

**CONTROL EN MODO DESLIZANTE CON ESTIMACIÓN DE LA
PERTURBACIÓN APLICADO A UN MODELO DE TURBINA HIDRÁULICA**

**ADRIANA JOSÉ BERNAL GONZÁLEZ
DONOVAN ALBERTO PINEDA SANTOS
MARLON FERNANDO VELÁSQUEZ LOBO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA 2011**

**CONTROL EN MODO DESLIZANTE CON ESTIMACIÓN DE LA
PERTURBACIÓN APLICADO A UN MODELO DE TURBINA HIDRÁULICA**

**ADRIANA JOSÉ BERNAL GONZÁLEZ
DONOVAN ALBERTO PINEDA SANTOS
MARLON FERNANDO VELÁSQUEZ LOBO**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
ingeniero(a) electrónico(a)**

**Director
DANIEL ALFONSO SIERRA BUENO, PhD**

**Codirector
RODOLFO VILLAMIZAR MEJÍA, PhD**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA 2011**

Dedicatoria

A Dios por todas las bendiciones, alegrías y triunfos recibidos.

*A mi madre Yomaira, por su apoyo, cuidado y cariño, soy lo que
soy.*

*A mi padre José Antonio, quien con su excelente ejemplo motiva
mi constante deseo de aprendizaje.*

*A mis hermanos, quienes a pesar de la distancia me han brindado
su apoyo incondicional.*

Dedicatoria

A Dios, quien me brinda la inspiración cuando más lo necesito

A mis padres, quienes me enseñaron a no desistir

*A mis hermanos, quienes me han acompañado fielmente durante
mi vida*

A mi tía y mi primo, quienes son muy importantes para mí

Dedicatoria

A Dios por brindarme sabiduría y entendimiento.

A mi abuela mamá Estella por su ternura y amor.

A mis padres por su apoyo y confianza.

A mis hermanas a quienes quiero y espero brindarles lo mejor.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por ser nuestro guía en la realización de todos nuestros triunfos obtenidos en el transcurso de todo este camino.

A Daniel Alfonso Sierra, Director del proyecto, que con sus valiosas sugerencias, apoyo, consejos, enseñanzas y mucha paciencia fue parte esencial para la realización de esta tesis.

A Rodolfo Villamizar, Codirector del proyecto de grado, por haber ofrecido una excelente orientación, colaboración oportuna durante el desarrollo de este trabajo.

A la Universidad Industrial de Santander, especialmente a la escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones por la formación profesional brindada.

A todos nuestros amigos y compañeros de la universidad. Gracias por los momentos compartidos, momentos agradables, gracias por su amistad.

CONTENIDO

Pág

INTRODUCCIÓN.....	20
1. MODELADO DEL GENERADOR HIDRÁULICO.....	22
1.1 CONCEPTOS PRELIMINARES.....	22
1.1.1 Definiciones	24
1.1.2 Ecuaciones de la dinámica del sistema.....	26
1.2 MODELADO DE LA TURBINA.....	26
1.2.1 Modelo no lineal.....	27
1.2.2 Modelo lineal.....	28
1.3 MODELO DEL GENERADOR.....	29
1.4 MODELO DE LA COMPUERTA.....	30
1.5 DESCRIPCIÓN COMPLETA DEL SISTEMA	31
1.6 ANÁLISIS DE LOS MODELOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO	31
2. TEORÍA DE CONTROL.....	33
2.1 ESTRUCTURAS VARIABLES.....	33
2.2 FUNDAMENTOS DE CONTROL EN MODO DESLIZANTE.....	34
2.3 FUNDAMENTOS DE CONTROL EN MODO DESLIZANTE CON ESTIMACIÓN DE LA PERTURBACIÓN.....	40
3. DISEÑO DEL CONTROLADOR	43
3.1 ALGORITMO DE CONTROL	43
3.2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO.....	44
3.3 DISEÑO DEL CONTROLADOR.....	45
4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO	53
4.1 DEFINICIÓN DE LOS ÍNDICES Y CRITERIOS DE DESEMPEÑO	53
4.1.1 Integral del error absoluto (IAE):.....	53
4.1.2 Integral del error cuadrático (ISE o IEC):	53
4.1.3 Integral del valor absoluto del error ponderado (ITAE):.....	54
4.1.4 Integral del cuadrado del error ponderado en el tiempo (ITSE):.....	54
4.1.5 Tiempo de asentamiento:	54

4.2	ANÁLISIS DE LOS ÍNDICES DE DESEMPEÑO PARA H_∞ Y SMCPE	54
5.	EMULACIÓN HARDWARE-SOFTWARE	62
5.1	IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DE CONTROL.....	62
5.2	COMUNICACIÓN ENTRE EL MICROCONTROLADOR Y LABVIEW	64
6.	CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES	70
	BIBLIOGRAFÍA.....	72
	ANEXOS	75

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Esquema general de la planta hidroeléctrica.	25
Figura 2. Diagrama de Bloques de la turbina hidráulica empleado en los modelos de Kundur.....	27
Figura 3. Diagrama de bloque generador con carga aislada.....	30
Figura 4. Diagrama de bloques para el modelo de la compuerta	30
Figura 5. Diagrama de bloques general de una central hidroeléctrica.....	31
Figura 6. Velocidad del rotor luego de variar de 0 a 1 [pu] la señal de control de la compuerta.....	32
Figura 7. Región deslizante en el plano fase con <i>chattering</i> para un sistema de segundo orden.	37
Figura 8. Modelo generalizado del sistema de control	44
Figura 9. Diagrama de bloques utilizado para la implementación de control no lineal	47
Figura 10. Comportamiento de U, S y W_r para el controlador no lineal.....	47
Figura 11. Diagrama de bloques para la implementación de controlador lineal para el modelo lineal	49
Figura 12. Comportamiento de U, S y W_r para el controlador lineal con modelo de planta lineal.....	50
Figura 13. Diagrama de bloques para la implementación de controlador lineal para el modelo no lineal	51
Figura 14. Comportamiento de U, S y W_r para el controlador lineal usado en el modelo de planta no lineal	52
Figura 15. Gráfica del error de SMCPPE después de la perturbación.....	56
Figura 16. Gráfica del error para H_∞	57
Figura 17. Zoom de la gráfica del error para H_∞	57
Figura 18. Interfaz de LabView para recibir la señales de error, velocidad del rotor y potencia mecánica transmitida por el microcontrolador.....	63
Figura 19. Esquema general de la comunicación entre LabView y el microcontrolador ...	64
Figura 20. Potencia mecánica y velocidad del rotor para diversas demandas de potencia obtenidas en la emulación	65
Figura 21. Acción de control para diversas demandas de potencia en emulación.....	66
Figura 22: Potencia mecánica y velocidad del rotor para diversas demandas de potencia obtenidas en simulación	68
Figura 23: Potencia mecánica y velocidad del rotor para una demanda de potencia de 0 a 1 [p.u]	69

LISTA DE TABLAS

Pág

Tabla 1. Lista de parámetros	22
Tabla 2. Lista de variables	24
Tabla 3: Resumen de los parámetros para hidroeléctrica St. Lawrence.....	32
Tabla 4. Índices de Desempeño para SMCPE	58
Tabla 5. Índices de Desempeño para H^∞	58
Tabla 6. Índice del error absoluto.....	59
Tabla 7. Integral del error cuadrático	59
Tabla 8. Integral del valor absoluto del error ponderado	60
Tabla 9. Integral del cuadrado del error ponderado en el tiempo.	60

LISTA DE ANEXOS

Pág

Anexo A. INTERFAZ GRAFICA EN LABVIEW.....	75
Anexo B. PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR MCF51QE128.....	81
Anexo C. CÓDIGO PARA DISEÑAR EL CONTROLADOR POR H^∞	86

RESUMEN

Título: CONTROL EN MODO DESLIZANTE CON ESTIMACIÓN DE LA PERTURBACIÓN APLICADO A UN MODELO DE TURBINA HIDRÁULICA

Autores: ADRIANA JOSÉ BERNAL GONZÁLEZ, DONOVAN ALBERTO PINEDA SANTOS, MARLON FERNANDO VELÁSQUEZ LOBO**

Palabras Claves:

Control en modo deslizante, sistemas no lineales, centrales hidroeléctricas

Descripción:

El presente trabajo parte de la problemática existente en la regulación de velocidad para las centrales hidroeléctricas. Se hace en primera instancia una definición de los conceptos fundamentales, parámetros y ecuaciones físicas que rigen el comportamiento de la compuerta, la turbina y el generador; de igual forma, se consideran los fundamentos para entender el funcionamiento del control en modo deslizante con estimación de la perturbación.

Se hace mención al control en estructuras variables por su importancia en la comprensión del trabajo. El algoritmo de control en modos deslizantes convencional es explicado brevemente. Finalmente, el concepto de estimación de la perturbación es incluido para dar solución a algunos de los problemas presentes en el control de modos deslizantes convencional.

El diseño del controlador en modo deslizante con estimación de la perturbación se explica mediante el uso de modelos no lineales. Se describe el algoritmo de control junto a las consideraciones de diseño tomadas para el modelo no lineal de la central hidroeléctrica; además se adjuntan pruebas realizadas en simulación para el controlador diseñado. Mediante simulación se miden diversos índices de desempeño del controlador.

El proceso de adecuación e implementación del controlador SMCPE en una plataforma hardware es descrito desde el punto de vista de programación. Se adjuntan las pruebas para diversos perfiles de carga realizadas para verificar el funcionamiento del controlador.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingeniería Físico mecánicas. Escuela de Ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. Director: Daniel Alfonso Sierra Bueno, PhD. Codirector: Rodolfo Villamizar Mejía, PhD

SUMMARY

Title : SLIDING MODE CONTROL WITH PERTURBATION ESTIMATION
APPLIED TO A HYDRAULIC TURBINE MODELLING

Authors : ADRIANA JOSÉ BERNAL GONZÁLEZ, DONOVAN ALBERTO PINEDA
SANTOS, MARLON FERNANDO VELÁSQUEZ LOBO

Key Words:

Sliding mode control, perturbation estimation, nonlinear systems, hydroelectric plants

Description:

The present work starts treating frequency load regulation problems at hydroelectric plants. First the fundamental definitions, meanings and physic laws for the gate, turbine and generator are defined. Sliding mode control basics are treated as well.

Variable structure control is explained from sliding mode control perspective. Conventional SMC is also mentioned. Finally, estimation perturbation is used to remove some of the conventional SMC problems. SMCPE control law mechanics is found and each variable is explained.

Nonlinear SMCPE controller is designed and discussed. Control algorithm is written and some standard considerations are made. Simulink's hydroelectric model is shown and three of its main parts are considered. Also, some simulation tests are made for the nonlinear controller. Performance indices are measured for SMCPE and infinite H controllers.

Hardware-software controller is reviewed from programming point of view. Sources and main codes are described and serial communication is selected. Verification through load perturbation is finally made.

* Degree work

** Physico-mechanical engineerings Faculty. Electric, electronics and telecommunications engineering's school. Director: Daniel Alfonso Sierra Bueno, PhD. Codirector: Rodolfo Villamizar Mejía, PhD

INTRODUCCIÓN

Las centrales hidroeléctricas suplen en gran parte la demanda de energía alrededor del mundo y presentan una forma viable de aprovechar los recursos naturales, sin los efectos ambientales que otras alternativas energéticas generan. Por esto, es importante proveer alternativas de control modernas que contribuyan a su eficiencia.

Una práctica común para controlar potencia y frecuencia de dichas centrales hidroeléctricas consiste en limitar la entrada de agua al sistema por medio de la compuerta¹. Esta alternativa requiere obtener información acerca de la velocidad, frecuencia o potencia del rotor para determinar la apertura necesaria de la compuerta. El principal problema de control surge de la complejidad de la dinámica no lineal, correspondiente al movimiento de agua en la tubería.

Considerando lo anterior, se selecciona el control en modo deslizante con estimación de la perturbación como método de diseño, pues permite considerar dinámicas no lineales y mantener un control sobre la velocidad del rotor y su razón de cambio². La verificación de la respuesta dinámica del controlador se realiza mediante la comparación de los criterios de diseño al simular el sistema en lazo abierto y el sistema controlado. Además, una plataforma hardware-software es creada para verificar el desempeño en tiempo real del controlador.

El trabajo presenta una descripción de los modelos más utilizados para representar las centrales hidroeléctricas convencionales, introduciendo luego los fundamentos de control en modo deslizante con estimación de la perturbación. Las consideraciones de diseño del controlador son reportadas por la importancia de su análisis para el caso de los modelos no lineales. La comparación entre el controlador en modo deslizante diseñado y un controlador H infinito obtenido

¹ Conocida comúnmente como control de carga-frecuencia o control de generación automático

² El control en modo deslizante realiza una acción de control sobre la salida y sus derivadas

mediante la descripción de la tesis de Jose Jorge Carreño³ se realiza mediante la obtención y análisis de índices de desempeño para diversas potencias demandadas.

Finalmente se realiza una descripción general de las herramientas utilizadas en la plataforma hardware-software y se anexan las pruebas realizadas para verificar su correcto funcionamiento.

³ Carreño Zagarra Jose Jorge. Herramienta software para el diseño automático de controladores H infinito para micro y pequeñas centrales hidroeléctricas

1. MODELADO DEL GENERADOR HIDRÁULICO

En este capítulo se presenta el modelo de la central hidroeléctrica en sus tres partes principales: la compuerta, la turbina y el generador. Primero se realiza una breve descripción de los principales términos y de las ecuaciones dinámicas que rigen el comportamiento de un hidrogenerador para definir luego el modelo no lineal de la turbina. Inmediatamente se presentan los modelos del generador y de la compuerta (compuerta, turbina y generador), y se realiza un análisis en función del tiempo para observar la respuesta de la planta completa ante una entrada escalón. Se compara la respuesta del modelo no lineal escogido y algunas de sus aproximaciones. Por último, se describe el sistema completo de control para presentar la forma en la que se regulan la potencia y la frecuencia.

1.1 CONCEPTOS PRELIMINARES

En gran parte de la literatura, los autores suelen definir parámetros y variables que rigen el comportamiento del sistema. Para esto, es necesario primero especificar todos los parámetros que deben tenerse en cuenta a la hora de precisar un modelo para una planta hidroeléctrica. A continuación se presentan tablas de parámetros generales y variables los cuales son utilizados en todos los modelos que se proponen en [1]. Todos los valores en por unidad utilizados son referenciados a valores nominales.

Tabla 1. Lista de parámetros

Parámetro	Significado	Unidades
$A_{(p,c,s)}$	Sección transversal del área del conducto	m^2
L	Longitud del conducto	m
A	Velocidad de la onda	m/s
G	Aceleración debida a la gravedad	m^2/s
α	$\alpha = \rho^*(1/K + \phi/f^*E)$	

Continuación Tabla 1. Lista de parámetros

Parámetro	Significado	Unidades
P	Densidad del agua	kg/m³
K	Módulo del volumen de la compresión del agua	kg/(m*s²)
Φ	Diámetro interno del conducto	m
F	Espesor de la tubería	m
E	Módulo de Young para el material de la tubería	
Tw	Tiempo de inicio del agua a cualquier carga	s
Twp, Twc	Tiempo de inicio del agua a carga nominal o carga base. (WP: tubería forzada, WC: túnel)	s
Cs	Constante de almacenamiento de la almenara	s
Te	Tiempo elástico	s
Tg	Constante de tiempo del servomotor principal	s
T	Periodo natural de la almenara	s
F	Coefficiente de pérdidas de la cabeza	p.u
Φ_p	Coefficiente de fricción	p.u
K_f	Constante de pérdida de la cabeza debido a fricción	p.u
A_t	Ganancia de la turbina	p.u
Z_(p,c,n)	Impedancia hidráulica del conducto (p: tubería, c:túnel, n:normalizada)	
D	Amortiguación de la turbina	p.u/p.u

Fuente: Quiroga, Oscar Daniel. *Modelling and nonlinear control of voltage frequency of hydroelectric power plants.*

Tabla 2. Lista de variables

Variables	Significado
$\bar{H}_{(t,r,l,l2,0,w)}$	Cabeza en [p.u] (t: turbina, r: almenara, l: perdida en la tubería forzada, l2: perdida en el túnel, 0: inicial del embalse, w: embalse)
$\bar{U}_{(t,p,c,s,0,NL)}$	Velocidad de agua en el conducto o flujo en [p.u]. (t: turbina, p:tubería forzada, c: túnel, s: almenara, 0: valor inicial, NL: sin carga)
$\bar{H}_{(tss,css)}$	Cabeza en estado estacionario [p.u]. (tss: turbina, css: tunel).
$\bar{U}_{(tss,css)}$	Velocidad de agua en el conducto o flujo en estado estacionario en [p.u]. (tss: turbina, css: tunel).
$U U_{base}$	Velocidad de agua en el conducto (normalizada)
Q	Flujo en el conducto en [m ³]
$H H_{base}$	Cabeza (normalizada)
$\bar{G} \Delta\bar{G}$	Apertura de la compuerta en [p.u]. / Desviación de la apertura de la compuerta en [p.u]
$\bar{P}_{mecánica} \Delta\bar{P}_m$	Potencia mecánica de la turbina [p.u]/ Desviación de la potencia mecánica en [p.u]
$\Delta\bar{\omega}$	Desviación de la velocidad del rotor en [p.u]

Fuente: Quiroga, Oscar Daniel. *Modelling and nonlinear control of voltage frequency of hydroelectric power plants.*

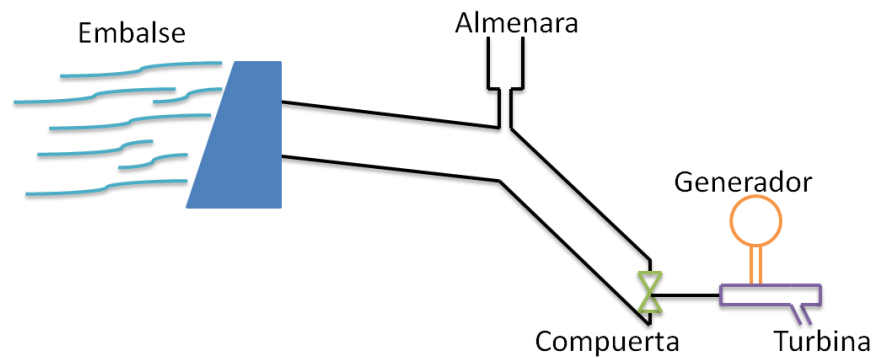
1.1.1 Definiciones

La figura 1 muestra el esquema general de una central hidroeléctrica con sus principales elementos: el reservorio o embalse, el túnel de baja presión, la almenara, la tubería forzada de alta presión, la compuerta, la turbina y el generador. A medida que la unidad turbina-generador se inicia, el agua se libera. La conversión de energía electromecánica se lleva a cabo entre el rodete de la turbina y el generador, que se monta en un eje común. El flujo de agua a la turbina

está regulado por la operación de la compuerta, la cual es una función de la carga eléctrica variable conectada al generador [1].

El parámetro más importante a la hora de definir el modelo de una planta es la existencia de almenara, la cual es un tanque de almacenamiento presente en los embalses de las hidroeléctricas que regula el flujo de agua al absorber rápidos aumentos de presión que pueden causar daños en el sistema, además provee agua cuando la presión en la tubería decrece.

Figura 1. Esquema general de la planta hidroeléctrica.



Fuente: Autores.

Para definir de forma correcta las ecuaciones de la dinámica del sistema, se tienen en cuenta tres parámetros fundamentales para la conducción de agua por la tubería: el tiempo elástico, la impedancia hidráulica del conducto y la constante de inicio o de arranque del agua. Cada uno de estos parámetros debe considerarse para las diferentes partes del sistema (conducto “c”, túnel “p” y compuerta). El tiempo elástico se define como el tiempo que tarda la onda de agua en recorrer un conducto determinado:

$$T_{e(p,c)} = \frac{L_{(p,c)}}{a} = L_{(p,c)} / \sqrt{g/\alpha} \quad (1.1)$$

La impedancia hidráulica expresa la relación entre la columna de agua que atraviesa la tubería y su sección transversal.

$$z_{(p,c)} = 1/(A_{(p,c)} * \sqrt{g \cdot \alpha}) \quad (1.2)$$

La constante de tiempo inicial es definida como el tiempo que se requiere para acelerar el flujo desde cero hasta el flujo nominal (Q_b) bajo la cabeza base (H_b).

$$T_w = T_{e(p,c)} Z_{(p,c)} \quad (1.3)$$

1.1.2 Ecuaciones de la dinámica del sistema

Las ecuaciones generales de la dinámica de una central hidroeléctrica definidas por Kundur [2], están dadas por:

La velocidad del agua en la tubería forzada:

$$\bar{U} = \bar{G} \sqrt{\bar{H}} \quad (1.4)$$

La ecuación de la potencia mecánica:

$$\bar{P}_m = \bar{U} \bar{H} \quad (1.5)$$

$$\bar{P}_m = (\bar{U} - \bar{U}_{NL}) \bar{H} \quad (1.6)$$

En la ecuación (1.6), el término \bar{U}_{NL} considera el flujo mínimo necesario para que la turbina venza la inercia de la potencia.

1.2 MODELADO DE LA TURBINA

El desempeño de las turbinas hidráulicas es altamente afectado por características de la columna de agua como lo son los efectos de la inercia y la compresión del agua y la elasticidad de las paredes de la tubería de presión.

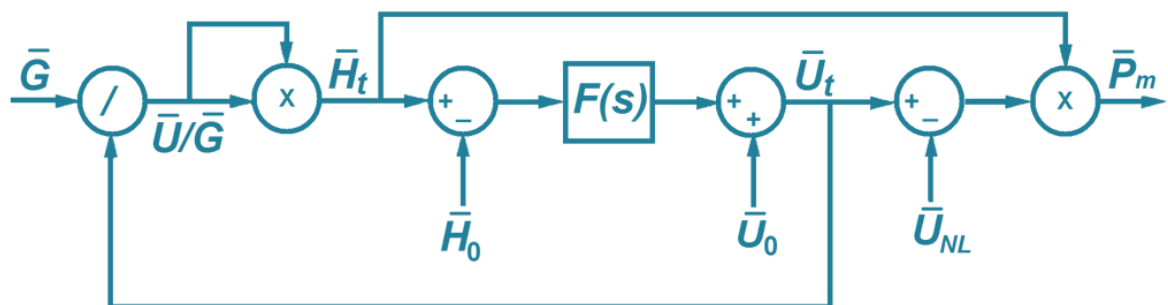
El efecto de la elasticidad provoca ondas viajeras de presión y flujo en la tubería. Este fenómeno es conocido como golpe de ariete. La inercia del agua provoca retardo en los cambios del flujo de agua ante variaciones en la posición de la compuerta. De hecho, la potencia tiene una respuesta transitoria en sentido contrario a la apertura o cierre de la compuerta.

De acuerdo con lo anterior se clasifican los modelos en dos grupos básicos: los no lineales y los lineales.

1.2.1 Modelo no lineal

Los modelos no lineales de turbinas son utilizados frecuentemente en sistemas que presentan cambios fuertes en la velocidad y la potencia de la turbina. Éstos se clasificaron generalmente por la presencia de almenara y luego por la consideración de la elasticidad de la columna de agua. Para el presente trabajo se busca modelar el sistema sin efectos de almenara considerando la columna de agua como elástica, por lo cual se eligió el modelo desarrollado por Kundur [2].

Figura 2. Diagrama de Bloques de la turbina hidráulica empleado en los modelos de Kundur



Fuente: KUNDUR, Prabha. Power System Stability and Control.

El diagrama de bloques utilizado para modelar la dinámica no lineal de la turbina se muestra en la figura 2, donde la función de transferencia “F(s)”, según Kundur [2] está definida por:

$$F(s) = \frac{\bar{U}_t - \bar{U}_o}{\bar{H}_t - \bar{H}_o} = - \frac{1}{\phi_p + Z_p \tanh(T_{ep} s)} \quad (1.7)$$

Para efectos de simulación o facilitar los cálculos en el diseño de controladores se puede aproximar la tangente hiperbólica como se muestra a continuación:

$$\tanh(T_{ep} s) = \frac{1 - e^{-T_{ep} s}}{1 + e^{-T_{ep} s}} = \frac{s T_{ep} \prod_{n=1}^{n=\infty} \left(1 + \left(\frac{s T_{ep}}{n\pi} \right)^2 \right)}{\prod_{n=1}^{n=\infty} \left(1 + \left(\frac{2s T_{ep}}{(2n-1)\pi} \right)^2 \right)} \quad (1.8)$$

Por lo general la tangente hiperbólica es aproximada con n=1 y n=2, puesto que se conservan los principales armónicos que modelan el efecto de la elasticidad del agua. Quiroga [3] llama al modelo de Kundur como “K3” y cuando se utiliza la aproximación de orden 2 como “K32” y con la aproximación de orden 1, como “K31”.

1.2.2 Modelo lineal

Para simplificar el modelo presentado anteriormente es necesario linealizar (1.4) y (1.5). El modelo lineal es usado en caso de estudios de estabilidad de pequeña señal y estudios de respuesta en frecuencia. En el caso de hidroeléctricas sin efectos de almenara considerando la columna de agua como elástica, Quiroga [3] propone la siguiente representación lineal:

$$\frac{\Delta \bar{P}_m}{\Delta \bar{G}_m} = \frac{1 - \phi_p - Z_p \tanh(T_{ep} s)}{1 + 0.5 \cdot \phi_p + 0.5 \cdot Z_p \tanh(T_{ep} s)} \quad (1.9)$$

1.3 MODELO DEL GENERADOR

La regulación de la velocidad del rotor es de fundamental importancia para la calidad del suministro de energía eléctrica. El generador convierte potencia mecánica en potencia eléctrica. El comportamiento de la turbina es el que determina en cada instante el torque aplicado al rotor del generador lo que justifica que en el estudio y diseño de controladores sólo se considere la dinámica del rotor.

La función de transferencia del rotor se muestra a continuación:

$$F(s) = \frac{1}{T_m \cdot s + D_p} \quad (1.10)$$

Donde D_p es la constante de amortiguamiento de la red eléctrica y representa el porcentaje de cambio en la potencia causado por la desviación de frecuencia; sus valores típicos están entre 0,5 y 2,5. En (1.10), T_m es la magnitud de la constante de tiempo mecánica del generador, la cual es equivalente a dos veces la constante de inercia H . Éste parámetro de diseño condiciona fuertemente el valor máximo de velocidad del grupo⁴ tras un rechazo de carga, por consiguiente el valor de T_m es proporcional al valor de sobre presión en la tubería y al valor de sobre velocidad.

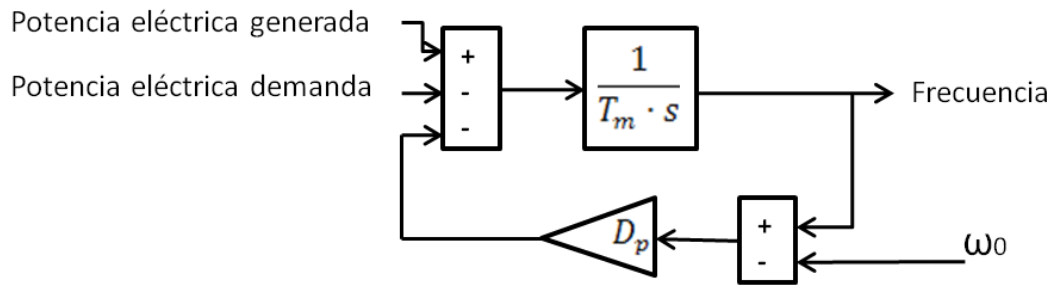
Para modelar el generador alimentando una carga aislada se considera que la potencia eléctrica depende en general de la suma de dos componentes: la de tensión y la de variación de frecuencia. Además, usualmente la tensión es independiente de la frecuencia, por lo que se expresa el efecto de frecuencia en la velocidad del generador como se muestra a continuación:

$$P_e = D_p(\omega - \omega_0) \quad (1.11)$$

La figura 3 ilustra el diagrama de bloques que modela el generador con carga aislada.

⁴ Unidad turbina-generador

Figura 3. Diagrama de bloque generador con carga aislada.

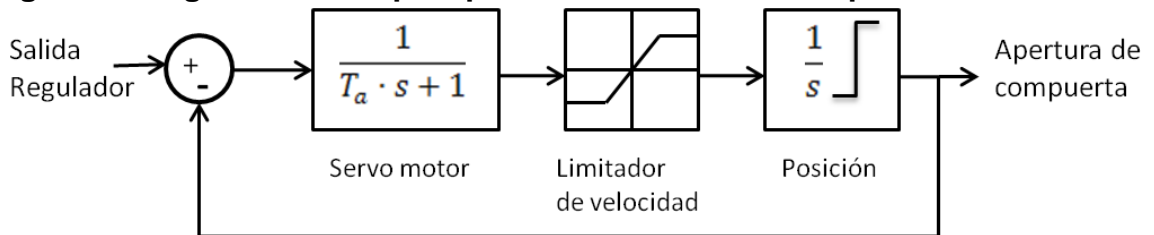


Fuente: Autores

1.4 MODELO DE LA COMPUERTA

La compuerta es una válvula que regula la entrada de agua a la turbina de acuerdo a la señal de control. El modelo de la compuerta es el siguiente:

Figura 4. Diagrama de bloques para el modelo de la compuerta



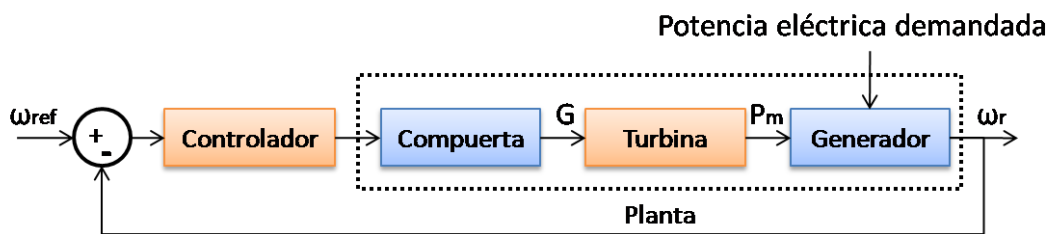
Fuente: Autores

El funcionamiento mecánico del servo motor se representa mediante una función de transferencia de primer orden con constante de tiempo T_a . El limitador de velocidad modela la rapidez límite con que la compuerta puede pasar de cierta posición a otra y el integrador con saturador permite modelar los límites de la compuerta junto a la condición inicial con que se simula el sistema.

1.5 DESCRIPCIÓN COMPLETA DEL SISTEMA

La figura 5 muestra un diagrama de bloques simplificado que ilustra el lazo de regulación de potencia-frecuencia, identificando las tres partes principales de la planta: la compuerta, la turbina y el generador.

Figura 5. Diagrama de bloques general de una central hidroeléctrica.



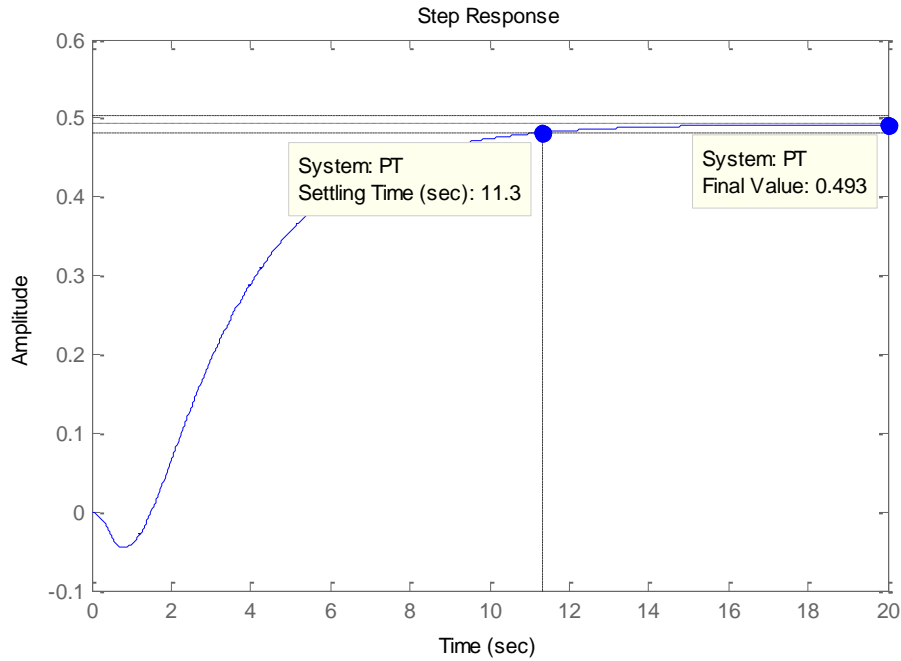
Fuente: Autores

La función del lazo de control es regular la velocidad del generador y la potencia eléctrica. El controlador actúa directamente sobre el servomotor que controla la compuerta, regulando el caudal de agua que ingresa a la turbina, de esta manera se logra la potencia y la velocidad necesaria para la demanda de carga. Además, la regulación del grupo es importante para asegurar la continuidad y la calidad de la frecuencia y tensión, las cuales deben conservarse alrededor de valores nominales establecidos.

1.6 ANÁLISIS DE LOS MODELOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

La comparación del desempeño de un sistema controlado es realizada inicialmente frente a la respuesta obtenida mediante la simulación del sistema sin controlar (en lazo abierto). En la figura 6 se muestra el cambio en la velocidad del rotor al variar la entrada del control entre los valores límites mediante un paso de 0 a 1 [pu] de la señal de control de la compuerta.

Figura 6. Velocidad del rotor luego de variar de 0 a 1 [pu] la señal de control de la compuerta



Fuente: Autores

La figura 6 muestra que en el peor de los casos el tiempo de establecimiento es de 11,3 [s] y el error en estado estable es 51,7%. Esta simulación se realizó para el modelo lineal utilizando los parámetros de la hidroeléctrica St. Lawrence [4] los cuales serán utilizados para todas las simulaciones de este trabajo. En la tabla 3 se resumen los parámetros principales.

Tabla 3: Resumen de los parámetros para hidroeléctrica St. Lawrence

Parámetro	Valor	Significado
P_{max}	72 [MW]	Potencia máxima de la turbina
T_w	0,39 [s]	Tiempo de comienzo del agua por la tubería
T_{ep}	0,0205 [s]	Tiempo de viaje de la onda
Z_p	19,024	Impedancia hidráulica de la tubería
U_{nl}	0,184 [pu]	Flujo mínimo sin carga

Fuente: Autores

2. TEORÍA DE CONTROL

Los sistemas reales presentan comportamientos no lineales, los cuales por complejidad son usualmente tratados mediante aproximaciones lineales. Sin embargo, dichas aproximaciones no son viables cuando se presentan grandes variaciones de parámetros, resultando en grandes errores en el cálculo de las variables.

Debido a esto, se presenta el control en modos deslizantes con estimación de la perturbación (SMCPE⁵) como una alternativa robusta y novedosa para efectuar el control de sistemas no lineales. El SMCPE permite reducir el desgaste en los actuadores, al evitar la sobrestimación de la perturbación presente en los métodos no lineales convencionales como el SMC⁶, el cual estima el ancho de la superficie para asegurar robustez ante la máxima perturbación permitida. Esta nueva técnica estima de forma precisa las perturbaciones en los estados presentes, permitiendo así cambiar el ancho de dicha superficie con base en las perturbaciones actuales. Como beneficio, las ganancias de control son menos rígidas y más suaves que con acciones equivalentes en el SMC.

En este capítulo se tratan las bases teóricas necesarias para diseñar el sistema de control de velocidad para la turbina de un hidrogenerador y la teoría de control en modo deslizante con estimación de la perturbación propuesta por Elmali y Olgac [5]. Además, los conceptos de control en tiempo retardado y control robusto son tratados por su gran importancia para entender el algoritmo de control propuesto.

2.1 ESTRUCTURAS VARIABLES

Un sistema de estructuras variables se compone de dos o más subsistemas continuos y una lógica que realiza la conmutación entre ellos en función de los estados del sistema. La acción de control resultante de esta ley de conmutación es

⁵Sliding mode control with perturbation estimation

⁶Sliding mode control

una función discontinua de los estados. El modo de operación llamado régimen deslizante se obtiene cuando las conmutaciones ocurren a frecuencias muy elevadas, restringiendo la trayectoria de los estados del sistema [6]. Los sistemas de estructuras variables tienen sus raíces en la teoría de control *Bang-Bang* (conocido como controlador de histéresis), el cual cambia bruscamente entre dos estados [7].

El efecto *chattering* se produce debido a la conmutación de alta frecuencia de la señal de control, el cual es perjudicial en aplicaciones prácticas donde el actuador presenta desgaste. Este efecto es conocido como un fenómeno de oscilaciones indeseadas con infinita frecuencia y amplitud [8].

2.2 FUNDAMENTOS DE CONTROL EN MODO DESLIZANTE

El control en modo deslizante es una técnica de control robusto que permite llevar al sistema y mantenerlo en un estado de estabilidad, conocido como superficie deslizante, sin importar las perturbaciones que actúen de forma directa o indirecta sobre la planta.

Las leyes de control para sistemas no lineales presentan varias propiedades atractivas, entre ellas la robustez frente a ciertas incertidumbres de los parámetros y ciertas dinámicas no modeladas, inmunes a perturbaciones y límites de conmutación dependientes de los estados. Esta última característica permite disminuir la magnitud del *chattering* asociado con los regímenes deslizantes, mejorando así la regulación sobre la salida del sistema que se desea controlar [9].

La idea principal de este control de estructura variable, SMC, es llevar el sistema a un espacio de control en donde los estados se mantengan dentro de un rango aceptable, conocido como superficie, la cual representa la variación del error en la salida y sus derivadas en función de un polo de desempeño deseado. Uno de los aspectos más intrigantes del modo deslizante es la naturaleza discontinua de la acción de control. Esta característica del sistema da como resultado un

rendimiento magnífico, ya que incluye la baja sensibilidad a las variaciones de los parámetros y el completo rechazo a perturbaciones.

El diseño se compone de dos pasos: el primero consiste en diseñar una superficie que limita el máximo valor de la acción de control en función de las incertidumbres de la planta y las perturbaciones externas. El segundo paso consiste en diseñar una ley de control para proporcionar la convergencia de la trayectoria del sistema hacia la superficie deslizante, la cual debe ser alcanzada en un tiempo finito. Así mismo, esta ley de control está dividida en dos partes: la ley de control del modo deslizante y la del modo de alcance. La primera es responsable de mantener la dinámica del sistema controlado sobre la superficie deslizante (comportamiento en lazo cerrado), mientras la segunda se diseña para alcanzar a la superficie deseada desde cualquier punto en el espacio de estados [10].

Para entender el comportamiento del algoritmo de control, se considera un sistema dinámico no-lineal de orden n [5]:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}^{(n)} = & f(\mathbf{X}_1, \dots, \mathbf{X}_m) + \Delta f(\mathbf{X}_1, \dots, \mathbf{X}_m) \\ & + [\mathbf{B}(\mathbf{X}_1, \dots, \mathbf{X}_m) + \Delta \mathbf{B}(\mathbf{X}_1, \dots, \mathbf{X}_m)]\mathbf{u} + \mathbf{d}(t) \end{aligned} \quad (2.1)$$

Donde $\mathbf{X}_i = [x_i, \dot{x}_i, \dots, x_i^{(n_i-1)}]^T \in \mathfrak{R}^{n_i}, i = 1, \dots, m$ es el vector de sub-estados el cual forma el vector de espacio de estados $[\mathbf{X}_1^T, \mathbf{X}_2^T, \dots, \mathbf{X}_m^T]^T \in \mathfrak{R}^r, r = \sum_{i=1}^m n_i, x_i, i = 1, \dots, m$ para m coordenadas independientes; $\mathbf{f} = [f_1, f_2, \dots, f_m]^T \in \mathfrak{R}^m$ y $\Delta \mathbf{f} = [\Delta f_1, \Delta f_2, \dots, \Delta f_m]^T \in \mathfrak{R}^m$ son vectores de campo correspondientes a los términos no lineales y sus perturbaciones respectivamente; $\mathbf{B} = [b_{ij}] \in \mathfrak{R}^{m \times m}$ y $\Delta \mathbf{B} = [\Delta b_{ij}] \in \mathfrak{R}^{m \times m}, i, j = 1, \dots, m$ son matrices que representan las ganancias de control y sus incertidumbres, respectivamente; $\mathbf{d} = [d_1, d_2, \dots, d_m]^T \in \mathfrak{R}^m$ es el vector de las perturbaciones del sistema y $\mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_m]^T \in \mathfrak{R}^m$ es el vector de entradas de control; $\mathbf{x}^{(n)} = [x_1^{(n_1)}, x_2^{(n_2)}, \dots, x_m^{(n_m)}]^T \in \mathfrak{R}^m, x_i^{(n_i)} \in \mathfrak{R}$ con $x_i^{(k)} = \frac{d^k(x_i)}{dt^k}, \dot{x}_i = \frac{d(x_i)}{dt}$. Las perturbaciones $\Delta \mathbf{f}, \Delta \mathbf{B}$ y \mathbf{d} no se conocen pero se

asume que están limitadas por funciones continuas $\mathbf{X}_i, i = 1, \dots, m$. Los límites superiores de las perturbaciones están dados por:

$$|\Delta f_j| \leq \mathbf{F}_j(X_1, \dots, X_m, t), \quad j = 1, \dots, m \quad (2.2)$$

$$|\Delta b_{ij}| \leq \mathbf{B}_{ij}(X_1, \dots, X_m, t), \quad i, j = 1, \dots, m \quad (2.3)$$

$$|d_j| \leq \mathbf{D}_j(X_1, \dots, X_m, t), \quad j = 1, \dots, m \quad (2.4)$$

El primer objetivo del control deslizante es satisfacer la condición de atracción, la cual se basa en una conmutación discontinua de la acción de control y se representa matemáticamente mediante:

$$s^T \dot{s} \leq 0 \quad (2.5)$$

Donde s representa el plano de deslizamiento, el cual es seleccionado como un polinomio tipo Hurwitz de los errores asociados con los estados del controlador. Un polinomio de Hurwitz es un polinomio con raíces reales negativas, es decir, se encuentran en el lado izquierdo del plano complejo.

La tarea del proceso de control es lograr que el vector de estado x siga un vector deseado del sistema, es por esto que el error negativo de seguimiento puede definirse como:

$$e_n = x - x_r = [e_n, \dot{e}_n, \dots, e_n^{n-1}]^T \quad (2.6)$$

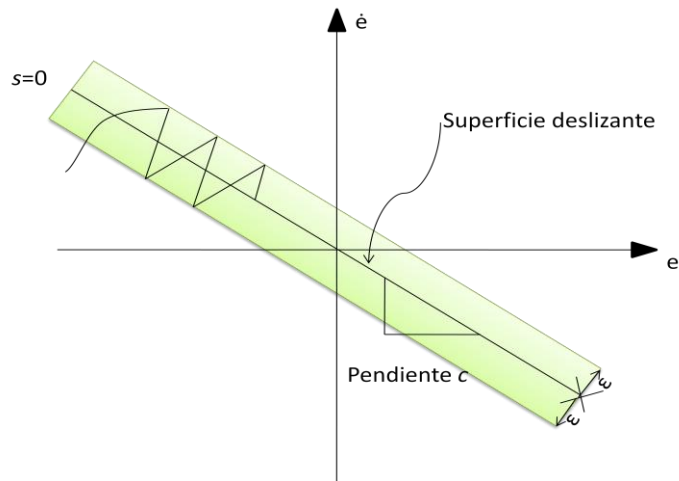
La superficie deslizante está definida en el espacio de estado R^n por la ecuación escalar dada por:

$$s(e_n, t) = \left\langle \frac{d}{dt} + c \right\rangle^{n-1} \cdot e_n \quad (2.7)$$

Donde n es el orden del sistema y c es una constante real estrictamente positiva correspondiente a la pendiente de la superficie deslizante. El trabajar con un polinomio de grado reducido $(n-1)$ permite además de controlar la salida, suavizar

la respuesta de sus derivadas, lo cual es de gran importancia para sistemas de control con variables derivadas.

Figura 7. Región deslizante en el plano fase con *chattering* para un sistema de segundo orden.



Fuente: Autores

Para el caso de la figura el orden $n=3$,

$$s(e_n, t) = \left(\frac{d}{dt} + c \right)^{n-1} \cdot e_n = \ddot{e}_n + 2c\dot{e}_n + c^2 e_n \quad (2.8)$$

El parámetro de diseño c interpretado como la pendiente de la superficie deslizante tiene gran influencia en el desempeño del sistema. Al ser un parámetro elegido *ad hoc* sus posibles valores deben ser validados mediante simulación, teniendo en cuenta que se presentará *chattering* en la señal de control y en la salida del sistema, cuando se exige un comportamiento mayor a la respuesta natural de la planta.

La condición 1, (2.5), no es posible en la práctica debido a que la conmutación de los componentes reales no es instantánea, por lo cual se presentaría un movimiento en la dirección de la superficie deslizante $s(t) = 0$, como se observa en la figura 7. Con el fin de eliminar el problema en la región deslizante, se considera

un margen de oscilación por lo cual la nueva condición se puede expresar como [10]:

$$s \cdot \dot{s} \leq -k \operatorname{sgn}(s) \quad (2.9)$$

Se observa que la acción de control es de la siguiente forma:

$$\mathbf{u} = \mathbf{B}^{-1}[-P \cdot s - \mathbf{K} \cdot \operatorname{sgn}(s) - f - \xi + \mathbf{x}_d^{(n)}] \quad (2.10)$$

Y posee una dinámica deseada:

$$\dot{s} = -P \cdot s - \mathbf{K} \cdot \operatorname{sgn}(s) \quad (2.11)$$

En la ausencia de perturbaciones. En (2.10) P es una constante positiva real y:

$$\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_m]^T \quad (2.12)$$

$$\mathbf{K} = \operatorname{diag}(k_j), \quad k_j > 0, \quad j = 1, \dots, m \quad (2.13)$$

$$\operatorname{sgn}(s) = [\operatorname{sgn}(s_1), \dots, \operatorname{sgn}(s_m)]^T, \quad \operatorname{sgn}(s_j) = \operatorname{signum}(s_j) \quad (2.14)$$

$$\xi = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m]^T, \quad \xi_j = \sum_{k=1}^{n_j-1} c_{j,k} e_j^{(k)} \quad (2.15)$$

$$\mathbf{x}_d^{(n)} = [x_{d_1}^{(n_1)}, x_{d_2}^{(n_2)}, \dots, x_{d_m}^{(n_m)}]^T \quad (2.16)$$

En presencia de perturbaciones, la dinámica de la superficie deslizante toma la siguiente forma:

$$\dot{s} = -P \cdot s - \mathbf{K} \cdot \operatorname{sgn}(s) + \Delta \mathbf{f} + \mathbf{d} + \Delta \mathbf{B} \mathbf{u} \quad (2.17)$$

Para mantener la condición de atracción, la ganancia (k_j) debe asegurar control para el peor de los casos:

$$k_j \geq (\Delta \mathbf{f} + \mathbf{d} + \Delta \mathbf{B} \mathbf{u})_{j, \text{para el peor de los casos}} \quad (2.18)$$

Con el fin de eliminar el problema de causalidad, donde se encuentran acciones de control desconocidas, el valor actual de dicha acción, \mathbf{u} , se sustituye por una más reciente $\mathbf{u}(t - \delta)$, donde δ es el tiempo de muestreo el cual debe ser muy pequeño para que la aproximación sea válida [11]. Este reemplazo reduce el efecto *chattering* en la acción de control. En consecuencia, la nueva constante para la acción discontinua que garantiza la robustez frente a las perturbaciones actuales es:

$$k_j \geq \mathbf{F}_j + \mathbf{D}_j + \sum_{k=1}^m \mathbf{B}_{jk} |u_k(t - \delta)|, \quad j = 1, \dots, m \quad (2.19)$$

En (2.17) y (2.18) la función signo se define como:

$$\mathbf{sgn}(s) = \frac{|s|}{s} = \begin{cases} 1; & \text{si } s > 0 \\ 0; & \text{si } s = 0 \\ -1; & \text{si } s < 0 \end{cases} \quad (2.20)$$

Con el fin de suavizar la conmutación, la función discontinua signo se reemplaza por una función tangente hiperbólica [12], sin embargo por simplicidad es utilizada la función de saturación:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{sgn}(s) = \mathbf{K} \text{sat} \left(\frac{s}{\varepsilon} \right) \quad (2.21)$$

La cual está definida como:

$$\text{sat} \left(\frac{s}{\varepsilon} \right) = \begin{cases} \mathbf{sgn} \left(\frac{s}{\varepsilon} \right); & \text{cuando } |s| > \varepsilon \\ \frac{s}{\varepsilon}; & \text{cuando } |s| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (2.22)$$

Donde ε es el espesor de la superficie de deslizamiento.

Las características de filtro pasa bajas deseadas discutidas anteriormente pueden ser alcanzadas al seleccionar la frecuencia de corte mediante:

$$\text{eig} \left\{ \left(\mathbf{I} + \Delta \mathbf{B} \mathbf{B}^{-1} \right) \left(\mathbf{P} \mathbf{I} + \frac{1}{\varepsilon} \mathbf{K} \right) \right\}_{\max} \leq \omega_{\max} \quad (2.23)$$

Usando propiedades de las matrices se llega a una expresión para el espesor de la superficie:

$$\varepsilon = \frac{2k_{max}}{\omega_{max} - 2P} \omega_{max} - 2P > 0 \quad (2.24)$$

La selección de este límite es un equilibrio entre la precisión y la robustez. La expresión para calcular el espesor de la capa límite (2.24) debe cumplirse rigurosamente.

2.3 FUNDAMENTOS DE CONTROL EN MODO DESLIZANTE CON ESTIMACIÓN DE LA PERTURBACIÓN.

El SMC básico presenta dos grandes problemas: requiere conocer previamente los límites superiores de todas las perturbaciones (lo cual no siempre es posible) y tiene una limitada integridad de respuesta (es poco usual que un sistema opere en el peor de los casos) a causa de la rigidez de los parámetros. Para el caso de SMC (2.19) la ganancia debe ser estrictamente calculada con base en las peores condiciones del sistema para mantener la atracción de la superficie en todo momento, dando como resultado ganancias relativamente altas para aplicaciones prácticas.

En esta sección, se intentan corregir estos problemas introduciendo el concepto de 'Control en tiempo retardado' [11], según el cual la continuidad de la acción de control permite aproximar el efecto implícito de la misma con su valor inmediatamente anterior.

Partiendo de lo anterior, la perturbación del sistema $\Psi(t)_{actual}$ puede calcularse al restar la máxima derivada de la entrada calculada junto a las relaciones \mathbf{f} y \mathbf{B} , las cuales son funciones de los estados del controlador:

$$\Psi(t)_{actual} = \Delta \mathbf{f} + \Delta \mathbf{B} \mathbf{u} + \mathbf{d} = \mathbf{x}^{(n)} - \mathbf{f} - \mathbf{B} \mathbf{u} \quad (2.25)$$

Si todos los componentes presentan variaciones lentas con respecto al muestreo en lazo cerrado, la ecuación (2.25) se puede escribir con $\mathbf{u}(t-\delta)$ en lugar de $\mathbf{u}(t)$. Es importante aclarar que $\mathbf{x}^{(n)}$ se calcula a partir de $\mathbf{x}^{(n-1)}$ mediante derivación

numérica. Si las mediciones de $\mathbf{x}^{(n-1)}$ son ruidosas, lo cual es común, deben filtrarse para evitar grandes variaciones al momento de calcular $\mathbf{x}^{(n)}$.

La ecuación (2.10), correspondiente a la acción de control obtenida, puede reescribirse incluyendo la estimación de las perturbaciones:

$$\mathbf{u} = \mathbf{B}^{-1}[-\mathbf{P}\mathbf{s} - \mathbf{K}\text{sgn}(s) - \mathbf{f} - \boldsymbol{\xi} + \mathbf{x}_d^{(n)} - \boldsymbol{\Psi}(t)_{\text{Estimado}}] \quad (2.26)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Psi}(t)_{\text{Estimado}} &= \mathbf{x}_{\text{Calculado}}^{(n)} - \mathbf{f}(X_1(t), \dots, X_m(t)) \\ &\quad - \mathbf{B}(X_1(t), \dots, X_m(t))\mathbf{u}(t - \delta) \end{aligned} \quad (2.27)$$

Las correspondientes dinámicas de s corresponden a:

$$\dot{s} = -\mathbf{P}s - \mathbf{K}\text{sgn}(s) + \boldsymbol{\Psi}(t)_{\text{actual}} - \boldsymbol{\Psi}(t)_{\text{Estimado}} \quad (2.28)$$

Si la diferencia de $|\boldsymbol{\Psi}(t)_{\text{actual}} - \boldsymbol{\Psi}(t)_{\text{Estimado}}|$ se mantiene dentro de un límite $\eta|\boldsymbol{\Psi}(t)_{\text{Estimado}}|$, con $\eta > 0$, la condición de atracción de (2.5) se puede asegurar seleccionando los k_j como:

$$[k_1, \dots, k_m]^T = \eta|\boldsymbol{\Psi}(t)_{\text{Estimado}}| \geq |\boldsymbol{\Psi}(t)_{\text{actual}} - \boldsymbol{\Psi}(t)_{\text{Estimado}}| \quad (2.29)$$

Nótese que en comparación con las altas ganancias del control en modo deslizante ahora los k_j son más pequeños, de donde radica la gran ventaja del control SMCPE. Esta reducción se debe a la forma de calcular el término de la acción discontinua mediante la estimación de la perturbación actual en lugar de la máxima perturbación posible [5].

Utilizando la función saturación para reemplazar la función signo, la dinámica s asume el siguiente comportamiento dentro de la frontera.

$$\dot{s} + (\mathbf{P}\mathbf{I} + \bar{\mathbf{K}})s = \boldsymbol{\Psi}(t)_{\text{actual}} - \boldsymbol{\Psi}(t)_{\text{Estimado}} \quad (2.30)$$

Donde $\bar{\mathbf{K}} = \text{diag}\left(\frac{k_j}{\varepsilon_j}\right)$. La dinámica de s se reduce a una forma similar a (2.17), salvo con una amplitud mucho menor de las condiciones de conducción. Por lo tanto, se obtienen espesores ε_j más pequeños.

La dinámica de s en (2.30) es bastante complicada debido a los términos $\Psi(t)_{\text{actual}}$ y $\Psi(t)_{\text{Estimado}}$, los que contienen influencias de s que son imposibles de aislar. En consecuencia, todas las contribuciones de s en los términos $\Psi(t)_{\text{actual}}$ y $\Psi(t)_{\text{Estimado}}$ deben ser filtrados para eliminar dinámicas no deseadas.

El comportamiento deseado del filtro pasa baja de s se obtiene mediante la limitación de su frecuencia de corte máxima a ω_{\max} , la cual se puede lograr seleccionando el espesor de la frontera como:

$$\varepsilon_j = \frac{k_j}{\omega_{\max} - P} \quad (2.31)$$

Todas estas consideraciones permiten que el control en modo deslizante mejore el desempeño en función de las incertidumbres y perturbaciones no conocidas. El cálculo en línea de los límites de la superficie mejora el desempeño y duración de los actuadores mecánicos los cuales son sometidos a la acción de control proveniente de estos controladores. Sin embargo, un amplio conocimiento de la planta y de su comportamiento dinámico debe ser conocido ya que las funciones \mathbf{f} y \mathbf{B} deben ser precisas para garantizar la estabilidad del controlador [12].

3. DISEÑO DEL CONTROLADOR

El diseño de un controlador en modo deslizante requiere expresar el comportamiento dinámico de la planta en forma canónica controlable⁷. Sin embargo, en muchos casos no es fácil obtener la forma requerida y debe buscarse una alternativa a esta representación. En este capítulo se describe el proceso requerido para diseñar el control en modo deslizante con estimación de la perturbación, SMCPE, además de las consideraciones que deben realizarse a la hora de ajustar los parámetros elegidos arbitrariamente.

3.1 ALGORITMO DE CONTROL

El algoritmo de control presentado en [5] define varios pasos claves a la hora de diseñar un controlador en modo deslizante con estimación de la perturbación. Primero, se computan los errores mediante representación numérica de los estados del controlador, los cuales son utilizados posteriormente en el cálculo de las variables s^8 y X_i , según las ecuaciones (2.7) y (2.15) respectivamente.

Luego se computan las ecuaciones de f y B , que son usadas junto a la acción de control inmediatamente anterior para estimar la perturbación en el sistema, según la ecuación (2.27). La función de saturación descrita en (2.22) es computada mediante comparadores lógicos como una función de MATLAB.

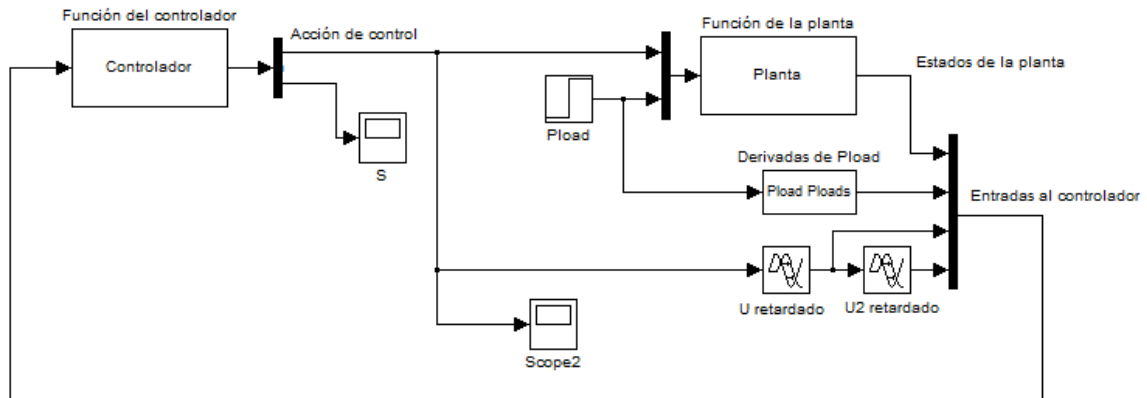
Un modelo en Simulink es creado para representar el comportamiento de la central hidroeléctrica, donde el algoritmo de control es introducido mediante una función S^9 . Los bloques correspondientes a la planta y el controlador son modificados con base en el modelo utilizado. La figura 8 presenta la distribución de bloques para realizar la simulación en software del sistema.

⁷ Para una planta con n -estados, la n -ésima derivada de la salida puede expresarse en función de sus derivadas anteriores

⁸ Representa la distancia al plano de las variables del sistema a la superficie deslizante en el plano de fase.

⁹ Una función S es un lenguaje de descripción computacional para un bloque de simulink escrito en MATLAB, C, C++ or fortran.

Figura 8. Modelo generalizado del sistema de control



Fuente: Autores

3.2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

En la simulación de sistemas no lineales es común encontrar problemas de convergencia del algoritmo de solución. Para esto, es necesario evaluar las consideraciones de simulación con el fin de prevenir indeterminaciones y errores en el programa.

Las ecuaciones dinámicas en el modelo no lineal presentan fallas cuando son introducidas sin considerar las variaciones inmediatas de las señales de entrada. Este comportamiento se debe a la presencia de derivadores numéricos los cuales son sensibles a las frecuencias altas de dichas señales [13].

Más irregularidades se generan a causa de condiciones iniciales que no corresponden a comportamientos adecuados para el modelo. Esto es especialmente importante en el cálculo del cabezal de agua, el cual depende directamente de la relación entre el flujo (Uf) y el valor de apertura de la compuerta (G). Si el valor de la apertura llega a ser nulo, el cabezal de agua es indeterminado. Este problema es solucionado al introducir en el saturador del modelo de la compuerta un límite inferior mayor a cero.

Finalmente el modelo presenta un lazo algebraico debido al comportamiento realimentado del generador. Los métodos de simulación no reportan buenos

resultados con lazos algebraicos cuyos valores iniciales no ofrezcan una solución consistente, por lo cual se fijan las condiciones de partida como aquellas que permiten lograr una velocidad nominal en ausencia de carga.

3.3 DISEÑO DEL CONTROLADOR

De forma inicial se expresa el comportamiento dinámico en espacio de estados, identificando tres estados base: la posición de apertura de la compuerta (G), la velocidad del agua en la tubería (Ut) y finalmente la velocidad del rotor (Wr):

$$G_{dot} = \frac{u}{Tg} - \frac{G}{Tg} \quad (3.1)$$

$$Ut_{dot} = \frac{1}{Twp} - \frac{Ut^2}{G^2 * Twp} \quad (3.2)$$

$$Wr_{dot} = \frac{D}{2 * H} - \frac{Pload}{2 * H} - \frac{D * Wr}{2 * H} + \frac{At * Ut^3}{2 * G^2 * H} - \frac{At * Unl * Ut^2}{2 * G^2 * H} \quad (3.3)$$

Seguido a esto, se busca expresar la enésima derivada de la salida como combinación de sus derivadas anteriores. Para esto, se deriva simbólicamente la ecuación del tercer estado hasta alcanzar el grado requerido, expresando el resultado en término de las variables de estados.

$$Wr_{3dot} = \frac{P_{2dot} - Pload_{2dot} - D * Wr_{2dot}}{2 * H} \quad (3.4)$$

La ecuación resultante se caracteriza por poseer términos cuya dinámica no lineal es función de la entrada al sistema o su derivada (como es el caso de Wr_{2dot}).

Por la complejidad de esta representación, se utiliza el fundamento de control en tiempo retardado [11] para explicar la poca importancia que poseen los términos con derivada de la entrada cuando no existen discontinuidades en la acción de control despreciando su efecto en la dinámica de s. La forma final se expresa a

continuación presentando una primera aproximación al comportamiento de las variables f y B necesarios en el controlador.

$$\mathbf{Wr}_{3dot} = \mathbf{f}(\mathbf{G}, \mathbf{Ut}, \mathbf{Wr}) + \mathbf{B}(\mathbf{G}, \mathbf{Ut}, \mathbf{Wr})\mathbf{u} \quad (3.5)$$

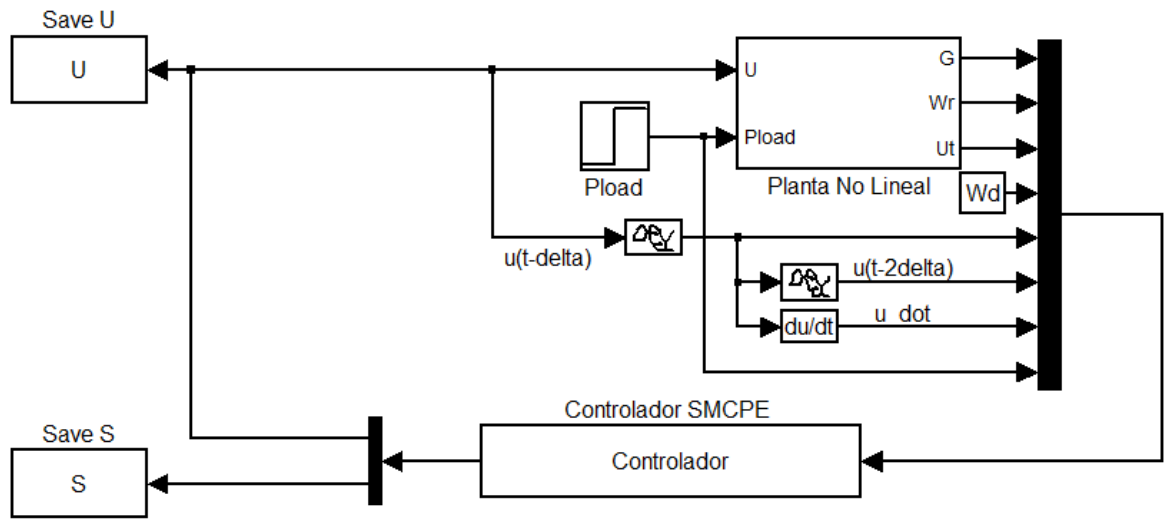
La implementación en Simulink para el modelo con control no lineal basado en las ecuaciones descritas anteriormente se observa en la figura 9. El esquema muestra un bloque correspondiente al controlador, que es escrito como función S y tiene como salidas la acción de control calculada y el valor de la variable s .

El subsistema correspondiente a la planta no lineal es creado a partir del esquema de funcionamiento propuesto en [1]. Las condiciones iniciales de las funciones de transferencia de la compuerta y turbina se logran al representar éstas mediante integradores. El cambio en la demanda de potencia se simula como una acción de tipo escalón.

La figura 10 presenta el valor de la acción de control, la variable S y la velocidad del rotor. La potencia de carga cambia su valor de 0 a 1 [p.u.] a los 25 segundos. La acción de control sobrepasa los límites numéricos de MATLAB a los 25,6 segundos. La inestabilidad del controlador demuestra el fracaso de la representación señalada en (3.5).

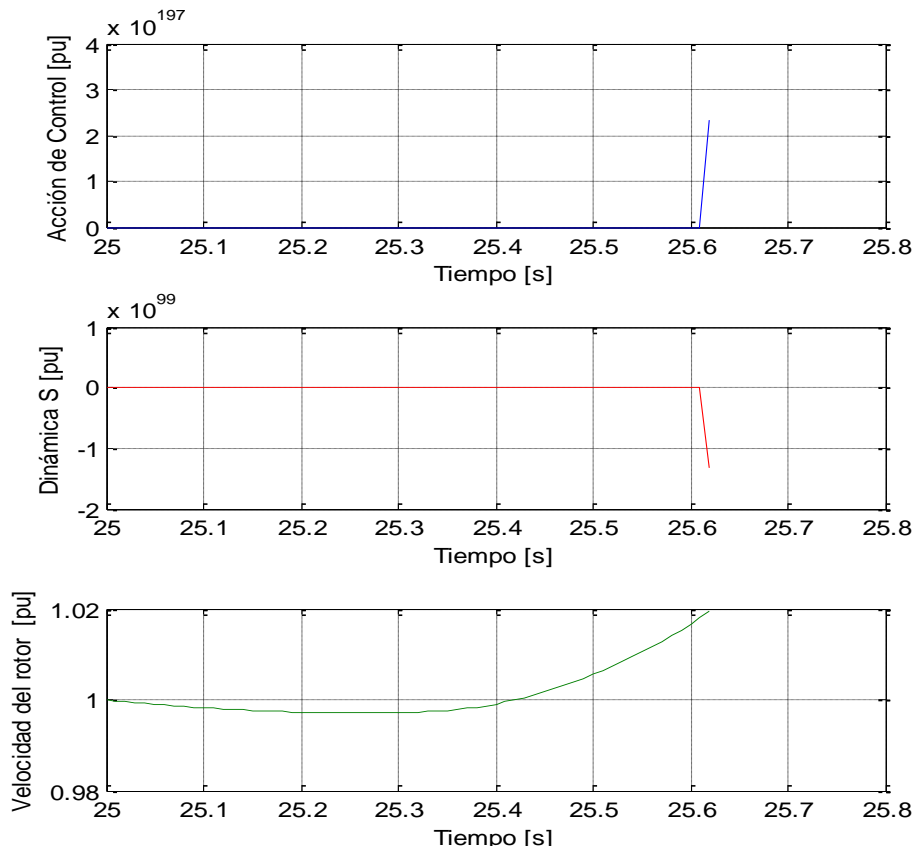
La forma canónica controlable consiste en expresar la mayor derivada de la salida en función de sus derivadas anteriores y la entrada. Sin embargo, en algunos casos las derivadas de las salidas dependen de forma directa de la entrada, la cual al ser reemplazada en la forma canónica, induce términos erróneos para las funciones f y B . Aunque el controlador SMCPE presenta un comportamiento robusto ante perturbaciones, pequeños cambios en los parámetros considerados en la ley de control (especialmente los correspondientes al comportamiento dinámico del sistema) afectan la propiedad de atractividad, con lo cual la estabilidad del controlador no puede ser asegurada.

Figura 9. Diagrama de bloques utilizado para la implementación de control no lineal



Fuente Autores

Figura 10. Comportamiento de U, S y Wr para el controlador no lineal



Fuente: Autores

En [13] se consideran casos en los cuales las no linealidades y zonas muertas no hacen posible la obtención de una ley de control en modo deslizante. Se logra una nueva acción de control mediante la compensación de dichas acciones al introducir términos en función de la dinámica conocida. Sin embargo, las zonas muertas y no linealidades consideradas deben actuar directamente sobre la respuesta del controlador. En [14] se propone la obtención de una forma canónica para modo deslizante mediante el uso de propiedades de realimentación. Lamentablemente la elección de funciones de campo para realizar la transformación aumenta el grado de dificultad del problema, al poseer dinámicas no lineales que aumentan en gran medida el orden de las derivadas.

El comportamiento complejo de la planta junto a la dificultad que presenta la representación de la dinámica en forma canónica controlable, crea la necesidad de recurrir a un modelo simplificado utilizado para calcular parámetros propios de la forma controlable que no pueden obtenerse de otra manera.

El modelo de la turbina lineal en (1.9) es elegido por su practicidad y trascendencia. Con este se obtiene un desempeño similar al del modelo no lineal estudiado en forma inicial. Sin embargo, al despreciar la mínima velocidad requerida para la generación de potencia (U_{nl}) las condiciones de arranque cambian de forma considerable.

El uso de la aproximación lineal permite representar la central hidroeléctrica como una interconexión de funciones de transferencia (para el comportamiento de la compuerta, turbina y generador). Mediante teoría de control clásico, la multiplicación de las funciones de transferencia para cada componente, permite obtener una función general, que representa la variación de la velocidad del rotor frente a la entrada de control de la compuerta. Los nuevos estados de la planta son la apertura de la compuerta (G), la potencia mecánica (P) y la velocidad del rotor (W_r).

Las ecuaciones de espacio de estados obtenidas al simplificar la función de transferencia equivalente a la aplicación de las ecuaciones (1.10) y (1.11), se muestran a continuación:

$$\dot{X}_1 = X_2 \quad (3.6)$$

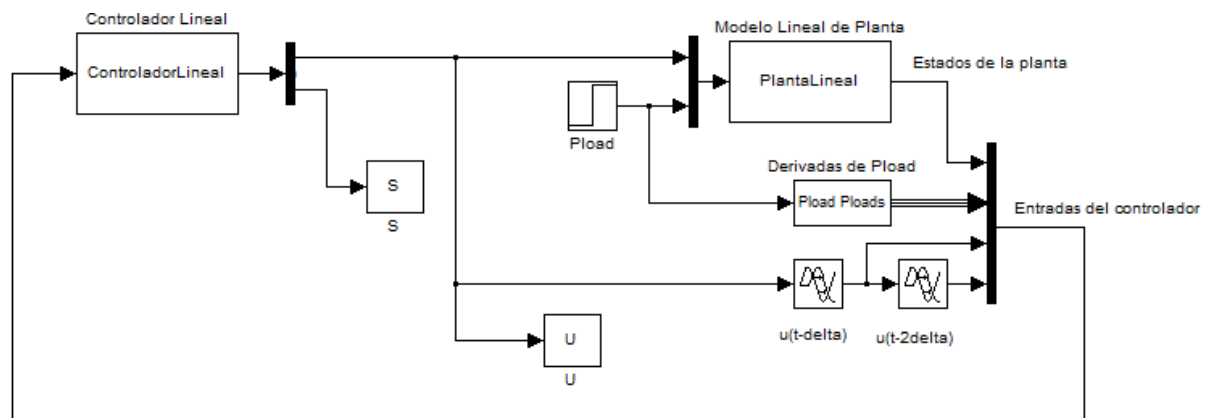
$$\dot{X}_2 = X_3 \quad (3.7)$$

$$\dot{X}_3 = k_1 * X_1 + k_2 * X_2 + k_3 * X_3 + k_4 * u \quad (3.8)$$

Donde $X^T = [W_r W_{r\dot{}} W_{r2\dot{}}]$ y k_1, k_2, k_3 y k_4 son constantes en función de los parámetros de la planta.

Esta representación de espacio de estados se encuentra en la forma canónica controlable y puede ser usada de forma directa para el cálculo de f y B requeridos por el controlador en modo deslizante con estimación de la perturbación. Un nuevo modelo en Simulink se construye a partir de la representación de la planta en forma lineal, y puede observarse en la figura 11.

Figura 11. Diagrama de bloques para la implementación de controlador lineal para el modelo lineal

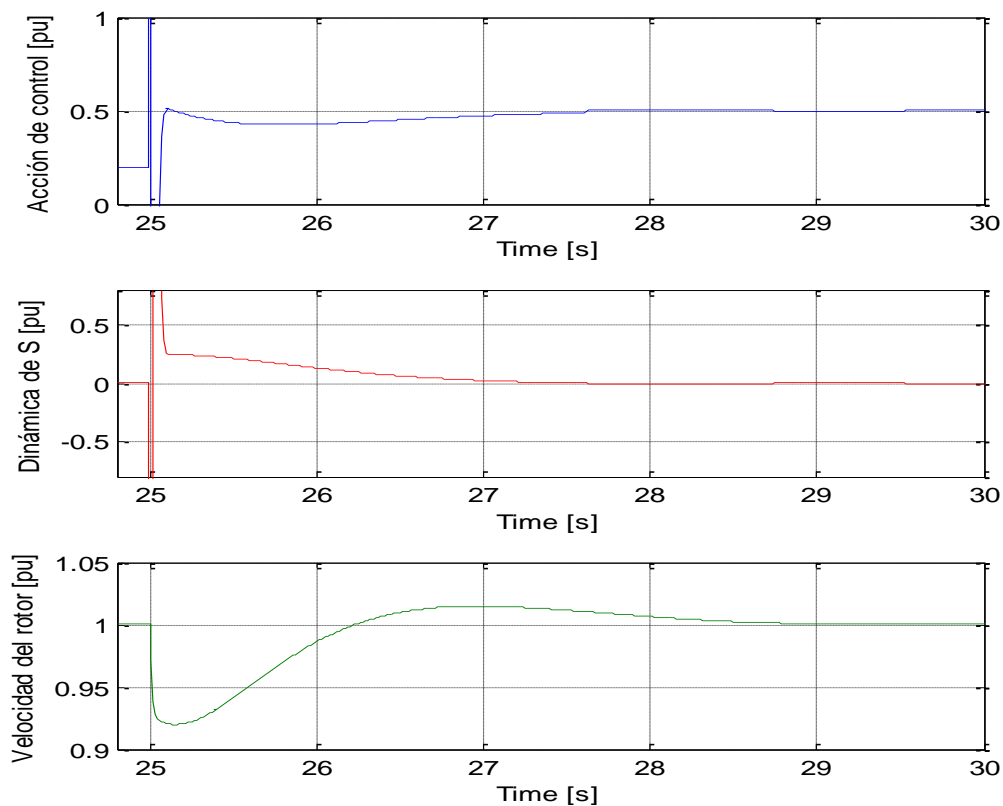


Fuente: Autores

Los resultados obtenidos para la velocidad del rotor, la dinámica de la acción de control y la variable S se presentan en la figura 12.

Se demuestra que el algoritmo de control funciona de forma eficiente y logra estabilizar el sistema luego de introducir diversas perturbaciones en forma de potencia de carga, reduciendo el tiempo de establecimiento sin poseer error en estado estable. La dinámica de las variables presenta cambios bruscos en el punto en el cual cambia la carga (25 segundos).

Figura 12. Comportamiento de U, S y W_r para el controlador lineal con modelo de planta lineal



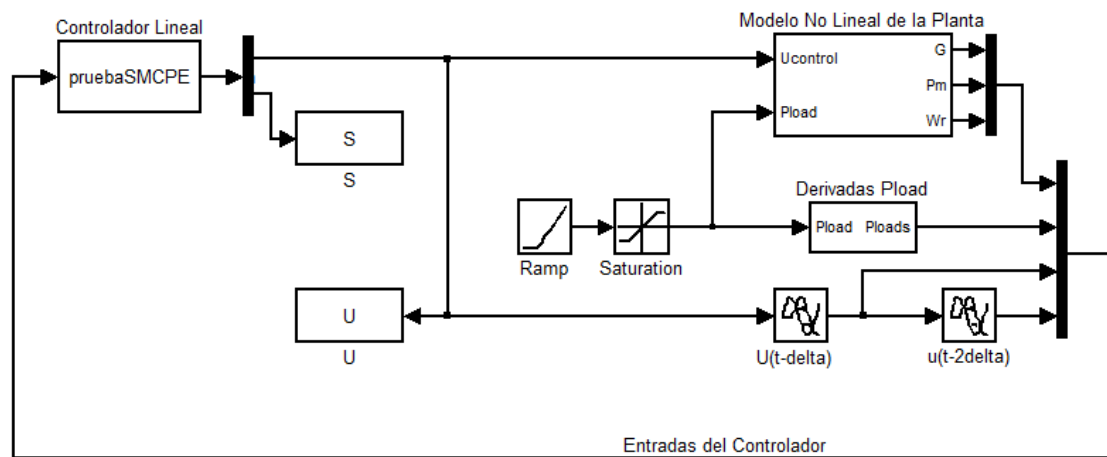
Fuente: Autores

Luego de verificar el buen desempeño del controlador frente a las condiciones de un sistema no controlado, se procede a utilizar el controlador diseñado con la planta lineal en el modelo de planta no lineal. Aunque no se espera que el desempeño sea mejor que el presentado para el modelo anterior, la respuesta ante perturbaciones significativas debería verse compensada por la estimación de la perturbación propia del algoritmo de control. Aunque la técnica de control en

modo deslizante es robusta ante incertidumbres y perturbaciones, una mala representación de f y B disminuye la exactitud en la respuesta, aumentando el error en estado estable y en ciertos casos sobrepasando los límites aceptables

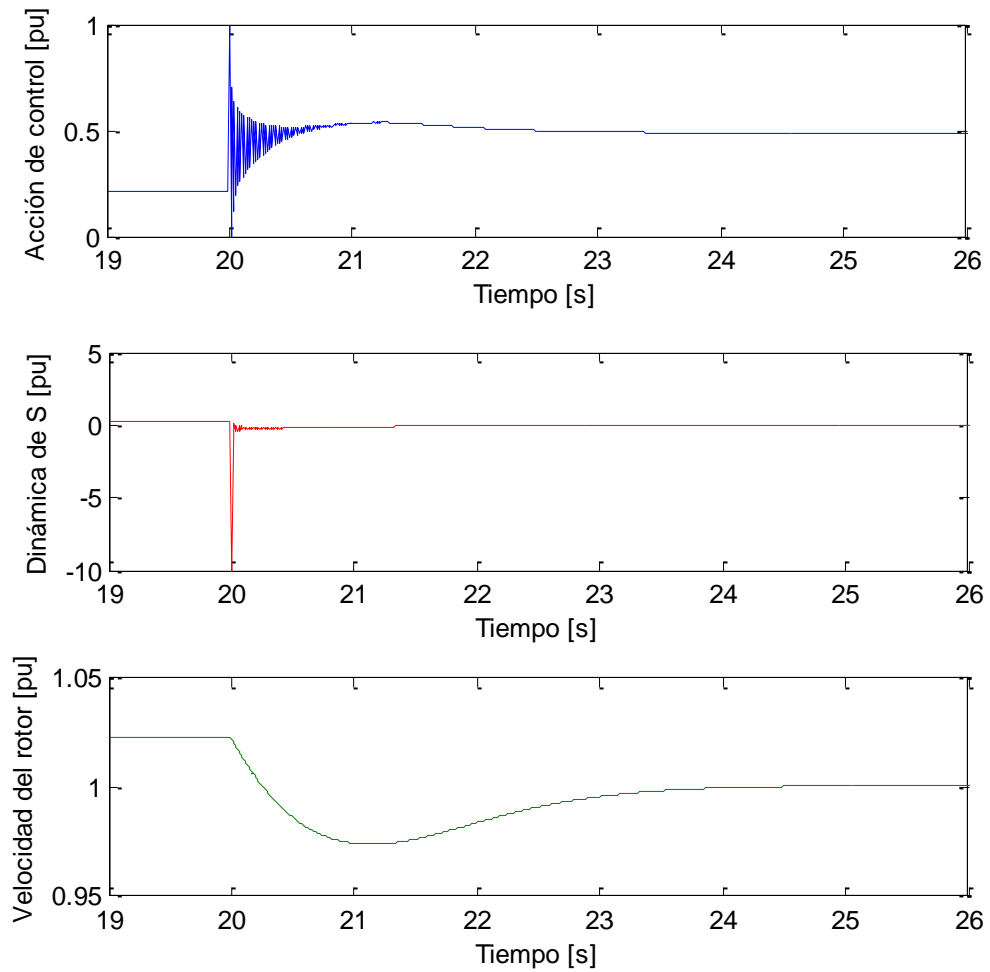
La figura 13 muestra el modelo utilizado para realizar la simulación. Es importante obtener de forma numérica las derivadas de la potencia de carga, ya que la estimación de la máxima derivada de la salida depende de estas. La figura 14 muestra los resultados obtenidos para esta configuración de planta y controlador. Como era de esperarse, aunque el resultado no es tan eficiente como con la planta lineal, se logra un error menor al 2% para variaciones de carga de 0,3 y 0,5 [p.u.]. Aunque la variable S no llega exactamente a cero, se mantiene dentro de la banda de tolerancia definida por el espesor de la superficie, por lo cual se puede asegurar que el controlador cumple las condiciones de diseño [5].

Figura 13. Diagrama de bloques para la implementación de controlador lineal para el modelo no lineal



Fuente: Autores

Figura 14. Comportamiento de U, S y Wr para el controlador lineal usado en el modelo de planta no lineal



Fuente: Autores

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

Para el diseño de sistemas robustos se hace necesario medir cuantitativamente el comportamiento del sistema de control. Uno de los objetivos del presente trabajo es comparar el funcionamiento del control en modo deslizante con estimación de las perturbaciones contra el controlador “ H_∞ ” [15]. Para este último se usó un programa en MATLAB permitiendo obtener el controlador “ H_∞ ” óptimo para los parámetros deseados (ver Anexo C).

4.1 DEFINICIÓN DE LOS ÍNDICES Y CRITERIOS DE DESEMPEÑO

Los índices de desempeño son medidas cuantitativas que especifican el costo de operación del sistema en función del error y de la energía. Con el fin de evaluar el comportamiento dinámico, la calidad de la respuesta transitoria y el esfuerzo del controlador de dicho sistema se presentan los siguientes índices de desempeño IAE, IEC, ITAE, ITSE, T_s [16].

4.1.1 Integral del error absoluto (IAE):

El IAE brinda el área bajo la curva del error, ésta representa la cantidad de material fuera de especificaciones, energía perdida u otra característica indeseada. Se emplea en sistemas que no son excesivamente oscilatorios ni excesivamente lentos. El tratamiento analítico es complejo. Para un control perfecto el IAE es a cero.

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (4.1)$$

4.1.2 Integral del error cuadrático (ISE o IEC):

Al igual que el IAE, este índice trata que el sobrepaso máximo sea lo menor posible de manera que el valor de la integral sea mínimo. La diferencia entre el criterio *IAE* y el *IEC*, consiste básicamente en que con el *IEC* se tiene más ponderación para errores grandes, los cuales se presentan generalmente al inicio

de la respuesta, y menor ponderación para errores pequeños presentados al final de la respuesta.

$$IEC = \int_0^{\infty} [e(t)]^2 dt \quad (4.2)$$

4.1.3 Integral del valor absoluto del error ponderado (ITAE):

Se utiliza para reducir el efecto del gran error inicial sobre el valor de la integral de desempeño, tiene una gran virtud de garantizar que un error a tiempo avanzado tendrá una gran reacción del controlador

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt \quad (4.3)$$

4.1.4 Integral del cuadrado del error ponderado en el tiempo (ITSE):

Al igual que el ITAE, por utilizar como base la multiplicación entre el error y el tiempo, indica la rapidez del sistema. De modo similar al IEC, el índice de desempeño ITSE presenta más ponderación para errores grandes, los cuales se presentan generalmente en la respuesta transitoria, y menor ponderación para errores pequeños.

$$ITSE = \int_0^{\infty} te(t)^2 dt \quad (4.4)$$

4.1.5 Tiempo de asentamiento:

Se escogió el tiempo de asentamiento como otro de los criterios de desempeño ya que es importante estimar el tiempo requerido para estabilizar el sistema¹⁰ cuando ambos controladores presentan comportamiento robusto.

4.2 ANÁLISIS DE LOS ÍNDICES DE DESEMPEÑO PARA H_{∞} Y SMCPE

Los índices de desempeño definidos en la sección 4.1 son calculados desde el momento en que ocurre la perturbación o cambio en el *Set Point* ($t = 20$), hasta un

¹⁰ Es el tiempo requerido por el sistema para que el error entre en una banda del $\pm 2\%$ del valor deseado.

tiempo muy largo ($t = \infty$), debido a que no se puede predecir la duración de las respuestas. El problema con esta definición de la integral para el cálculo de los índices, es que se vuelve indeterminada cuando no se fuerza el error a cero debido a la desviación, o el error en estado estacionario; en este caso, la integral se define para un intervalo de tiempo, el cual se selecciona analizando el tiempo de asentamiento para diferentes puntos de operación de los dos controladores, tomando el peor de los casos (45 s para la planta en consideración). [17].

Se entiende como punto de operación la condición en la cual un sistema presenta características ideales en su respuesta. En el caso de los sistemas lineales, el punto de operación está definido por el intervalo en el cual las aproximaciones tomadas son válidas. Por lo anterior, al introducir una perturbación el comportamiento dinámico modificará dichas características ideales sacando al sistema de su punto de operación. Diversos intervalos de perturbación son considerados, permitiendo examinar el desempeño de ambos controladores frente a condiciones de carga no nominales.

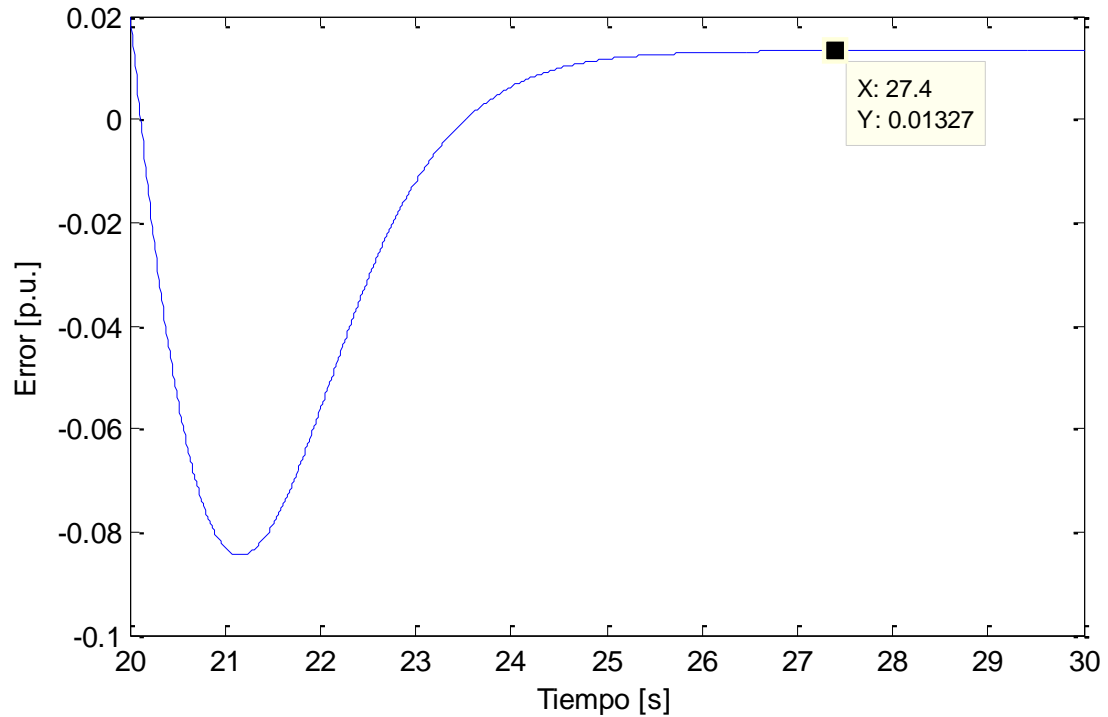
El controlador H infinito parte del punto de operación sobre el cual fueron linealizadas las ecuaciones de la planta ($P_{load} = 1$ [p.u.]). En [18] se discuten los valores típicos para una turbina trabajando a plena carga, así como la aproximación para los parámetros al considerarse una turbina sin pérdidas en función de la carga de operación.

En [15] el controlador H infinito se diseña a partir de la función de transferencia clásica para el modelo de turbina y tubería forzada. Se espera que el desempeño de éste sea superior en un rango cerca del punto de operación para el que fue diseñado (próximo a uno, [0,9-1]).

A continuación se analizan los resultados para la variación más grande que puede presentar la potencia de carga (0 a 1 [p.u]) representando el peor de los casos que debe manejar el controlador.

La figura 15 muestra que para SMCPE la integral tomará un valor indeterminado, puesto que el valor del error en estado estable es de 1,327%.

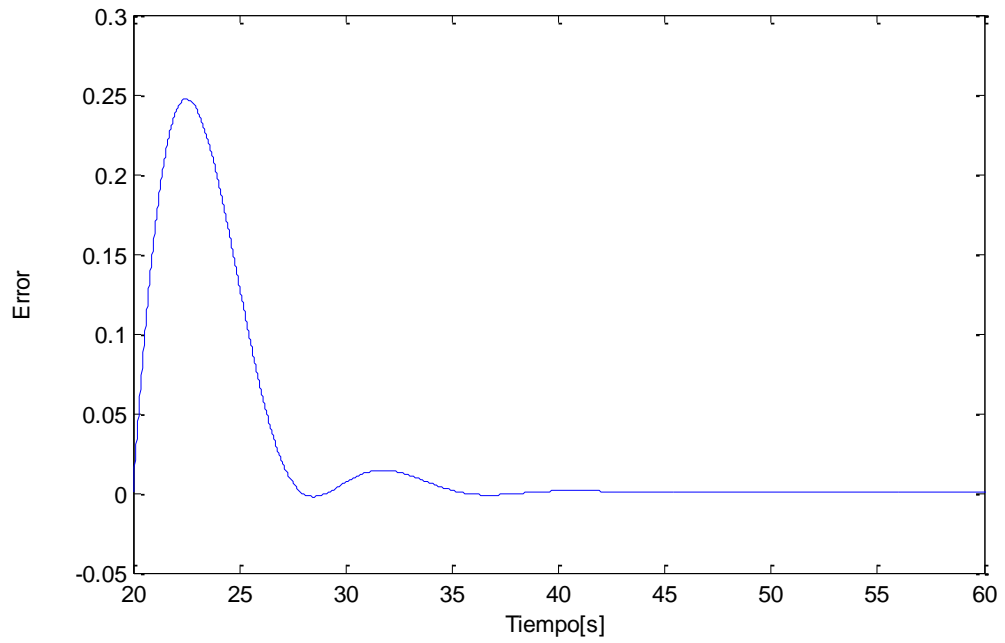
Figura 15. Gráfica del error de SMCPE después de la perturbación



Fuente: Autores.

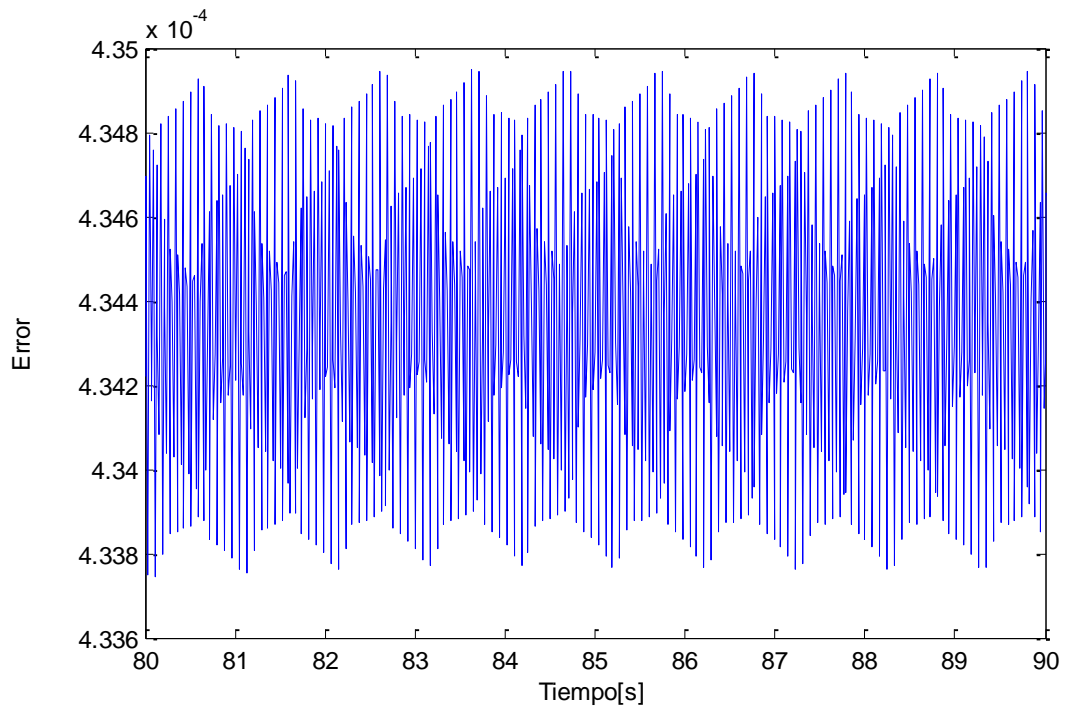
De modo similar, para la implementación del H^∞ encontramos que el error no se hace cero, figura 16. Ahora analizando la figura 17 se observa que el error en estado estacionario para el controlador H infinito no toma un valor constante pues oscila entre $4,337E-4$ a $4,35E-4$. Ya que la amplitud de estas oscilaciones no es considerable frente al valor medio de la señal, se asume que el error en estado estable se encuentra en la mitad de los límites de oscilación, $4,334E-4$.

Figura 16. Gráfica del error para H_∞



Fuente: Autores

Figura 17. Zoom de la gráfica del error para H_∞ .



Fuente: Autores

A continuación se muestran en la tabla los valores para el controlador SMCPE y H^∞ . Las gráficas presentadas se encuentran normalizadas para el valor obtenido con el controlador H infinito ante la máxima perturbación para cada caso.

Tabla 4. Índices de Desempeño para SMCPE

Controlador		SMCPE			
Punto de operación	IAE	IEC	ITAE	ITSE	Ts
Pload: 0 a 0.1	0.2021	1.8097E+00	6.8162	0.0613	28.0000
Pload: 0.4 a 0.5	0.0577	4.8866E-04	1.4672	0.0108	22.2450
Pload: 0.9 a 1	0.3193	4.7912E-03	10.4614	0.1533	22.4124
Pload: 0.1 a 0.5	0.1841	6.7230E-03	4.3254	0.1479	23.5402
Pload: 0.6 a 1	0.5271	1.9300E-02	15.2671	0.4893	29.2234
Pload: 0.3 a 0.5	0.1145	2.4068E-03	2.7393	0.0525	22.7631
Pload: 0.5 a 0.7	0.2096	3.0124E-03	6.1073	0.0751	22.9590
Pload: 0.2 a 0.8	0.4921	2.6300E-02	13.0951	0.6008	26.3666
Pload: 0 a 1	0.9023	7.3800E-02	25.3717	1.7316	30.0800

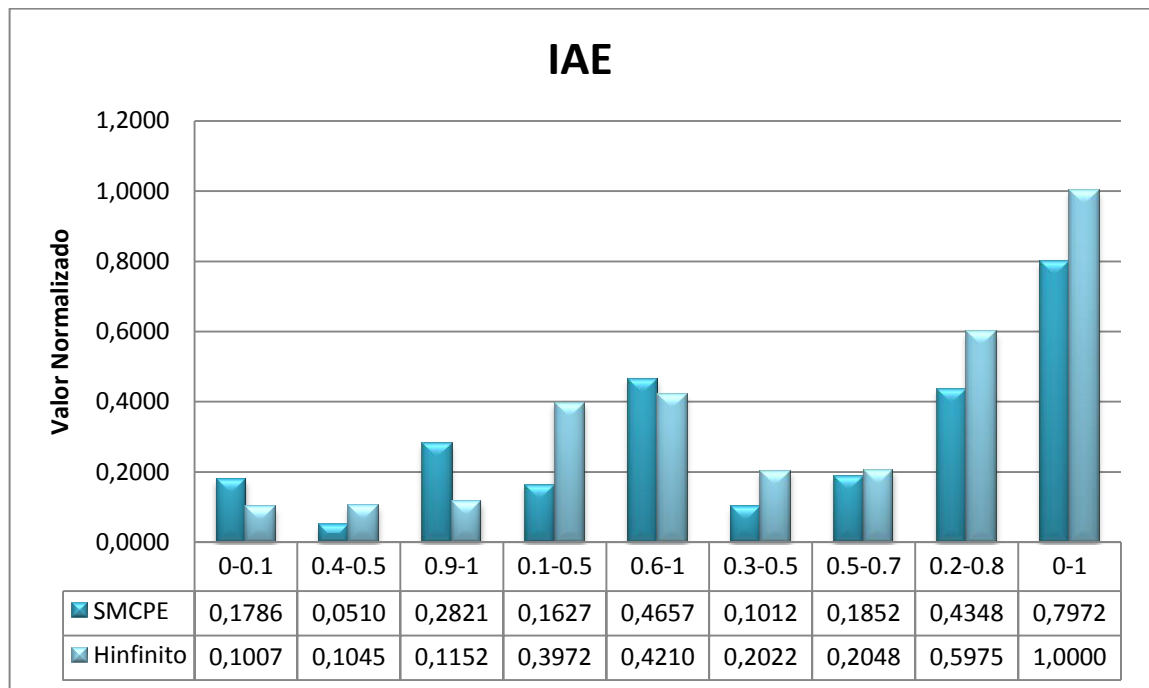
Fuente: Autores

Tabla 5. Índices de Desempeño para H^∞

Controlador		H^∞			
Punto de operación	IAE	IEC	ITAE	ITSE	Ts
Pload: 0 a 0.1	0.1140	1.8159E-03	2.7302	0.0415	23.4914
Pload: 0.4 a 0.5	0.1183	1.9959E-03	2.8452	0.0456	23.7080
Pload: 0.9 a 1	0.1304	2.5879E-03	3.1490	0.0592	24.2176
Pload: 0.1 a 0.5	0.4495	2.9900E-02	10.6784	0.6826	24.2176
Pload: 0.6 a 1	0.4765	3.6200E-02	11.3159	0.8293	26.0482
Pload: 0.3 a 0.5	0.2289	7.7161E-03	5.4566	0.1761	25.1633
Pload: 0.5 a 0.7	0.2318	8.2606E-03	5.5154	0.1885	25.2107
Pload: 0.2 a 0.8	0.6763	7.1300E-02	15.9904	1.6302	26.6185
Pload: 0 a 1	1.1318	2.0150E-01	26.7774	4.6174	26.9985

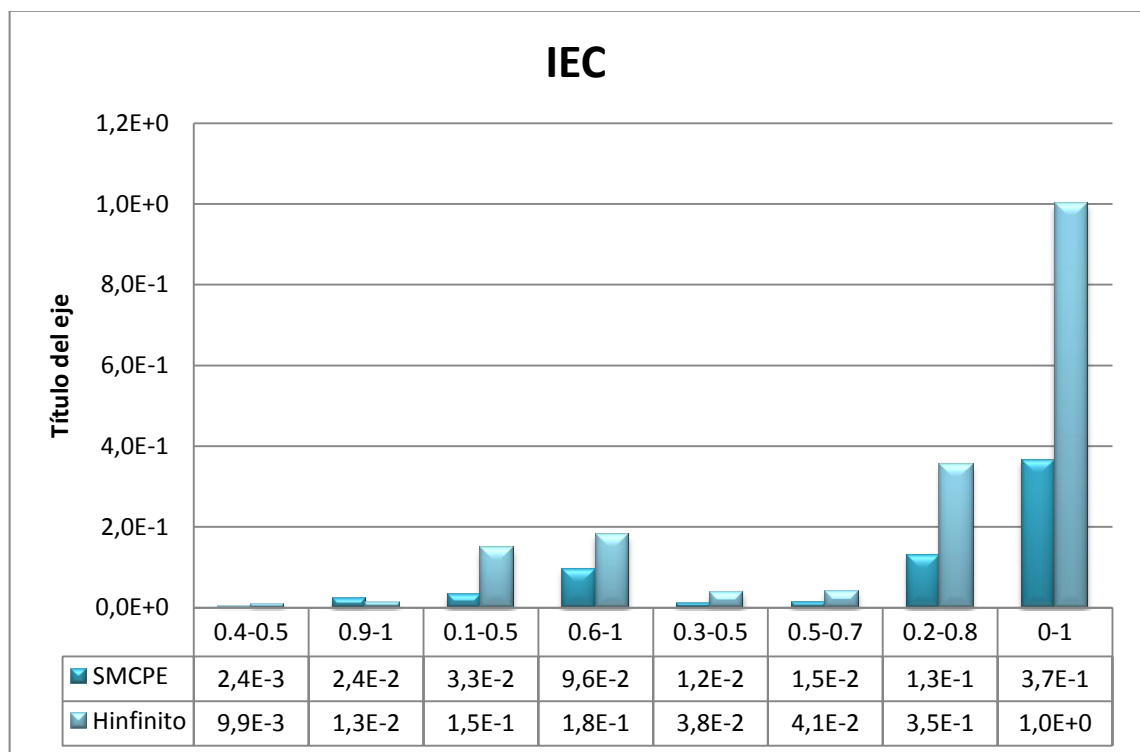
Fuente: Autores

Tabla 6. Índice del error absoluto



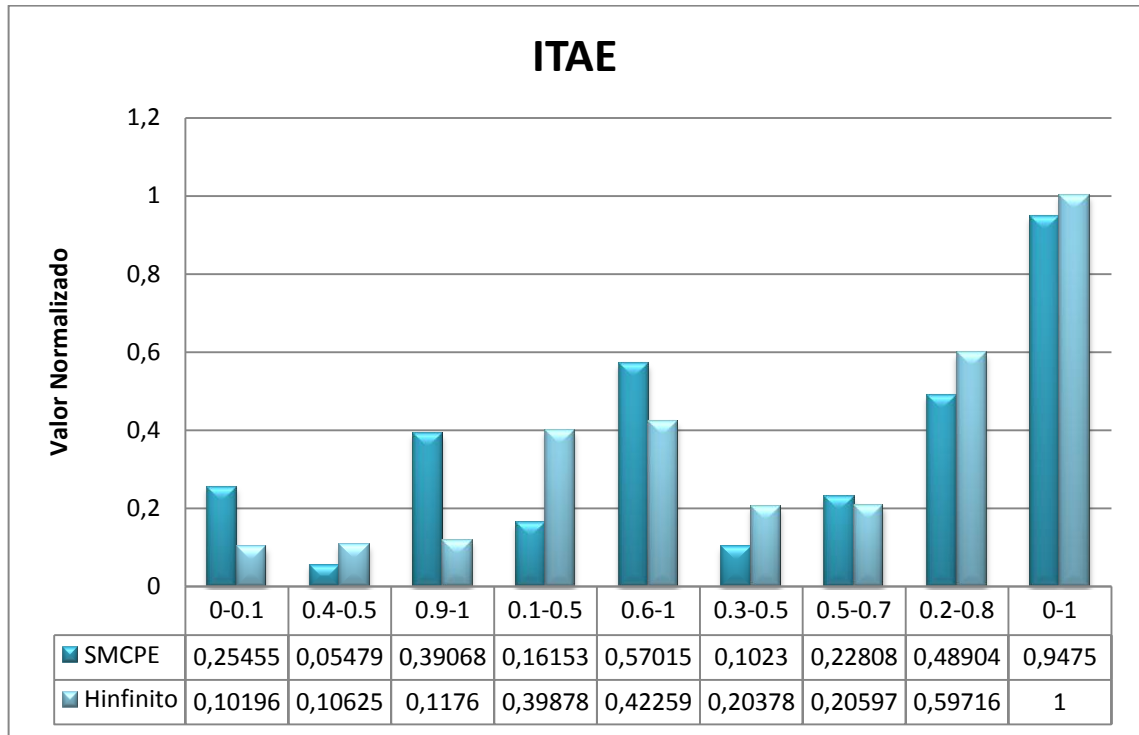
Fuente: Autores

Tabla 7. Integral del error cuadrático



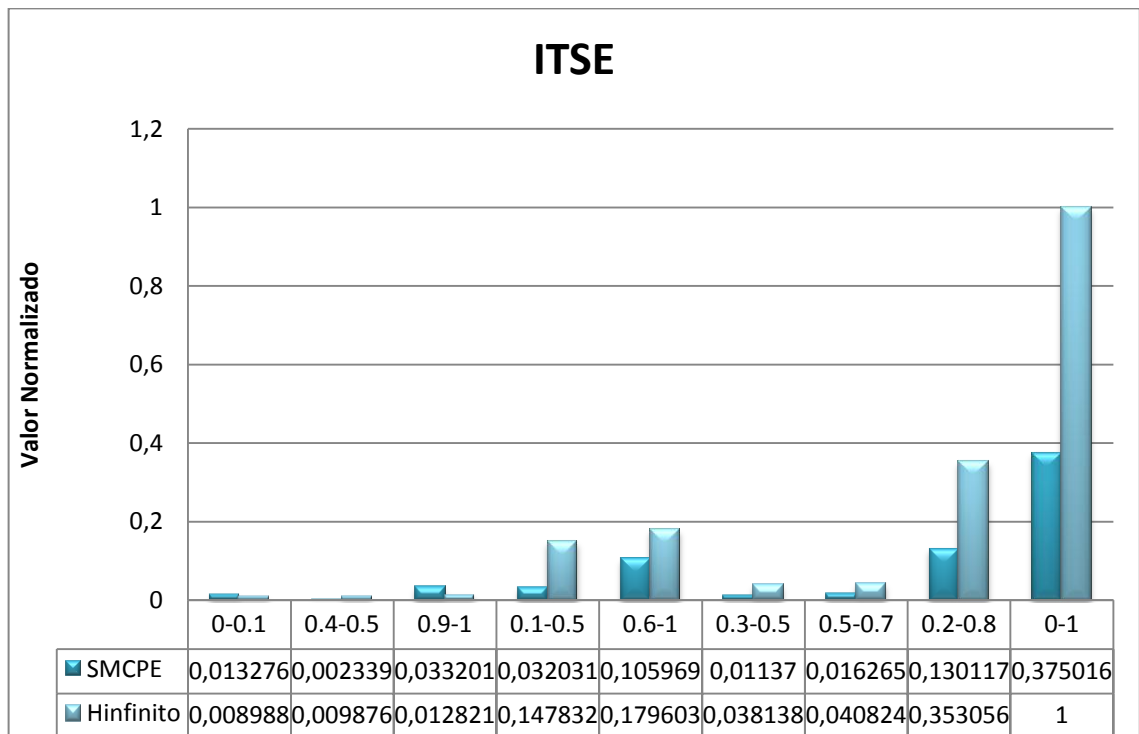
Fuente: Autores

Tabla 8. Integral del valor absoluto del error ponderado



Fuente: Autores

Tabla 9. Integral del cuadrado del error ponderado en el tiempo.



Fuente: Autores

Al observar detalladamente las tablas con los parámetros de desempeño se encuentran patrones de comportamiento para ambos controladores. El SMCPE trabaja de forma eficiente en rangos medios de potencia de carga. Para los extremos, (0-0,1 o 0,9-1 [p.u.]), el despreciar términos importantes como el mínimo flujo requerido para generar potencia, y en especial el, comportamiento de la velocidad del agua para estado estable, no permiten que el modelo del controlador encuentre un punto de equilibrio, por lo cual la acción de control es oscilatoria. Entre mayor sea la descompensación debido a los parámetros no modelados, mayor será la amplitud de la señal. Esto se demuestra en las tablas 6 a 9, donde el control H_{∞} es mejor que el SMCPE para estos casos específicos (el intervalo [0-0,1] correspondiente a las dinámicas no modeladas y el intervalo [0,9-1] correspondiente al punto de operación para el cual fue diseñado el controlador H infinito). Para la tabla 7 se despreció el valor normalizado en el intervalo de 0-0,1 [p.u.] ya que por su magnitud, modifica la escala y no permite visualizar los demás intervalos.

Respecto a los parámetros de desempeño, tabla 4 y tabla 5, se observa que tanto el ISE como el ITSE presentan una variación muy pequeña frente a los otros índices de desempeño, dado que al depender del cuadrado de la señal de error, cuando ésta es trabajada en valores por unidad, reduce su utilidad ampliamente. El ITAE al medir la influencia del error en tiempos muy grandes, crece de manera más significativa que el resto de los indicadores, lo cual puede ser explicado por la acumulación del error en estado estable para ambos controladores. El IAE se comporta de acuerdo con la magnitud del error ante el cambio de perturbación, por lo cual el obtenido para el controlador SMCPE varía en gran medida frente al obtenido para el controlador H infinito.

5. EMULACIÓN HARDWARE-SOFTWARE

En este capítulo se describe la forma como se realizaron las pruebas para verificar en tiempo real el desempeño robusto del controlador diseñado con la técnica SMCPE. Se reportan las pruebas realizadas con el objetivo de verificar la velocidad apropiada del algoritmo dentro del microcontrolador y el desempeño del controlador SMCPE al variar la perturbación (demanda de potencia).

Primero se reportan las pruebas realizadas con el microcontrolador a fin de estimar el tiempo requerido para cumplir la rutina de control. Las formas de onda obtenidas para diversas señales se presentan para mostrar el correcto desempeño de la rutina. Luego se muestra un esquema representativo de la transmisión de los datos, los instrumentos utilizados y la distribución de las señales mediante los canales físicos responsables. Finalmente, se realiza un análisis del comportamiento del controlador en tiempo real al comparar los resultados obtenidos en la emulación con los resultados obtenidos para simulación para intervalos de demanda de potencia equivalentes.

5.1 IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DE CONTROL

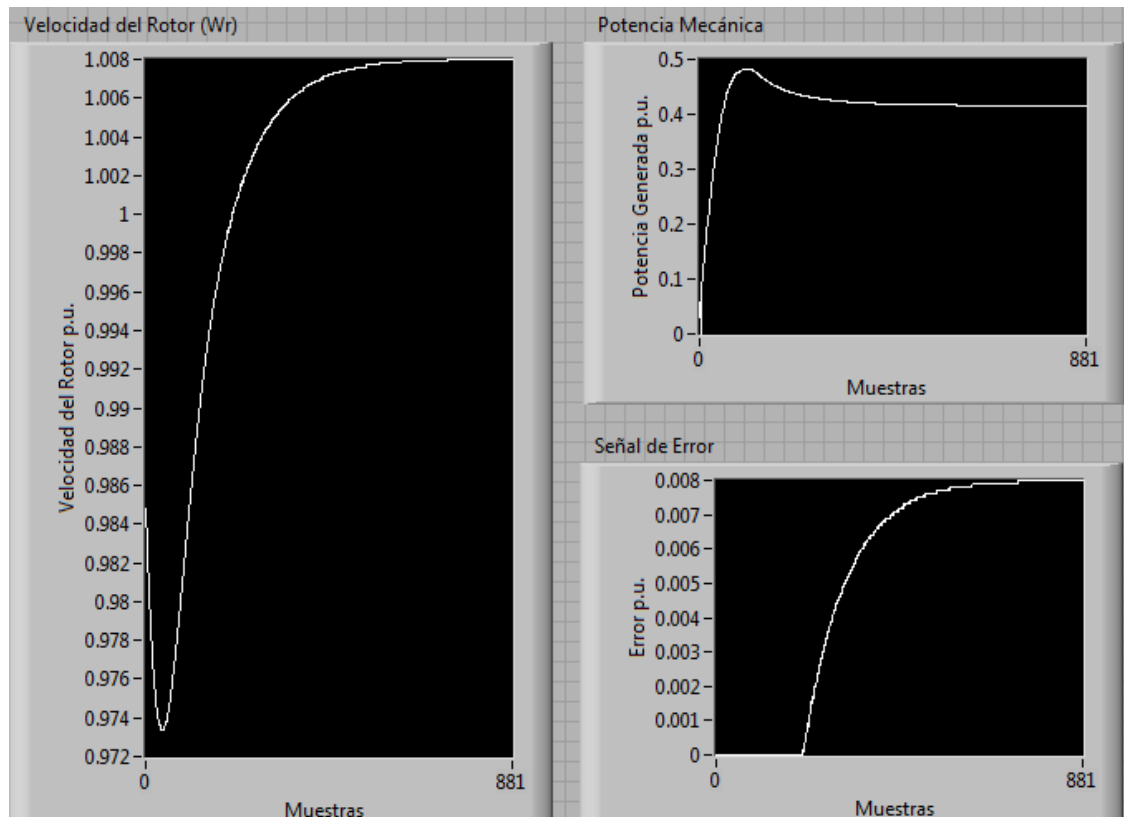
Para poder emular el comportamiento del sistema de control completo (planta con controlador), es necesario discretizar las ecuaciones que modelan de la dinámica de la planta y el controlador (ver Anexo B).

Luego de esto se programa en el microcontrolador el algoritmo de control junto a la representación discreta de la planta no lineal, para emular el comportamiento del sistema mediante una plataforma de hardware, comprobando la velocidad de respuesta de dicha solución y observando el comportamiento de las variables mediante depuración con la ayuda del software CodeWarrior y la tarjeta de desarrollo DEMOQE de la empresa Freescale. Los datos de la velocidad del rotor, potencia mecánica generada y la señal de error se transmiten por protocolo serial a una interfaz de LabView.

Tanto las funciones utilizadas para la transferencia de datos mediante protocolo serial como el algoritmo de programación del microcontrolador son explicados en el Anexo B. La forma de programar el protocolo serial en LabView se explica en el Anexo A.

Para complementar el análisis realizado durante esta prueba, las señales de error, velocidad del rotor y potencia mecánica se muestran a continuación como son vistas en la interfaz de LabView.

Figura 18. Interfaz de LabView para recibir la señales de error, velocidad del rotor y potencia mecánica transmitida por el microcontrolador.



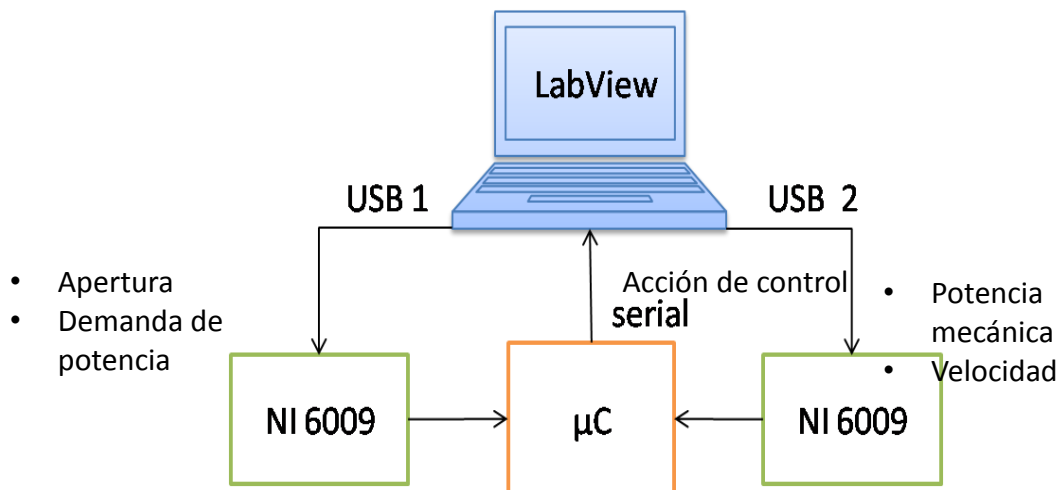
Fuente: Autores del proyecto.

Como puede observarse en la figura 18 el comportamiento de las señales es bastante similar al obtenido durante la prueba en simulink (figura 14). Un error en estado estacionario está presente para la señal de velocidad a causa de la aproximación del comportamiento discreto de la planta y de las dinámicas no modeladas. En esta prueba se obtuvo un error en estado estable de 0,8%, y un sobrepaso máximo de 3,7%, cuando la demanda de potencia es de 0,4 [p.u].

5.2 COMUNICACIÓN ENTRE EL MICROCONTROLADOR Y LABVIEW

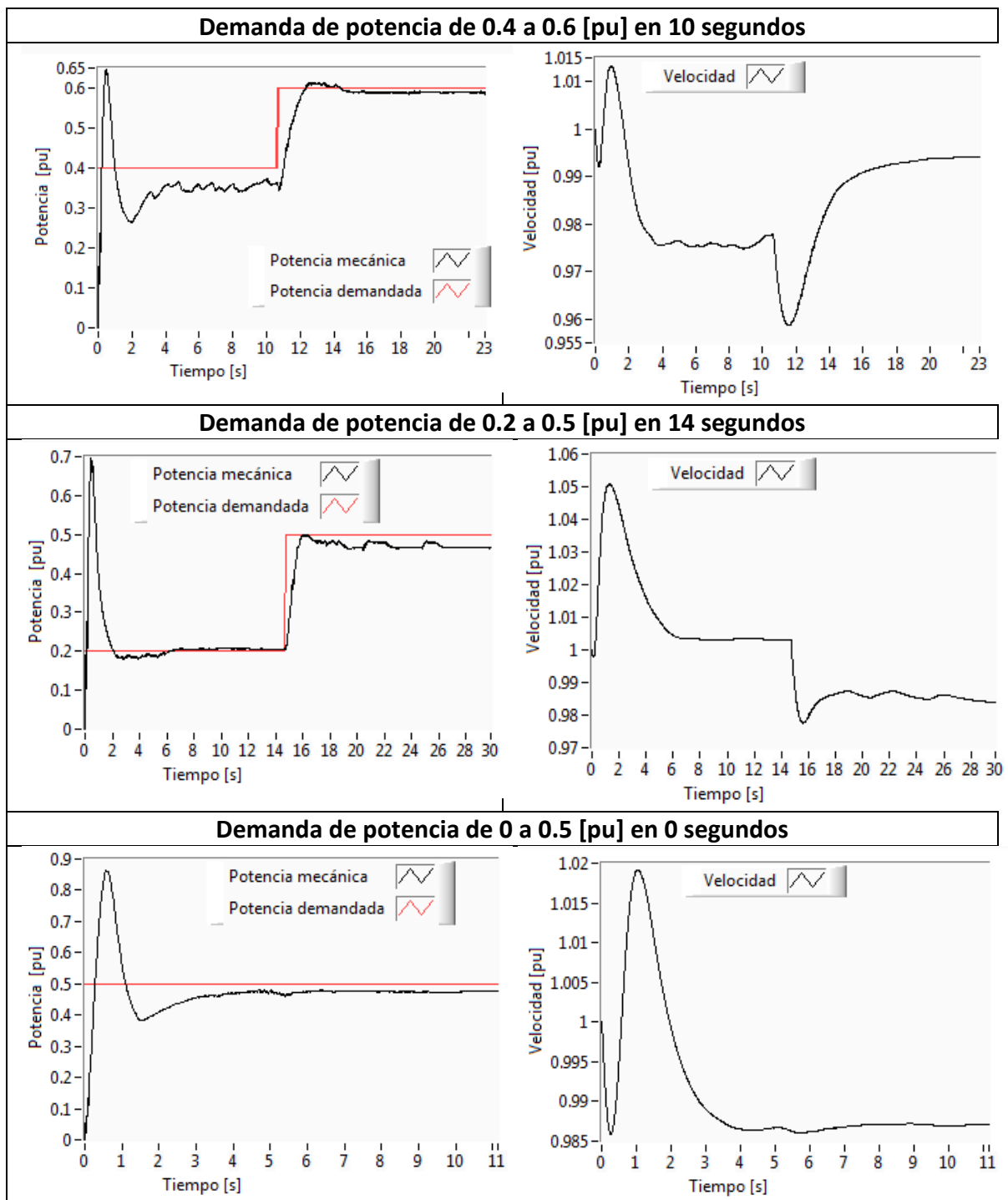
Se procede a comunicar la señal de control a LabView mediante una transmisión de datos serial, mientras se utilizan dos tarjetas de adquisición de datos NI USB-6009 para generar señales de tensión que transmiten los estados de la planta y la demanda de carga. Las señales de tensión generadas por las tarjetas de adquisición son leídas mediante un conversor analógico-digital. El esquema general de comunicación se muestra en la figura 19.

Figura 19. Esquema general de la comunicación entre LabView y el microcontrolador



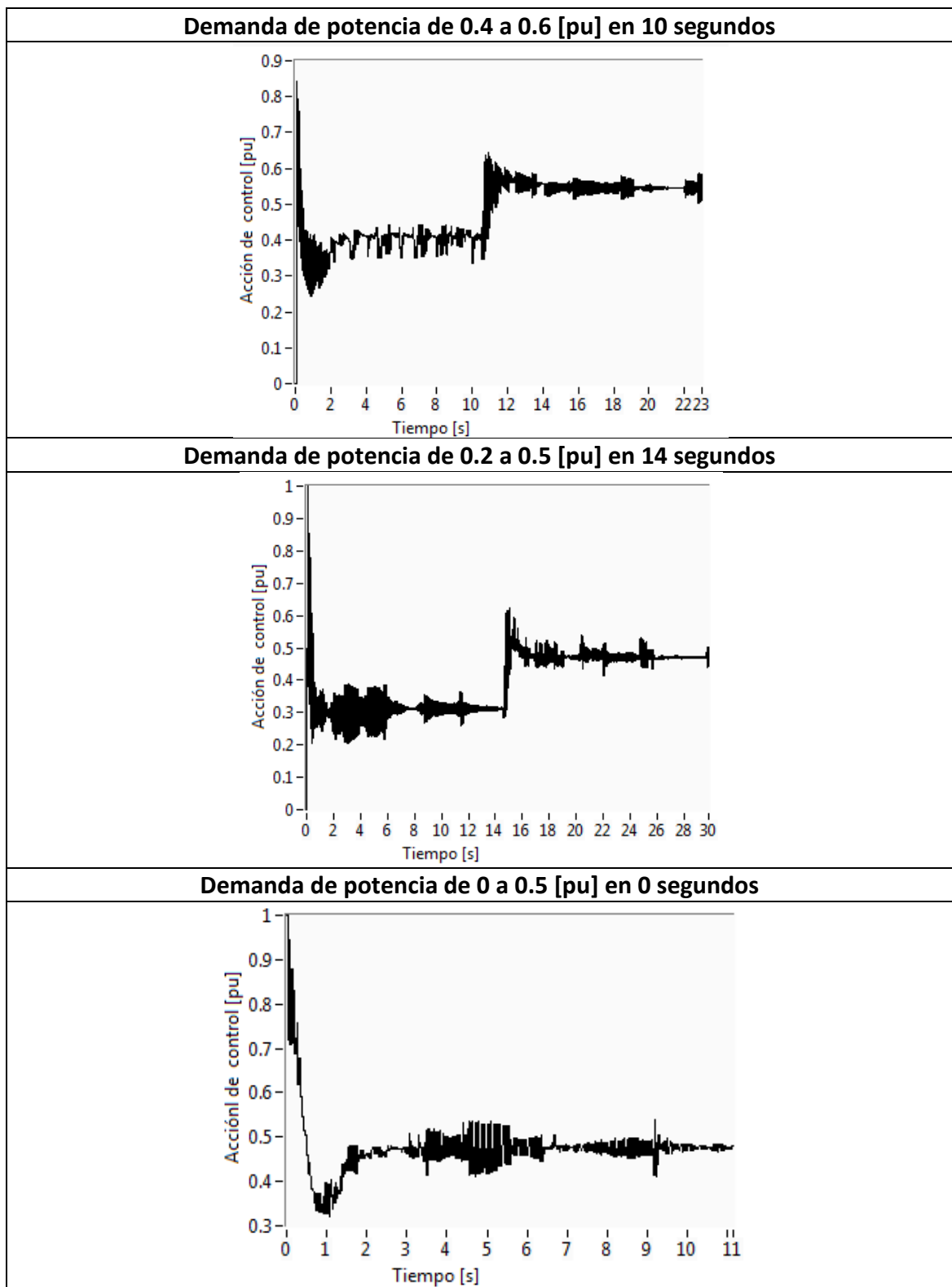
Fuente: Autores

Figura 20. Potencia mecánica y velocidad del rotor para diversas demandas de potencia obtenidas en la emulación



Fuente: Autores

Figura 21. Acción de control para diversas demandas de potencia en emulación



Fuente: Autores

Los resultados obtenidos mediante la emulación en tiempo real para diversas demandas de potencia se observan en la figura 20 y figura 21.

Para la emulación, el sistema parte de condiciones nulas de carga y debe ajustarse al primer valor del intervalo. El tiempo de asentamiento para cualquier cambio en el intervalo de condiciones críticas¹¹ está limitado por el polo elegido para la variable S (2.7).

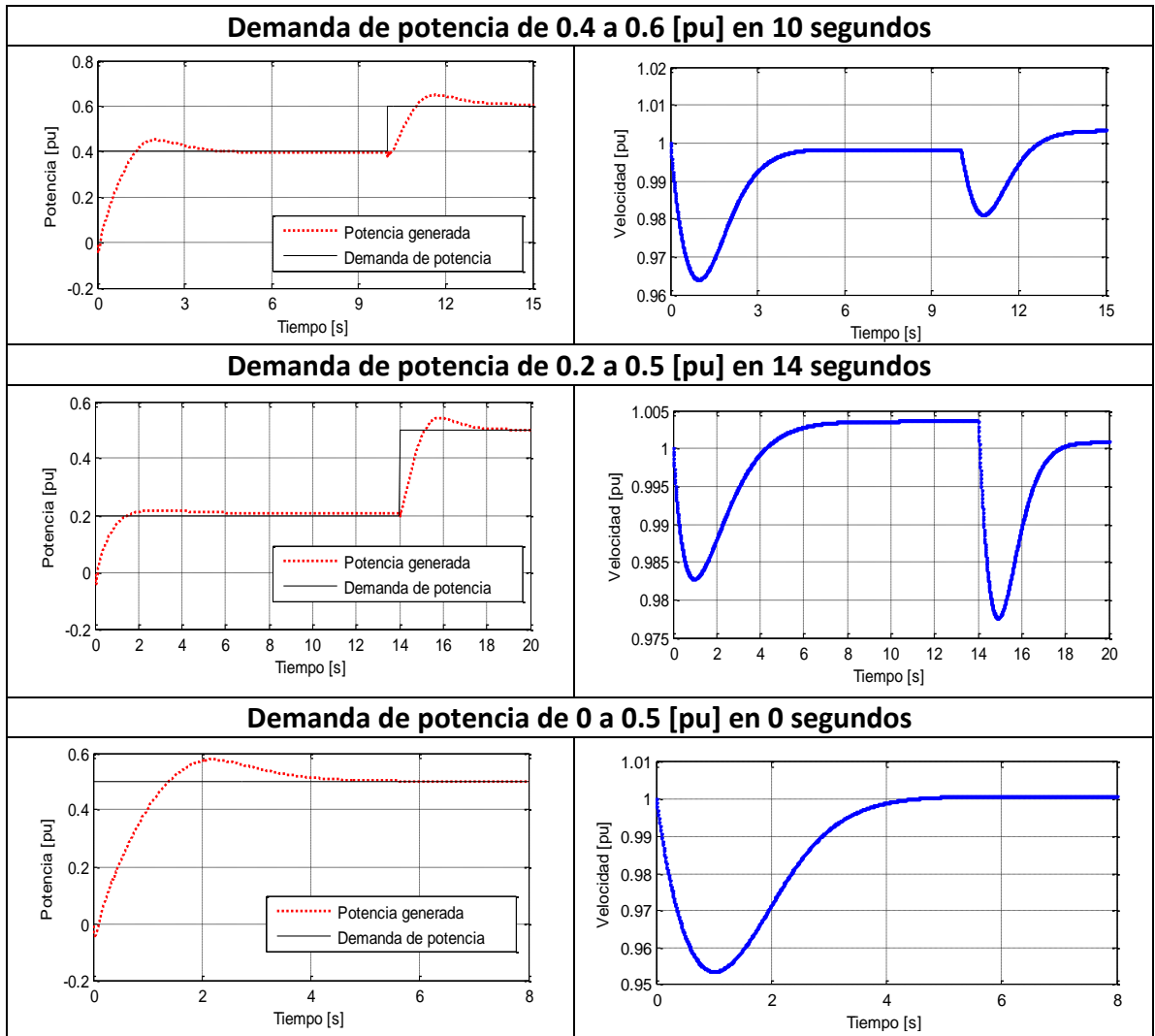
Para el primer caso de la figura 20 el cambio de carga ocurre alrededor de los 10 segundos, tiempo en el cual la planta ya ha alcanzado la estabilidad para el primer cambio de potencia demandada (0 a 0,4 [p.u.]). El cambio brusco en la perturbación genera una acción de control que cambia en gran medida alrededor de los mismos 10 segundos, tal como se puede observar en el primer caso de la figura 21. El rizado en la acción de control es la respuesta al ruido de conversión de elementos de hardware como lo son las tarjetas de adquisición y el periférico de conversión analógica-digital, el cual se presenta en todos los casos analizados.

La figura 22 muestra los resultados obtenidos en simulación para las mismas variaciones de carga que las mostradas en la figura 21. La forma de onda, los tiempos de asentamiento y los errores en estado estable se comportan de forma similar en ambos casos. La única diferencia visible corresponde a la aparición del ruido mencionado anteriormente.

Finalmente se muestra el resultado obtenido para la condición de cambio crítica para demanda de potencia, la cual se toma como prueba final para determinar el funcionamiento del controlador. Como en los casos anteriores, el controlador se comporta de forma satisfactoria ya que no sobrepasa un error de 2% del valor. Los resultados se muestran en la figura 23.

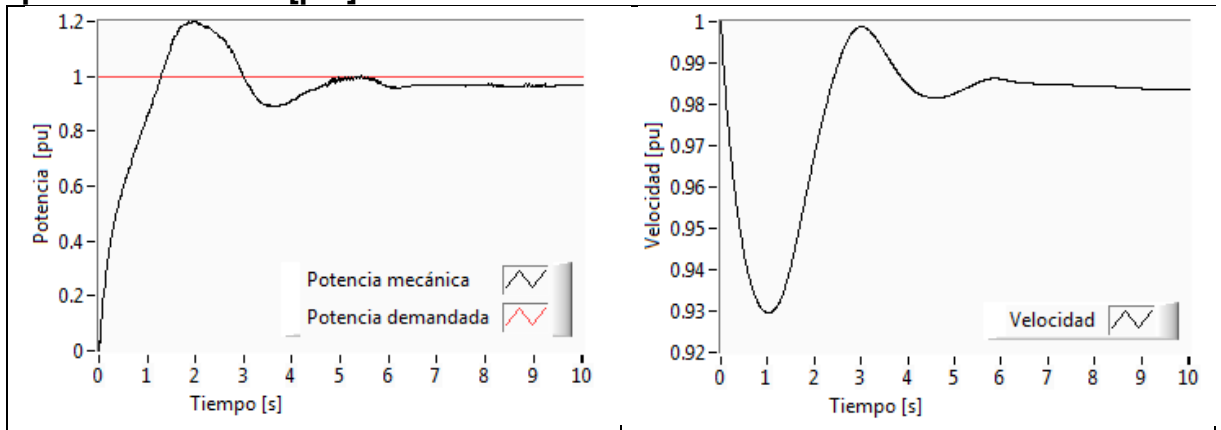
¹¹ Para la operación de la hidroeléctrica se asumen condiciones críticas el cambio de potencia demandada de entre 0 y 1 [p.u].

Figura 22: Potencia mecánica y velocidad del rotor para diversas demandas de potencia obtenidas en simulación



Fuente: Autores

Figura 23: Potencia mecánica y velocidad del rotor para una demanda de potencia de 0 a 1 [p.u]



Fuente: Autores

6. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

La elección de un modelo con dinámica no lineal para la turbina generó dificultades para expresar el sistema en la forma canónica requerida para la aplicación del método de diseño. Alternativas a la representación convencional como lo son el uso de propiedades de realimentación y el análisis del efecto de zonas muertas y no linealidades sobre la salida fueron investigadas y discutidas. Se optó por simplificar el modelo de la turbina obteniendo la forma canónica requerida y verificando el correcto funcionamiento del controlador para el modelo real.

El desempeño del controlador SMCPE frente al controlador H infinito fue medido mediante indicadores de rendimiento comúnmente usados en la evaluación de controladores. A modo de facilitar el análisis de estos indicadores cada resultado fue normalizado con respecto al valor del controlador H infinito en el intervalo crítico. Los datos son presentados mediante gráficos de barras realizando el paralelo de los valores de ambos controladores para cada indicador.

La validación del controlador se realizó mediante la emulación en tiempo real de la planta y el controlador en una plataforma hardware-software. El funcionamiento del controlador implementado en hardware fue revisado de forma previa a la prueba del sistema completo, mientras la interfaz en LabView proveyó instrumentos virtuales para la adquisición de datos, facilitando la comunicación entre componentes. Controles de demanda de potencia, gráficas e indicadores numéricos de la potencia generada y la velocidad del rotor conforman la interfaz final. Finalmente, se seleccionaron diversas pruebas ante variaciones de demanda de potencia obteniendo resultados satisfactorios.

Bases teóricas para el uso de la estimación de la perturbación expuestas en el presente trabajo dan un punto de partida al estudio de sistemas de parámetros inciertos o condiciones de trabajo variables.

La plataforma hardware-software y el algoritmo de control utilizados pueden ser adaptados fácilmente a plantas similares con solo modificar la declaración de los parámetros constitutivos en cada caso.

La implementación presenta errores y oscilaciones indeseadas en las señales de salida (frecuencia y potencia generada), además de un error por fuera de las especificaciones en estado estable. Dichos cambios se presentan ya que las tarjetas utilizadas para generar las señales de estado tienen variaciones respecto a la tensión generada. Se recomienda mejorar la gama de las tarjetas usadas para la generación de señales con el fin de reducir los efectos nocivos. Es también importante notar que el controlador en modo deslizante con estimación de la perturbación presenta un comportamiento asintótico frente al error, por lo cual este nunca llegará a ser nulo.

La expansión del algoritmo de control para considerar el efecto de almenaras y múltiples turbinas para una misma tubería son consideraciones atractivas para la continuación de esta investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] QUIROGA, O. Modelling and nonlinear control of voltage frequency of hydroelectric power plants. Tesis doctoral dirigida por Jordi Riera Colomer y Carles Batlle Arnau. Universidad Politécnica de Catalunya, 2000.
- [2] KUNDUR, Prabha. Power System Stability and Control. McGraw Hill, New York. 1994.
- [3] QUIROGA, Oscar Daniel, RIERA, J. Modelos para el control de grupos hidroeléctricos. Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación. (SAAE199). Septiembre 1999.
- [4] STRAH B., KULJACA O. y VUKIC Z. Speed and Active Power Control of Hydro Turbine Unit. IEEE Transactions on energy conversion, vol. 20, Nº2, Junio 2005.
- [5] ELMALI, H., Y OLGAC, N., 1992. Sliding mode control with perturbation estimation (SMSPE): a new approach. International Journal of Control. 56. 923-954.
- [6] Garelli, F. Sistemas de Estructura Variable: Aplicación al Control Multivariable con restricciones. Tesis doctoral dirigida por Ricardo J. Mantz. Universidad Nacional de la Plata, Argentina. Capitulo 3. 2007.
- [7] DODDS, S.J, Bang-Bang Control Law for Single-Input Time-Invariant Plant. En Control Theory and Applications, IEE Proceedings D. 128, Issue: 5. 1981, p 227-232.

- [8] UTKIN, V. Y H. LEE. Chattering Problem in Sliding Mode Control Systems. En Proceedings of the 2006 International Workshop on Variable Structure Systems.VSS'06. p 346–350. IEEE-CSS (2006).
- [9] VALENCIAGA, F. Control de Estructura Variable en Sistemas Híbridos de Generación de Energía. Tesis de Doctorado dirigida por Pedro Eduardo Battaiotto. Argentina, Universidad Nacional de la Plata. Capitulo 5 p 1-12.
- [10] ŠITUM, ŽELJKO; PETRIĆ, JOŠKO AND CRNEKOVIĆ, MLADEN. Sliding Mode Control Applied to Pneumatic Servo Drive. En The Mediterranean Conference on Control & Automation (11:18-20, Junio. Rhodes, Grecia). Universidad de Zagreb, p1-3. Disponible en Internet: <http://www.med.ee.nd.edu/MED11/pdf/papers/t1-009.pdf>.
- [11] YOUCEF-TOUMI, K, 1990, A time delay controller for systems with unknown dynamics. Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers, Ser. G Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control.112. 133-142.
- [12] ELMALI, H. OLGAC, N. Satellite attitude control via sliding mode with perturbation estimation. Control Theory and Applications, IEE Proceedings. Vol 143 Issue 3. Page 276.
- [13] KOU-CHENG, Hsu. WEI-YEN, Wang. PING-ZONG, Lin. Sliding mode control for uncertain nonlinear systems with multiple inputs containing sector nonlinearities and deadzones. Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions. Feb. 2004 Volume 34 , Issue 1, Page 374.

[14] SIRA-RAMÍREZ, Hebertt, A General Canonical Form for Sliding Mode Control of Nonlinear Systems. Lecture Notes in Control and Information Sciences. Vol 247. 1999. p 123-142. DOI: 10.1007/BFb0109974.

[15] CARREÑO, J. Herramienta Software para el Diseño Automático de Controladores para Micro y Pequeñas Centrales Hidroeléctricas. Tesis de Pregrado, Ingeniero Electrónico, dirigido por Rodolfo Villamizar Mejía. Colombia, Universidad Industrial de Santander. 2008. p 35-56.

[16] ALFARO, V. Métodos de Sintonización de Controladores PID que Operan como Reguladores. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, Instituto de Investigaciones en Ingeniería. Proyecto No. 731-A0-169, duración: 01.Ago.2000 al 30.Dic.2002

[17] SMITH, C; CORRIPIO, A. "Principles and Practice of Automatic Process Control". Segunda edición. John Wiley & Sons Inc. New York. 1997. P 321-323.

[18] RAMEY, D.G.; SKOOG LUND, J.W. Detailed Hydrogovernor Representation for System Stability Studies. En Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on. Enero 1970 PAS-89 Tema :1.p 106 – 112.

ANEXOS

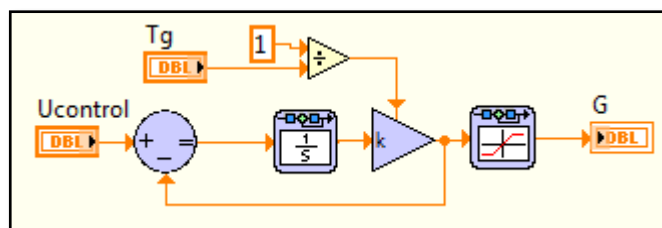
Anexo A

INTERFAZ GRAFICA EN LABVIEW

Con la ayuda del software LabView se modelaron las tres partes principales de la planta: la compuerta, la turbina y el generador. La estructura elegida para realizar la emulación de la planta fue el lazo de simulación del módulo *Control Design and Simulation* ya que soporta funciones lineales y no lineales como lo son funciones de transferencia o saturadores.

La figura A 1 muestra el modelo de la compuerta para la cual se utiliza un saturador que limita los límites físicos de operación. El límite inferior es considerado de 0,1 [p.u], puesto que para un valor nulo se presenta una indeterminación. El límite superior es tomado como el máximo valor de apertura posible 1[p.u].

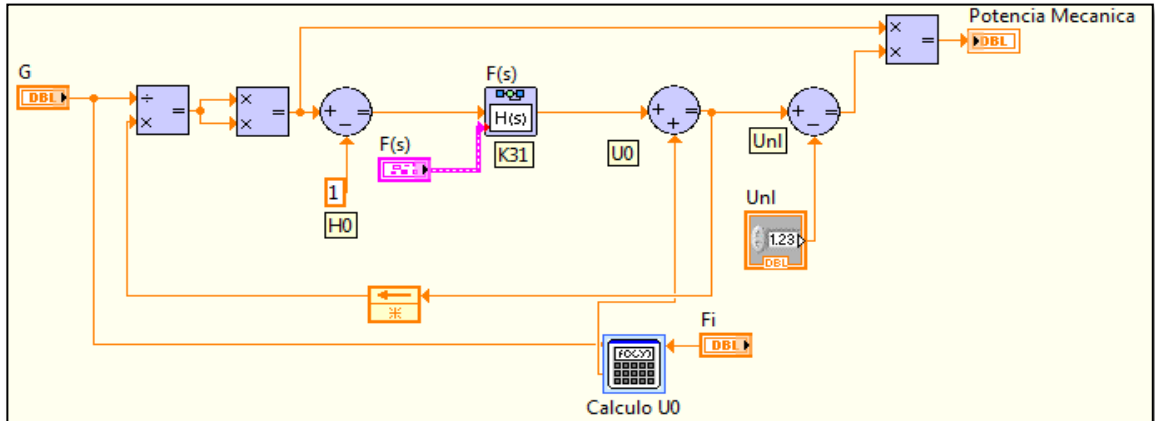
Figura A 1. Diagrama de bloque para el modelo de la dinámica de la compuerta en LabView.



Fuente: Autores

La Figura A 2 muestra el modelo no lineal planteado por Kundur [2], donde la función de transferencia $F(s)$ es la aproximación de primer orden para la tangente hiperbólica. Ya que U_0 es variable pues depende de la apertura y el coeficiente de rozamiento, se hace uso del bloque *Formula Express* para realizar los cálculos.

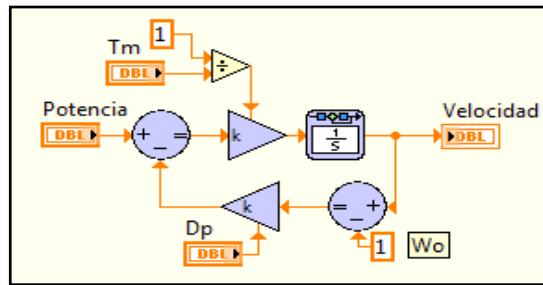
Figura A 2. Diagrama de bloques para el modelo de la turbina en LabView.



Fuente: Autores

El modelo del generador, figura A. 3, se da en forma de ganancias e integradores con el fin de poder establecer la condición inicial de la velocidad.

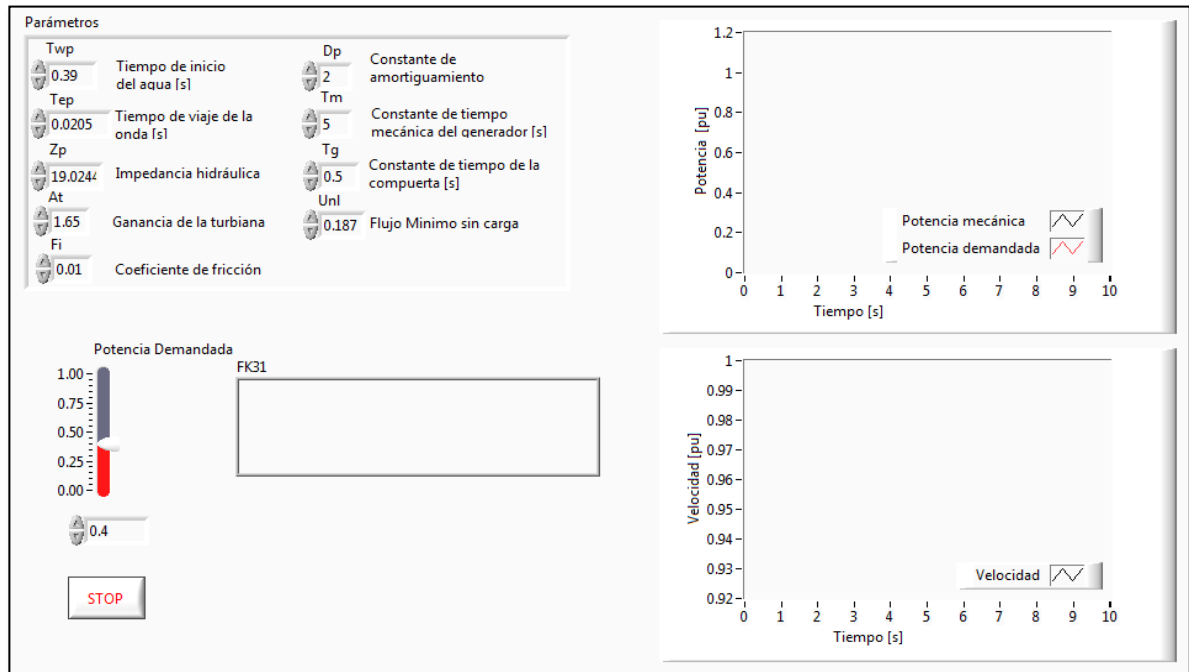
Figura A 3. Diagrama de bloque para el modelo de la dinámica del generador en LabView.



Fuente: Autores

Finalmente la interfaz diseñada en donde se ingresan los parámetros que caracterizan a la central hidroeléctrica, varía la demanda de potencia y visualiza la potencia mecánica y velocidad se presenta a continuación.

Figura A 4. Interfaz gráfica en LabView

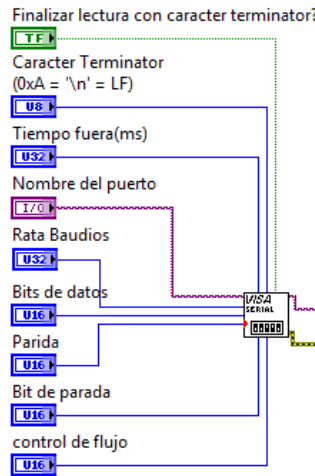


Fuente: Autores

LECTURA DEL PUERTO SERIAL LABVIEW CON UN MICROCONTROLADOR

Para dispositivos que utilicen comunicación serial al computador es necesario utilizar los controladores NI VISA en LabView. De forma inicial se configuran parámetros de transferencia de datos mediante el bloque *VISA configure serial port*. La tasa de baudios con la cual se transmite, el puerto por el cual se reciben los datos entre otras características son configuradas de esta forma, figura A 5.

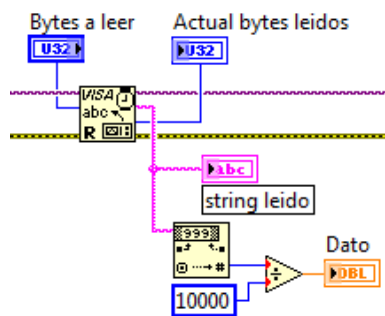
Figura A 5. VISA Configure Serial Port.



Fuente: Autores

Después de inicializar los parámetros de la sesión VISA, se configura el tamaño del buffer de entrada utilizando el bloque *VISA Set I/O Buffer SizeFunction*. Una vez realizado lo anterior, se continúa con la configuración de la lectura usando *VISA Read*.

Figura A 6. VISA Read



Fuente: Autores

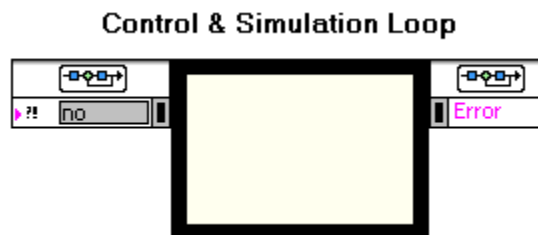
El tamaño del buffer para la recepción de datos debe ser especificado como se observa en la Figura A 6, ya que es útil para determinar y eliminar datos transmitidos de forma errónea.

Para la aplicación requerida en este proyecto, se envía del microcontrolador un número que representa la acción de control amplificada en diez mil. Puesto que el envío de datos mediante protocolo serial se realiza en base ASCII, es necesario convertir los datos en formato *string* utilizando la función *Decimal StringToNumber* y dividir por diez mil. Por último, se debe cerrar la sesión VISA, lo cual libera la exclusividad del puerto serial, permitiendo su uso en aplicaciones posteriores, para esto se utiliza el bloque *VISA close*.

CONFIGURACIÓN DE SIMULACIÓN EN LABVIEW PARA TIEMPO REAL

Al ser necesaria la emulación del comportamiento en tiempo real de la planta, se configura el lazo de simulación del módulo *Control Design & Simulation*, conocido como *Control & Simulation Loop*.

Figura A 7. Lazo de simulación y control observado desde el diagrama de bloques en Labview.



Fuente: Autores.

Esta herramienta permite ejecutar un lazo de simulación junto con funciones especiales del módulo de simulación y control, emulando las acciones que ocurren dentro del mismo en un tiempo especificado. Se hace necesario sincronizar el funcionamiento con un reloj de tiempo real, al modificar las opciones de tamaño de paso y ajustar las opciones de sincronización como es visto en la Figura A-8.

Figura A-8. Configuración de las opciones de paso

The screenshot shows a configuration panel titled "Continuous Time Step and Tolerance". It contains five spinners for numerical values:

- Initial Step Size (s): 0,01
- Minimum Step Size (s): 0,01
- Maximum Step Size (s): 0,01
- Relative Tolerance: 0,001
- Absolute Tolerance: 1E-7

Fuente: Autores.

La figura a-8 muestra que la configuración del lazo de simulación paso de emulación de 0,01 [s] y el ajuste del reloj de sincronización de 1 [kHz] cada 10 periodos (equivalente a generar una señal cada 0,01 [s]).

Figura A-9. Configuración de las opciones de sincronización.

The screenshot shows a configuration panel titled "Enable Synchronized Timing". It includes the following settings:

- Synchronize Loop to Timing Source
- Timing Source**
 - Source type: 1 kHz Clock (selected from a list including 1 MHz Clock, 1 kHz <reset at structure start>, 1 MHz <reset at structure start>, Synchronize to Scan Engine, and Other defined by source name attributes)
 - Source: 1 kHz
- Loop Timing Attributes**
 - Period: 10
 - Offset / Phase: 0
 - Deadline: -1
 - Auto Period
 - Priority: 100
 - Timeout (ms): -1

Fuente: Autores.

Anexo B

PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR MCF51QE128

Durante este anexo se tratan las opciones de configuración del microcontrolador utilizado en la verificación del comportamiento dinámico del controlador. El código de programación se adjunta con la explicación de cada función.

Se usa el método *Measure* habilitado mediante *ProcessorExpert* el cual permite tomar una muestra de todos los canales configurados para dicho módulo. Esta función espera a la finalización de la conversión para todos los canales del periférico.

De forma siguiente se llama al método *GetValue*, el cual es utilizado para crear un apuntador que guarda el valor de la conversión para todos los canales.

Las mediciones de todos los canales se escalan para limitar el rango lógico de valores que pueden tomar los estados. En este caso se restringe el valor de apertura de la compuerta, al igual que la potencia de la carga a 1 [p.u], mientras la potencia generada y la velocidad del rotor se limitan a 1,2 [p.u].

Las derivadas numéricas para cada uno de los estados del controlador, son obtenidas mediante ecuaciones discretas que representan el comportamiento del modelo de planta lineal utilizado para realizar las pruebas.

Se computan f y B como funciones de las derivadas numéricas de la velocidad del rotor tal y como son expresadas las funciones del error y sus derivadas.

Las variables intermedias s , XI , Φ_{est} , ϵ y K_{max} son obtenidas al computar las variables de estado medidas de la planta. La lógica de control SMCPE se calcula finalmente al integrar el efecto de cada variable intermedia mediante las ecuaciones anteriormente nombradas. La saturación de la compuerta se realiza al comparar el valor de la acción de control obtenida contra el valor máximo de 1 [p.u]. Las funciones de suavizado y valor absoluto requeridas por la ley de control son declaradas mediante comparadores.

Finalmente, una función *printfsi* es un compendio de métodos de cadena de caracteres como lo son *SendChar* y *Encontrar_longitud*, utilizadas para detectar cada uno de los datos de una cadena que deben ser enviados. Esta función soporta variables de tipo float ajustadas para enviar 5 dígitos mediante el puerto serial.

A continuación se describe las funciones usadas para imprimir una cadena de caracteres a partir de un número flotante.

```
int encontrar_longitud (int valor2) {  
  
    int temp, ind;  
    temp=valor2;  
    ind=1;  
    while (temp>=10){  
        temp=temp/10;  
        ind=ind+1;  
    }  
    return ind;  
}  
  
int potencia (int expo){  
    int i, pot;  
    pot=1;  
    for (i=1;i<=expo;i++) {  
        pot=pot*10;  
    }  
    return pot;  
}
```

La función “printfsf” permite la transferencia de datos mediante el puerto serial de valores numéricos. La trama enviada finaliza al recibir el caracter “%”. Para el caso analizado, un valor de 5 dígitos (valor de la acción de control escalada en 10000) es enviado cada trama. Es importante resaltar que la función “printfsf” llama la rutina “AS1_SendChar” cada vez que se calcule un caracter en código ASCII. El uso de esta función es exclusivo de *ProcessorExpert*.

```

int printfsf (constchar *plantilla, float valor){
    int x, k, m, ind2, e;
    int digito, pote, lc, cont;
    x=0;
    lc=strlen(plantilla);
    valor=valor*10000;
    valor=(unsignedlong)(valor);
    ind2=encontrar_longitud(valor);
    for(cont=0;cont<lc;cont++){

        if ( *(plantilla+cont) != 0x25){
            for (k=0;k<1000;k++){;}
            AS1_SendChar(*(plantilla+cont));

        }

        else {
            for (m=1;m<ind2+1;m++){
                e=ind2-m;
                pote= potencia (e);
                digito=valor/pote;
                AS1_SendChar((char) (digito+0x30));
                valor=valor-digito*pote;
                for (k=0;k<1000;k++){;}

            }

        }

    }

}

```

Finalmente, se presenta el código principal que permite la emulación del controlador y estimar el valor de los estados y sus derivadas.

```

for(;;) {
G_ka= G_k;
G_k= ((Ts*U_current)+(Tg*G_ka))/(Ts+Tg);// Dinámica de la
compuerta
P_ka= P_k;
P_k = ((Ts*G_k)-Twp*(G_k-G_ka)+((Twp*P_ka)/2))/(Ts+0.5*Twp);//
Turbina
Wr_ka2= Wr_ka;
Wr_ka= Wr_k;
Wr_k= (Ts*(P_k-Pload+D)+2*H*Wr_ka)/(2*H+Ts*D);// Dinámica del
generador

// Primera derivada de los estados de la planta
Gdot= (U_delayed-G_k)/Tg;
Pdot= (-P_k+G_k-Twp*Gdot)/(0.5*Twp);
Wrdot=(P_k-Pload-D*(Wr_k-1))/(2*H);
// Segunda derivada de los estados de la planta
G2dot= (-Gdot)/Tg;
    P2dot= (-Pdot+Gdot-Twp*G2dot)/(0.5*Twp);
    Wr2dot= (Pdot-Pload-D*Wrdot)/(2*H);
// Tercera derivada de la velocidad.
Wr3dot= (P2dot-Pload2dot-D*Wr2dot)/(2*H);
B=1/(H*Tg*Twp);// Calculo de B
// Se calcula por partes F para evitar perdida de datos
F1=Wr2dot*(H+(D*Tg)/2);
    F2=((D*Wrdot)/2)/(H*Tg);
    F3=-1*(D*(Wr_k-1));
    F4=(Wrdot*(2*H+D*Tg)+2*H*Tg*Wr2dot);
    F=-1*(F1+F2+F3+F4)/(H*Tg*Twp);
//cálculo de errores
    E=Wr_k-1;
Edot= Wrdot;
    E2dot= Wr2dot;
//Calcular S y XI
    S=4*E+4*Edot+E2dot;
    XI=4*Edot+4*E2dot;
//Estimación de la perturbación
Phi_est= (Wr3dot)-(F+B*U_delayed);

Kmax = eta*Phi_est;
Epsilon=Kmax/(Omega_max-P_SMC);

```

```

//Ley de control
    U1= P_SMC*S;
    U2= Kmax*1;
    U3= F+XI+Phi_est;
U_current=(U1+U2+U3)/(-1*B);

//Saturación para el U_current
if(U_current>1){
U_current= 1;
} else {
if(U_current<0){
U_current= 0;
}
}
U_delayed = U_current;
Wr_ka3 = Wr_ka2;
    Wr_ka2 = Wr_ka;
Wr_ka = Wr_k;
// Se envía la velocidad por el puerto serial
printfsf("%\n",Wr_k);
}

```

Anexo C

CÓDIGO PARA DISEÑAR EL CONTROLADOR POR H^∞

Este código fue desarrollado en el MATLAB, basados en los resultados de la tesis de “Herramienta Software Para El Diseño Automático De Controladores Para Micro Y Pequeñas Centrales Hidroeléctricas” creada por Jose Jorge Carreño [15].

```
%% Parámetrosplanta St Lawrence 32 et al (1994)
Tg=0.5; Tm=5; Dp=2; Tw=0.39; Tep=0.0205; Zpp=Tw/Tep;
fi=0.01; At=1.65; Unl=0.184; Wo=1; s=tf('s');
%% válvula
G=1/(Tg*s+1);
%% Turbina
tanh2=s*Tep*(1+(s*Tep/pi)^2)/((1+(2*s*Tep/pi)^2));
tanh2=simplify(tanh2);
F=(1-fi-Zpp*tanh2)/(1+0.5*fi+0.5*Zpp*tanh2);
F=simplify(F);
Fmin=ss(F,'min');
[n,d]=ss2tf(Fmin.a,Fmin.b,Fmin.c,Fmin.d);
Fmin=tf(n,d);
%% Generador
W=1/(Tm*s+Dp);
%% Planta Total
PT=G*Fmin*W;
PT=ss(PT,'min');
[n1,d1]=ss2tf(PT.a,PT.b,PT.c,PT.d);
%% Funciones de ponderación
w1=(0.5*s+3)/(s+3e-4); w2=10*s/(s+2);
w3=0.2*((s/20)+1)/((s/300)+1);
%% Diseño del controlador Hinf
[A,B,C,D]=tf2ss(n1,d1);
SSG=mksys(A,B,C,D);
TSS=augtf(SSG,w1,w2,w3);
[gamma,controller,closed_loop]=hinftopt(TSS);
[a1,b1,c1,d1]=branch(controller);
[nu,de]=ss2tf(a1,b1,c1,d1);
control=tf(nu,de);
[Kred,redinfo] = reduce(control,4);
z=tf(Kred);
```