmona  
Investigador CINVESTAV 3B  
CINVESTAV Unidad Guadalajara

Dr. José Javier Ruíz León  
Investigador CINVESTAV 3B  
CINVESTAV Unidad Guadalajara

Dra. Ofelia Begovich Mendoza  
Investigador CINVESTAV 3A  
CINVESTAV Unidad Guadalajara



CINVESTAV  
BIBLIOTECA CENTRAL



SSIT000006725