

HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL DISEÑO AUTOMÁTICO DE
CONTROLADORES H_{∞} PARA MICRO Y PEQUEÑAS CENTRALES
HIDROELÉCTRICAS

JOSE JORGE CARREÑO ZAGARRA

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

2008

HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL DISEÑO AUTOMÁTICO DE
CONTROLADORES H_{∞} PARA MICRO Y PEQUEÑAS CENTRALES
HIDROELÉCTRICAS

JOSE JORGE CARREÑO ZAGARRA

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero electrónico y de
telecomunicaciones

Director

PhD. RODOLFO VILLAMIZAR MEJÍA

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

2008

Dedicatoria

A mi madre Eloísa quien con su ternura, cuidado y comprensión me enseñó a amar la vida y llenó mi corazón de pasión para alcanzar grandes cosas.

A mi padre Silverio quien con su esfuerzo incansable luchó más allá de sus propias fuerzas para darme lo mejor, nunca dejó de confiar en mí y aún cuando todo parecía imposible con su perseverancia y tenacidad vencía toda dificultad y se convertía en nuestro héroe.

A mi hermano Ricardo quien ha sido mi amigo incondicional en todo momento y ha llenado mi vida de su afecto, carisma y compañía. Él es el ángel que Dios me ha regalado.

A mi hermana Bertha quien con su trabajo, esfuerzo y cariño se ha convertido en ejemplo para mí y en tan poco tiempo ha ocupado un espacio importante en mi corazón.

A mis hermanitas Mafe y María Camila a quienes amo demasiado y espero darles lo mejor.

A todos mis amigos que me apoyaron y me brindaron su compañía.

Y Sobre todas las cosas a mi Creador, quien me ha atraído con lazos de amor cada vez más, me ha demostrado su grandeza y su poder y cada día lo llena con su amor y su ternura.

AGRADECIMIENTOS

A todas las personas que hicieron posible el desarrollo de este trabajo de grado, en especial a mi director Rodolfo por sus consejos y recomendaciones, a Adid Bello, Felipe Díaz y Lucía Sarmiento que me colaboraron con el diseño de las gráficas y en la configuración del texto, a Ricardo Díaz y Said Pertuz quienes me asesoraron en la parte de programación y a Grecia Redondo quién me dio recomendaciones de cómo hablar en público. También a mi fiel hermano, quién me ayudó en todo lo que pudo: en la presentación, en la sustentación y a “pararse de la silla” cuando la necesitaba.

A mi pastor y amigo Juan Carlos, por sus consejos, afecto y compañía que han sido útiles para mi formación y crecimiento. También a mi pastora Yineth, a Xavier, Yise, Claudia, Dora y Omaira, por su aprecio. Y a Hilda y Nelson que han sido como padres para mi hermano y para mí y siempre han sido muy atentos y cariñosos con nosotros.

A mis amigos Abel, Brito, Alda, Yohana, Jesús, Adriana, Grecia, Jose Joaquín y su novia Kelly, Yineth, Santa, Alba, Amat, Aquilino, Adid, Lucía, Kilmar y otros, por su apoyo y su compañía.

A mis amigos y hermanos de barrio Camilo, Titi, Luifer, Elkin, Ofo, Jory, Arleth, Karina, Johana, por su compañía durante toda la vida y a quienes siempre recuerdo y espero hacer algo por ellos.

Agradezco a todas estas personas y a muchas más que no mencioné, y a Dios por ponerlas cerca de mí para ayudarme a cumplir con mi propósito eterno.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	1
1. PRESENTACION	4
1.1. Planteamiento del problema	4
1.2. Justificación	5
1.3. Objetivo general	5
1.4. Objetivos específicos	6
2. MODELADO DE SISTEMAS HIDROELÉCTRICOS	7
2.1. Introducción	7
2.2. Conceptos preliminares	7
2.2.1 Sistema dinámico de ecuaciones	8
2.2.2 Parámetros de la planta	9
2.2.3 Características de la columna de agua	11
2.2.4 Modelos no lineales	13
2.2.4.1 Modelos con almenara	14
2.2.4.2 Modelos sin almenara	15
2.2.5 Modelos lineales	16
2.2.5.1 Modelos lineales con almenara	18
2.2.1.2 Modelos lineales sin almenara	20
2.2.6. La planta hidráulica como sistema de fase no mínima	21
2.3. Descripción completa del sistema	22
2.3.1 Regulador de velocidad	22
2.3.2 Actuador hidráulico	23
2.3.3 Planta	23

3.	EL PROBLEMA DEL CONTROL ROBUSTO	26
3.1.	Introducción	26
3.1.1	Objetivos de control	27
3.2.	Consideraciones de desempeño y robustez	28
3.2.1	Relaciones fundamentales de control	28
3.2.2	Consideración de incertidumbre y estabilidad robusta	30
3.3.	Descripción de las incertidumbres	32
3.3.1	Incertidumbres no estructuradas	33
3.3.2	Incertidumbres estructuradas	33
4.	ÍNDICES DE DESEMPEÑO Y SELECCIÓN DE LAS FUNCIONES DE PONDERACIÓN	35
4.1.	Índices de desempeño de controladores	35
4.2.	Definición de las funciones de ponderación	36
4.2.1	Cálculo de la función W_1	37
4.2.2	Cálculo de la función W_2	38
4.2.3	Cálculo de la función W_3	38
5.	DESARROLLO DEL SOFTWARE	41
5.1.	Herramientas de MATLAB empleadas	41
5.2.	Diseño de interfaz	42
6.	PRUEBAS Y RESULTADOS	44
6.1.	Modelo sin almenara considerando columnas inelásticas de agua en las tuberías	44
6.2.	Modelo sin almenara considerando columnas elásticas de agua en la tubería a presión	48
6.3.	Modelo con almenara considerando columnas inelásticas de agua en las tuberías	56
7.	CONCLUSIONES	62

8. RECOMENDACIONES	64
BIBLIOGRAFÍA	65
ANEXOS	67

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Representación de una central hidroeléctrica	8
Figura 2. Diagrama de bloques del sistema hidroeléctrico usado Por Kundur	14
Figura 3. Diagrama de bloques del modelo lineal del sistema hidroeléctrico	18
Figura 4. Esquema completo del sistema de control hidráulico	22
Figura 5. Modelo del actuador hidráulico	23
Figura 6. Transformación de energía hidráulica en energía mecánica	24
Figura 7. Diagrama de bloques de la planta	24
Figura 8. Sistema de control y señales significativas	28
Figura 9. Formas típicas para $S(j\omega)$ y $T(j\omega)$	30
Figura 10. Formulación del problema de control robusto	31
Figura 11. Sistema de interconexión	32
Figura 12. Sistema de control con incertidumbre en la planta	33
Figura 13. Respuesta en frecuencia de $W1$ y $W3$	39
Figura 14. Respuesta en frecuencia de $W2$	39
Figura 15. Diagrama de bloques de la interfaz gráfica	43
Figura 16. Parámetros de la planta del modelo 1	45
Figura 17. Desempeño del controlador del modelo 1	46
Figura 18. Comparación entre el controlador obtenido por el software y el reducido a 4º orden	46
Figura 19. Modelado de la incertidumbre y datos de entrada del modelo 1	47
Figura 20. Parámetros de la planta del modelo 2	49
Figura 21. Comparación entre el controlador original y el controlador reducido a 4º orden	50
Figura 22. Desempeño del controlador del modelo 2	51
Figura 23. Incertidumbre y datos de entrada del modelo 2	52

Figura 24. Velocidad con controlador PID	53
Figura 25. Potencia activa con controlador PID	53
Figura 26. Velocidad con controlador PID y utilizando modelo lineal	54
Figura 27. Potencia con controlador PID y utilizando modelo lineal	54
Figura 28. Parámetros de la planta del modelo 3	56
Figura 29. Desempeño del controlador del modelo 3	58
Figura 30. Comparación entre el controlador original y el controlador reducido a 4 ^o orden	58
Figura 31. Incertidumbre y datos de la planta del modelo 3	60

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Lista de parámetros	10
Tabla 2. Valores del módulo de elasticidad para hallar la celeridad	13
Tabla 3. Subobjetivos de control	27
Tabla 4. Definición de índices de desempeño	36
Tabla 5. Definición de los comandos de MATLAB utilizados	42
Tabla 6. Análisis de robustez del modelo 1	48
Tabla 7. Análisis de robustez del modelo 2	55
Tabla 8. Análisis de robustez del modelo 3	60

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Generalidades de plantas hidroeléctricas	67
Anexo 2. Síntesis de controladores H_∞	75
Anexo 3. Diseño de interfaz gráfica	79
Anexo 4. Manual de usuario	89

RESUMEN

TÍTULO: HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL DISEÑO AUTOMÁTICO DE CONTROLADORES H_{∞} PARA MICRO Y PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS*

Autor: JOSE JORGE CARREÑO ZAGARRA**

Palabras Claves:

Plantas hidráulicas, modelado matemático, control robusto, control H_{∞} , desempeño, robustez, reguladores de velocidad.

Descripción:

Debido a la creciente necesidad de explotar recursos hidroeléctricos como alternativas de generación de energía eléctrica y a la gran dificultad con que se pueden regular estos sistemas de control, es de gran utilidad el desarrollo de herramientas computacionales de diseño de reguladores que cumplan con ciertos objetivos de desempeño y robustez. Dicha dificultad en el ajuste de los reguladores de turbinas hidráulicas se debe principalmente a las características dinámicas de la turbina en sí y al circuito hidráulico asociado: es un sistema de fase no mínima; y, además, la estabilización del servomotor que acciona el distribuidor de la turbina introduce dificultades adicionales.

Por tales razones, en este trabajo de grado se diseña una herramienta software con la habilidad de calcular automáticamente los parámetros de controladores robustos de turbinas hidráulicas con capacidades de generación inferiores a 10MW. La herramienta sirve como una solución práctica y eficaz a la laboriosa tarea de diseñar un controlador diferente para cada tipo de turbina, de generador y diferentes parámetros y condiciones de la planta. Para ello se utiliza la técnica de control robusto H_{∞} , con el fin de garantizar buen desempeño y robustez en el sistema de generación y realizar de manera automática, el ajuste del regulador.

El procedimiento se basa en el uso de modelos matemáticos lineales del sistema controlado. Los parámetros del controlador son obtenidos a partir del empleo de la función *hinopt* de MATLAB y la definición de las funciones de ponderación para garantizar estabilidad y rendimiento en todo el rango de operación. Los resultados de la simulación de tres unidades generadoras sujetas a variaciones de los parámetros manifiestan la exactitud y la eficacia de los controladores robustos obtenidos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Phd, Rodolfo Villamizar Mejía.

SUMMARY

TITLE: SOFTWARE TOOL FOR AUTOMATIC DESIGN OF CONTROLLERS H_∞ FOR MICRO AND SMALL HYDROELECTRIC POWER STATIONS *

Author: JOSE JORGE CARREÑO ZAGARRA**

Key-words:

Hydraulic plants, mathematical modeling, robust control, performance, robustness, speed regulators.

Abstract:

Due to the growing need of exploiting hydroelectric resources as alternatives for generation of electrical energy and the great difficulty to regulate these control systems, it's quite helpful the design of computational tools which calculate efficiently the elements of a regulator that complies with certain objectives of performance and robustness. That difficulty to adjust the regulators of hydraulic turbines is due mainly to the dynamic characteristics of the own turbine and the associated hydraulic circuit: it's a no-minimum-phase system. Besides, stabilization of the servo-motor that activates the distributor of the turbine, introduces additional difficulties.

Therefore, in this grade project it's designed a software tool which is able to calculate automatically the parameters of robust controllers for hydraulic turbines with capacities of generation lower than 10MW. The tool works as practical and effective solution for the laborious task to design a different controller for each kind of turbine, generator, parameters and plant conditions. To do that, it's utilized the robust-control technique H_∞ , with purpose of guaranteeing a good performance robustness in the generation system and perform automatically, the adjustment of the regulator.

The procedure is based on the use of mathematical lineal models of the controlled system. The parameters of the controller are obtained from using the function *hinftol* in MATLAB and the definition of the weighting functions to guarantee stability and performance in the whole operation range. The results of the simulation of three generators units subject to variations of parameters manifest the exactitude and efficacy of the robust controllers obtained.

* Grade proyect.

** Faculty of Physical-Mechanical Engineerings. School of Electrical, Electronics and Telecommunications Engineerings. Director: Phd, Rodolfo Villamizar Mejía.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas hidroeléctricos, como mecanismos eficientes de generación de energía eléctrica en centros de consumo, se presentan como excelentes alternativas por sus costes de explotación, y por la mejora tecnológica que hace que se aprovechen de manera más eficiente los recursos hidráulicos disponibles. Cerca de un 20% de la electricidad producida en el mundo se debe a esta importante y vital energía renovable, que consigue aprovechar la energía contenida en una masa de agua situada a una cierta altura para transformarla en energía eléctrica.

Los componentes principales de una central hidroeléctrica pueden ser clasificados en dos grupos: los componentes del sistema hidráulico que comprenden la turbina, los conductos asociados y su sistema de control; y los componentes del sistema eléctrico formado por el generador síncrono y su sistema de control. Ya que este trabajo es centrado en el sistema hidráulico, sólo se presenta una descripción detallada de este sistema.

El sistema hidráulico constituye el embalse, las tuberías y las turbinas. El desempeño de las turbinas hidráulicas es intensamente influenciado por las características del conducto de agua que alimenta a la turbina. Estas características abarcan el efecto de la inercia del agua, la compresibilidad del agua y las paredes elásticas del conducto forzado. Las turbinas hidroeléctricas presentan características de fase no mínima debido a la inercia del agua; esto implica que un cambio en la abertura de la compuerta produce un cambio inicial en la potencia mecánica que es opuesta a la requerida. Y el efecto de la compresibilidad del agua produce viajes de ondas de presión y se caracteriza por un repentino aumento de presión de rizo causada por la interrupción del flujo, también repentino.

El sistema de regulación de turbinas hidráulicas proporciona una medida de control de potencia y frecuencia; esta función es comúnmente llamada función carga-frecuencia o control automático de generación. La principal función del controlador o

governador de la planta hidroeléctrica es regular la velocidad de la turbina y de ahí la frecuencia del voltaje y la potencia activa. Esta función requiere información de la velocidad del rotor de la turbina y de la potencia eléctrica para determinar la apropiada abertura de la compuerta.

Por otra parte, las teorías de control clásico son capaces de brindar resultados que muchas veces se quedan cortos a la hora de implementarlos a sistemas reales. Sus limitaciones se manifiestan cuando se introducen al sistema perturbaciones que no se tomaron en cuenta a la hora del diseño, o cuando la planta tiene parámetros que varían enormemente. Es por esto que se desarrollaron teorías como las de control robusto, para que el sistema de control sea el adecuado para las distintas aplicaciones.

Para el control de la turbina usualmente se emplean controladores PID y su implementación puede incluir amplia diversidad de configuraciones: desde controladores puramente mecánicos o electromecánicos a controladores electrónicos. Sin embargo, por las ventajas considerables que presenta la teoría de control robusto, el presente trabajo está orientado a la elaboración de una herramienta computacional útil para el diseño automático de controladores H_∞ para turbinas hidráulicas.

El presente documento describe el desarrollo de la herramienta computacional a través de siete capítulos que se presentan de la siguiente manera:

En el primer capítulo se describen aspectos generales del trabajo de grado. Allí se dan a conocer las circunstancias o situaciones que motivaron la realización del proyecto, así como los objetivos y alcances planteados.

El capítulo II presenta de manera breve los parámetros y el sistema dinámico de ecuaciones que describen las características de los sistemas hidroeléctricos, los modelos lineales y no lineales que definen a dichas centrales y la descripción completa del sistema de control (regulador, actuador y planta).

El capítulo III explica de manera general la importancia de la teoría del control robusto y las consideraciones de desempeño y robustez que determinan las características del sistema de control. También se hace una breve descripción de los tipos de incertidumbre que se emplean para modelar las plantas de manera real.

Por su parte, el capítulo IV explica el significado de los índices de comportamiento empleados para medir la calidad de la respuesta transitoria del sistema de control y la manera en que se seleccionaron las funciones de ponderación que minimizan la norma H_∞ y que permiten obtener un controlador óptimo con buenas características de prestación y robustez.

En el capítulo V se presentan las diversas funciones y comandos de MATLAB empleadas en el desarrollo del proyecto y el procedimiento con el que se diseñó la interfaz gráfica que describe el programa.

Por último, el capítulo VI presenta la simulación de tres centrales hidroeléctricas para la evaluación y desempeño de la herramienta software para cada uno de los tres diferentes modelos estudiados y empleados en el trabajo. Y el capítulo VII reúne las conclusiones que se obtuvieron en la realización del proyecto y las recomendaciones que se deben tener en cuenta para su adecuado uso.

Al finalizar el libro se encuentran los anexos. Estos abarcan las generalidades de las centrales hidroeléctricas, una breve explicación de la síntesis de controladores H_∞ y un manual de usuario que permite una fácil interacción entre el usuario y la interfaz gráfica del software.

1. PRESENTACIÓN DEL PROYECTO

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los sistemas hidroeléctricos, como mecanismos eficientes de generación de energía eléctrica en centros de consumo, se presentan como excelentes alternativas por sus costos reducidos en construcción y por su fácil operación y mantenimiento. Con el fin de cubrir la demanda de energía de manera eficaz las plantas hidroeléctricas deben estar provistas de sistemas de regulación modernos que garanticen bajas pérdidas y máximo aprovechamiento de energía.

Actualmente es común encontrar diseños de sistemas de control asistidos por computador (CACSD) para diversas aplicaciones de control automático (entre ellas aplicaciones aeroespaciales, robóticas, etc.). Sin embargo es inusual contar con herramientas software para el diseño automático de controladores de turbinas hidráulicas pues los estudios se enfocan en la obtención de nuevos modelos que describan la dinámica de la planta junto con el empleo y mejora de las diversas estrategias de control que comúnmente se aplican.

La potencia activa y la velocidad deben ser reguladas por controladores (lineales o no) teniendo en cuenta el tipo de turbina, potencia nominal del generador, caudal y presión. En la actualidad el problema radica en que no existe una metodología automatizada para el diseño de controladores hidráulicos robustos y se deben hacer cálculos y estudios cada vez que se requiera un controlador de velocidad y potencia activa para un tipo de turbina específica. De esta manera una herramienta software resulta muy útil en la medida en que permita determinar los parámetros del controlador de la turbina hidráulica y garantice la adecuada operación de la planta.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Debido a la necesidad que existe cada día de explotar aprovechamientos hidroeléctricos como alternativas de generación de energía eléctrica y a la gran dificultad con que se puede regular su sistema de control, es de gran utilidad el diseño de herramientas computacionales que calculen de manera eficiente los elementos de un regulador que cumpla con ciertos objetivos de desempeño y robustez. Dicha dificultad en el ajuste de los reguladores de turbinas hidráulicas se debe principalmente a las características dinámicas de la propia turbina y del circuito hidráulico asociado: es un sistema de fase no mínima; y, además, la estabilización del servomotor que acciona el distribuidor de la turbina introduce dificultades adicionales.

Por tales razones, en este trabajo de grado se diseña una herramienta software con capacidad de calcular automáticamente los parámetros de controladores robustos de turbinas hidráulicas, como una solución práctica y eficaz a la laboriosa tarea de diseñar un controlador diferente para cada tipo de turbina, de generador y diferentes parámetros y condiciones de la planta. Para ello se utiliza la técnica de control robusto H_{∞} , con el fin de garantizar buen desempeño y robustez en el sistema de generación y realizar de manera automática el ajuste del regulador.

Adicionalmente, esta herramienta permitirá ser un material educativo, para la enseñanza de la teoría de control H_{∞} en una aplicación específica como lo son las turbinas hidráulicas.

1.3 OBJETIVO GENERAL

Proponer una herramienta software, que seleccione automáticamente controladores robustos H_{∞} para turbinas hidráulicas con capacidades de generación inferiores a 10MW, teniendo como variables a regular la potencia activa y la frecuencia y a partir de datos básicos y de potencia del sistema.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Utilizar y linealizar los tres (3) modelos matemáticos comúnmente empleados para turbinas hidráulicas de microcentrales y pequeñas centrales hidroeléctricas.
- Plantear el esquema de diseño H_{∞} para los tres tipos de modelos de turbinas hidráulicas, a partir de la definición de las funciones de ponderación W_i para el error, acción de control y salida.
- Calcular las ganancias de los controladores H_{∞} usando MATLAB y mediante el modelo de espacio de estados.
- Realizar en MATLAB una herramienta software tipo interfaz de usuario en la que el diseñador pueda asignar la potencia de la turbina, los parámetros del modelo y algunas consideraciones de la planta, y se genere automáticamente la ganancia del controlador H_{∞} .
- Evaluar el desempeño de la herramienta a partir de la simulación de tres (3) ejemplos de centrales hidroeléctricas.

2. MODELADO DE SISTEMAS HIDRÁULICOS

2.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo trata el modelado matemático de las plantas hidráulicas y su comportamiento dinámico. Como primera medida se presentarán en breve el sistema dinámico de ecuaciones que caracteriza los sistemas de generación hidroeléctricos. Después se da una breve representación de los elementos y parámetros más significativos de la planta junto con los modelos matemáticos no lineales y la simplificación que permite la obtención de modelos linealizados que serán empleados para el cálculo de los controladores.

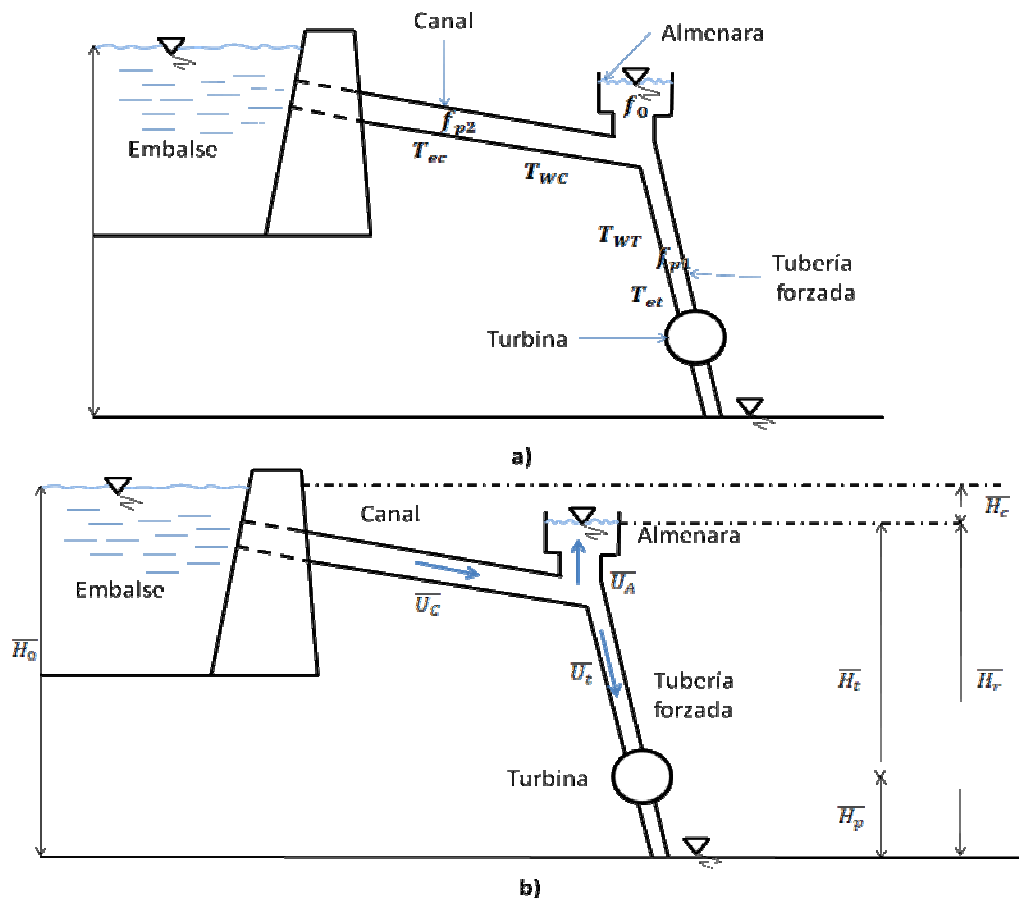
Por último se explican de manera clara y concreta las características del conducto de agua que le suministra la turbina y los elementos del sistema de control que tienen parte en el lazo de regulación potencia-frecuencia.

2.2. CONCEPTOS PRELIMINARES

A continuación se realiza una representación completa de una planta hidráulica. Los elementos principales de esta central y algunos parámetros se muestran en la figura 1a y las variables principales se presentan en la figura 1b. Sin embargo, para que el lector pueda entender la dinámica y las características que rigen una planta hidráulica se recomienda leer el anexo A del presente trabajo, que explica los elementos y generalidades de centrales hidroeléctricas.

Con el fin de estudiar y comparar los modelos es necesario tomar uso uniforme de la notación de las variables y parámetros, pues este hecho permite la descripción de la dinámica de las centrales hidroeléctricas. La elección de cada modelo dependerá del alcance del estudio a realizar y de las características del sistema hidroeléctrico.

Figura 1. Representación de una central hidroeléctrica.



donde f_{p1} , f_{p2} y f_0 son los coeficientes de pérdida de salto en la tubería forzada, el canal de derivación y el orificio del compartimiento de la almenara, y \bar{U}_c , \bar{U}_t y \bar{U}_a son las velocidades del agua en los conductos.

2.2.1. Sistema dinámico de ecuaciones

Las características y el comportamiento de un sistema hidráulico son determinadas por tres relaciones básicas: la velocidad del agua en la tubería de presión, la potencia mecánica en la turbina y la ecuación de onda del flujo en un conducto.

La ecuación de flujo (velocidad del agua) en la tubería a presión está dada por la siguiente expresión:

$$\bar{U}_t = \bar{G}\sqrt{\bar{H}_t} \quad (2.1)$$

donde

\bar{U}_t : Velocidad del agua en la turbina en p.u. (factor de la unidad)

\bar{G} : Posición de la válvula en p.u.

\bar{H}_t : Salto hidráulico en la turbina en p.u.

Por su parte, la potencia mecánica es proporcional al producto de la presión y el flujo; de ahí que:

$$\bar{P}_{mec} = \bar{U} \cdot \bar{H} \quad (2.2)$$

$$\bar{P}_{mec} = (\bar{U}_t - \bar{U}_{sc}) \bar{H}_t \quad (2.3)$$

Con \bar{U}_{sc} como la velocidad del fluido expresada como factor de la unidad.

El flujo de agua a través de un conducto cerrado cumple con las siguientes relaciones físicas:

a) Segunda ley de Newton:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -g \frac{\partial H}{\partial x} \quad (2.4)$$

b) Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -\alpha \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2.5)$$

α es una constante que depende de las características físicas y químicas del agua y del material de la tubería.

2.2.2. Parámetros de la planta ^[15]

Los parámetros significativos que gobiernan una planta eléctrica aparecen en la tabla 1. Estos parámetros son:

- Tiempo elástico:

$$T_{e(T,C)} = \frac{L_{(T,C)}}{a} [s] \quad (2.6)$$

Donde $L_{(T,C)}$ es la longitud del conducto en metros y a es la velocidad de la onda en m/s. Esta expresión se puede representar de la siguiente manera:

$$T_{e(T,C)} = \frac{L_{(T,C)}}{\sqrt{g/\alpha}} \text{ [s]} \quad (2.7)$$

Tabla 1. Lista de parámetros

PARÁMETROS	SIGNIFICADO
$A_{(C,T,A)}$	Sección de área de un conducto en m^3 (c: canal de derivación; t: tubería forzada; a: almenara)
$L_{(C,T)}$	Longitud del conducto en m.
a	Velocidad de la onda en m/s.
g	Aceleración debida a la gravedad en m/s^2 .
ρ	Densidad del agua en $Kg./m^3$.
κ	Módulo de masa de la compresión del agua en $Kg./ms^2$.
D	Diámetro interno del conductor en m.
e	Espesor de la pared de la tubería en m.
ε	Módulo de elasticidad de Young del material del tubo en N/m^2 .
T_w	Tiempo de salida del agua en cualquier carga en s.
T_{WC}, T_{WT}	Tiempo de salida en carga base en s. (WC: canal de derivación; WT: tubería forzada).
C_A	Constante almacenada en la almenara en s.
T	Período natural de la almenara en s.
$f_{p1,p2,o}$	Coefficiente de altura perdida en p.u. (p1: tubería forzada; p2: canal de derivación; O: orificio del compartimiento de la oleada).
$\phi_{C,T}$	Coefficiente de fricción en p.u. (WC: canal de derivación; WT: tubería forzada).
A_{th}	Ganancia de la turbina en p.u.
$Z_{(C,T,n)}$	Impedancia hidráulica del conducto (C: canal de derivación; T: tubería forzada; n: normalizada).

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

Con

$$\alpha = \rho g (1/\kappa + D/e\varepsilon) \text{ [m}^{-1}\text{]} \quad (2.8)$$

- Impedancia hidráulica del conducto:

$$Z_{(T,C)} = \frac{1}{A_{(T,C)} \sqrt{g\alpha}} \quad (2.9)$$

Donde $A_{(T,C)}$ es el área transversal de la tubería en m^2 .

- El tiempo de salida del agua T_w : es definido como el tiempo requerido para acelerar el flujo desde cero a la razón (o base) de flujo (Q_{base}) ante la altura base (H_{base}).

El tiempo de salida del agua en la tubería forzada es:

$$T_{wT} = \frac{L_T}{A_T g} \frac{Q_{base}}{H_{base}} = Z_T T_{eT} \quad (2.10)$$

Y para el canal de derivación se define como:

$$T_{wC} = \frac{L_C}{A_C g} \frac{Q_{base}}{H_{base}} = Z_C T_{eC} \quad (2.11)$$

- Constante de almacenamiento de la almenara: Depende directamente del área transversal de la chimenea de equilibrio

$$C_A = \frac{A_A H_{base}}{Q_{base}} \quad (2.12)$$

El período natural de la almenara se define como

$$T = 2\pi \sqrt{T_{wC} C_A} \quad (2.13)$$

- Relación entre el flujo y la velocidad del agua en el conducto:

$$Q = AU \quad (2.14)$$

- Relación entre el flujo normalizado y la velocidad del agua normalizada en la tubería:

$$\frac{Q}{Q_n} = \frac{AU}{AU_n} \Rightarrow \bar{Q} = \bar{U} \quad (2.15)$$

2.2.3. Características de la columna de agua

El desempeño de la turbina depende intensamente de las características del conducto de agua que le suministra la turbina. Estas características incluyen el

efecto de la inercia del agua, la compresibilidad del agua y las paredes elásticas de la tubería de presión.

Inercia del agua: Su efecto es causado por cambios en el flujo de la turbina tras cambios en el vano de la válvula misma. Un cambio en la abertura de la válvula produce un cambio inicial en la potencia mecánica que es opuesta a la requerida.

Compresibilidad del agua: Es causado por el viaje de ondas de presión y flujo en la tubería. Este fenómeno es comúnmente conocido como golpe de ariete y es caracterizado por un repentino aumento de presión de riesgo causada por la parada del flujo, también repentino.

Elasticidad de las paredes de la tubería de carga: Este efecto es considerado para tuberías largas y se caracteriza por generar intensas oscilaciones indeseadas en la tubería de presión y depende intensamente de la celeridad del agua. La celeridad es la velocidad de propagación en m/s de la onda de presión a través del agua contenida en la tubería. Su valor se determina a partir de la ecuación de continuidad y depende fundamentalmente de las características geométricas y mecánicas de la conducción, así como de la compresibilidad del agua.

Una expresión práctica propuesta por Allievi, que permite una evaluación rápida del valor de la celeridad cuando el fluido circulante es agua, es la siguiente ^[1]:

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + K * \frac{D}{e}}} \quad (2.16)$$

siendo:

D : Diámetro interior de la tubería.

e : Espesor de la tubería.

K : Coeficiente del módulo de elasticidad (ϵ) del material de la tubería, que representa principalmente el efecto de la inercia del grupo motobomba y cuyo valor es:

$$K = \frac{10^{10}}{\epsilon} \quad (2.17)$$

En la tabla 2 aparecen los valores de K para hallar la celeridad de los materiales comúnmente empleados en las tuberías utilizadas en centrales hidroeléctricas. Típicamente la velocidad de cada viaje de onda es alrededor de 1200 m/s.

Tabla 2. Valores del módulo de elasticidad para hallar la celeridad

Material de la tubería	ε (Kg/m^2)	K
Palastros de hierro y acero	$2 \cdot 10^{10}$	0.5
Fundición	10^{10}	1.0
Hormigón (sin armar)	$2 \cdot 10^9$	5
Fibrocemento	$1.85 \cdot 10^9$	5.5 (5-6)
PVC	$3 \cdot 10^8$	33.3 (20-50)
PE baja densidad	$2 \cdot 10^7$	500
PE alta densidad	$9 \cdot 10^7$	111.11

Fuente: Cátedra de ingeniería rural. Escuela universitaria técnica Agrícola de Ciudad Real. Tema 10.

Como se verá más adelante, esta tabla se emplea para calcular los parámetros de la planta que dependen del material de la tubería de carga (y por lo tanto de la velocidad de la onda de presión) a la hora de calcular el controlador óptimo que establezca la planta y que permita obtener ciertos márgenes de desempeño.

2.2.4. Modelos no lineales

Los modelos no lineales de sistemas de control de turbinas hidráulicas son empleados por lo general en casos donde existen grandes cambios de velocidad y de potencia en la turbina, en grandes estaciones aisladas y en el caso que ocurra un rechazo de carga y el sistema de restauración eléctrica falle.

En la figura 2 se muestra un diagrama de bloques del modelo dinámico de un sistema hidroeléctrico, donde se presentan las no linealidades de la turbina y de la potencia mecánica de la planta.

Existen diversos modelos no lineales para sistemas hidráulicos; sin embargo para el diseño de los controladores en este trabajo se emplean los modelos obtenidos por

$$F(S) = -\frac{1}{T_{WT}S} \quad (2.18)$$

Para una columna elástica de agua en la tubería forzada Kundur presenta el siguiente modelo:

$$F(S) = -\frac{1}{\Phi_T + Z_T \text{Tanh}(T_{eT}S)} \quad (2.19)$$

A la hora de modelar una conducción uno de los aspectos más importantes es considerar o no la influencia de los fenómenos elásticos. Estos fenómenos se presentan fundamentalmente en largas conducciones con perturbaciones de alta frecuencia. En el caso del túnel, aunque se trata de una conducción de gran longitud, las perturbaciones procedentes de los cambios de nivel del embalse y de la almenara son de muy baja frecuencia para un tanque de oscilación de dimensiones razonables, por lo que no se justifica el modelado elástico del túnel. En cambio, para la conducción forzada la situación es diferente ya que el margen de frecuencias de la abertura y cierre del distribuidor es mucho mayor que el correspondiente a la variación de nivel en la almenara. Este hecho podría justificar el uso de un modelo más complejo que el inelástico.

2.2.4.2. Modelos con almenara

La principal función de la almenara (o chimenea de equilibrio) es aislar hidráulicamente a la turbina de desviaciones generadas en el salto por transitorios en los conductos. Se encarga de reducir el incremento de presión que se debe al rápido cierre de la válvula de la turbina.

Algunos de los modelos hidráulicos con columna elástica en la tubería de presión y columna inelástica en el túnel de derivación más empleados obtienen unas funciones de transferencia que conecta el flujo de la turbina y el salto como la siguiente:

$$F(S) = \frac{\bar{U}_{th} - \bar{U}_0}{\bar{H}_{th} - \bar{H}_0} = -\frac{1 + \frac{G(S)}{Z_T} \text{Tanh}(T_{eT}S)}{\Phi_T + G(S) + Z_T \text{Tanh}(T_{eT}S)} \quad (2.20)$$

Según Oldenburger y Donelson ^[13], la función de transferencia entre el túnel y la almenara, $G(S)$, está dada por:

$$G(S) = \frac{\Phi_c + Z_c \tanh(T_{ec} S)}{1 + S C_A \Phi_c + Z_c \tanh(T_{ec} S)} \quad (2.21)$$

Kundur ^[9] considera la aproximación $\tanh(T_{ec} S) \cong T_{ec} S$. Reemplazando:

$$G(S) = \frac{\Phi_c + s T_{wc}}{1 + s C_A \Phi_c + s T_{wc} C_A} \quad (2.22)$$

Sin embargo, este modelo se puede simplificar si se consideran columnas de agua inelásticas en las tuberías. Para este caso (2.20) se puede aproximar como sigue:

$$F(S) = \frac{\bar{U}_{th} - \bar{U}_0}{\bar{H}_{th} - \bar{H}_0} = - \frac{1 + \frac{G(S)}{Z_T} (T_{eT} S)}{\Phi_T + G(S) + Z_T (T_{eT} S)} \quad (2.23)$$

Donde $G(S)$ para esta ecuación viene dada por (2.22).

Casi todas las centrales presentan una almenara para evitar el golpe de ariete en la conducción forzada. Sin embargo, para el caso de microcentrales o pequeñas centrales con tuberías no muy largas, se hace innecesario el uso de este elemento. Incluso, cuando la almenara de una central aísla perfectamente el canal de derivación con la conducción forzada, se puede modelar la almenara como ideal, utilizándose en este caso los modelos que desprecian el efecto de este elemento.

2.2.5. Modelos lineales

Para diseñar controladores mediante la estrategia de control H_∞ es necesario linealizar los modelos descritos anteriormente y representarlos en el espacio de estados. Los modelos para las plantas hidráulicas son obtenidos por combinación de las ecuaciones linealizadas de la potencia mecánica (3.2) y la del flujo (3.1). Son

utilizados tanto en operación a pequeña señal como en estudios de respuesta en frecuencia [15].

Entonces las ecuaciones lineales que definen el flujo en la tubería forzada y la potencia mecánica generada por la turbina son:

$$\Delta \bar{U} = \frac{\partial \bar{U}}{\partial \bar{H}} * \Delta \bar{H} + \frac{\partial \bar{U}}{\partial \bar{G}} * \Delta \bar{G} \quad (2.24)$$

$$\Delta \bar{P}_m = \frac{\partial \bar{P}_m}{\partial \bar{H}} * \Delta \bar{H} + \frac{\partial \bar{P}_m}{\partial \bar{U}} * \Delta \bar{U} \quad (2.25)$$

Al emplear la función de Taylor para linealizar las ecuaciones (2.1) y (2.2) se obtiene:

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial \bar{H}} = 0.5; \quad \frac{\partial \bar{U}}{\partial \bar{G}} = 1; \quad \frac{\partial \bar{P}_m}{\partial \bar{H}} = 1.5; \quad \frac{\partial \bar{P}_m}{\partial \bar{U}} = 1.$$

Consiguiéndose con esto las siguientes ecuaciones:

$$\Delta \bar{U} = 0.5 \Delta \bar{H} + \Delta \bar{G} \quad (2.26)$$

$$\Delta \bar{P}_m = 1.5 \Delta \bar{H} + \Delta \bar{U} \quad (2.27)$$

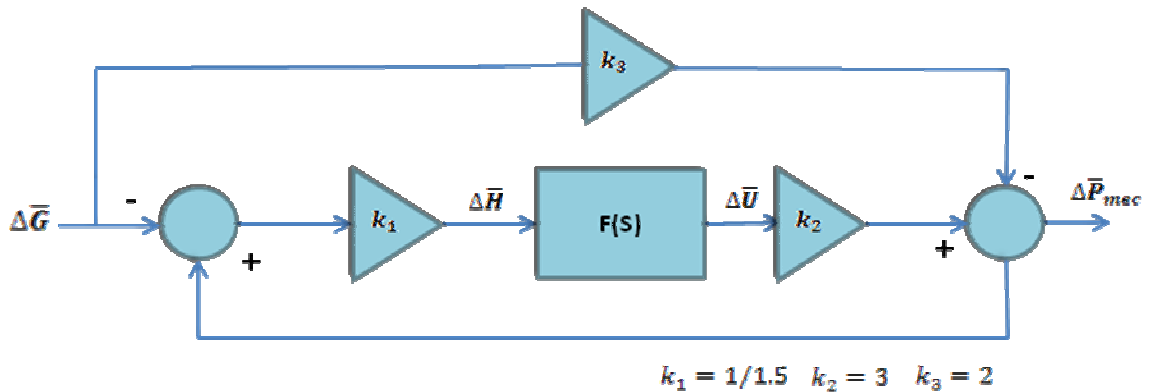
Al combinar estas dos ecuaciones se puede obtener una relación que represente la potencia mecánica generada por la turbina en términos del flujo y la posición de los álabes de la turbina:

$$\Delta \bar{P}_m = 3 \Delta \bar{U} - 2 \Delta \bar{G} \quad (2.28)$$

En la figura 3 se representa el sistema hidroeléctrico linealizado a partir de la función de Taylor. La función de transferencia en lazo cerrado estaría dada por la siguiente relación:

$$\frac{\Delta \bar{P}_m}{\Delta \bar{G}} = \frac{F(s) + 1.0}{F(s) - 0.5} \quad (2.29)$$

Figura 3. Diagrama de bloques del modelo lineal del sistema hidroeléctrico



Esta relación se emplea para los cuatro (4) modelos existentes de centrales hidroeléctricas, pero la función de transferencia $F(s)$ que conecta el flujo de la turbina y el salto establecerá la diferencia entre un modelo y otro.

2.2.5.1. Modelos sin almenara

Si se considera un modelo sin almenara y con columnas inelásticas de agua en las tuberías, la función de transferencia que relaciona la potencia mecánica con la abertura de la válvula para el caso de la turbina ideal se define por la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta \bar{P}_m}{\Delta \bar{G}} = \frac{1 - z_T T_{eT} s}{1 + 0.5 z_T T_{eT} s} = \frac{1 - T_{WT} s}{1 + 0.5 T_{WT} s} \quad (2.30)$$

Esta expresión es obtenida a partir de la sustitución de la función de transferencia de la ecuación (2.18) en la ecuación lineal (2.29).

Sin embargo, si se consideran columnas elásticas de agua en la tubería forzada al sustituir la ecuación (2.19) en la ecuación (2.29) se obtiene la siguiente función de transferencia:

$$\frac{\Delta \bar{P}_m}{\Delta \bar{G}} = \frac{1 - \varphi_T - z_T \tanh(T_{eT} s)}{1 + 0.5 \varphi_T + 0.5 z_T \tanh(T_{eT} s)} \quad (2.31)$$

La función hiperbólica de la ecuación (2.31) se puede aproximar por la siguiente expresión [9]:

$$\tanh(T_{eT}s) = \frac{1 - e^{-2T_{eT}s}}{1 + e^{-2T_{eT}s}} = \frac{sT_{eT} \prod_{n=1}^{n=\infty} \left[1 + \left(\frac{sT_{eT}}{n\pi} \right)^2 \right]}{\prod_{n=1}^{n=\infty} \left[1 + \left(\frac{2sT_{eT}}{(2n-1)\pi} \right)^2 \right]} \quad (2.32)$$

El valor de n determina la exactitud con que se preservan las características del sistema de control hidroeléctrico. Con n=0 se estaría excluyendo el efecto elástico del agua en la tubería, considerando de esta manera un modelo inelástico. En la práctica es común realizar las aproximaciones n=1 o n=2, suficientes para describir de manera casi exacta el comportamiento del agua en las tuberías.

Con n=1, la función hiperbólica estaría dada por la siguiente expresión:

$$\tanh(T_{eT}s) \approx \frac{sT_{eT} \left[1 + \left(\frac{sT_{eT}}{\pi} \right)^2 \right]}{\left[1 + \left(\frac{2sT_{eT}}{\pi} \right)^2 \right]} \quad (2.33)$$

Si se reemplaza la ecuación anterior en la ecuación (2.31) la función de transferencia que relaciona la potencia mecánica con la abertura de la válvula queda definida de la siguiente manera:

$$\frac{\Delta \bar{P}_m}{\Delta \bar{G}} = \frac{1 - \varphi_T - \frac{sT_{WT} \left[1 + \left(\frac{sT_{eT}}{\pi} \right)^2 \right]}{\left[1 + \left(\frac{2sT_{eT}}{\pi} \right)^2 \right]}}{1 + 0.5\varphi_T + 0.5 \frac{sT_{WT} \left[1 + \left(\frac{sT_{eT}}{\pi} \right)^2 \right]}{\left[1 + \left(\frac{2sT_{eT}}{\pi} \right)^2 \right]}} \quad (2.34)$$

Con esta aproximación se modelan en el presente trabajo las centrales hidroeléctricas que no presentan almenara y en las que se consideran columnas

elásticas de agua en el conducto forzado. Los resultados de simulación demuestran la veracidad del modelo al compararlo con la dinámica de plantas hidráulicas reales.

2.2.5.2. Modelos con almenara

Para centrales con almenara se obtiene el siguiente modelo al considerar una columna de agua inelástica en la tubería a presión y en el túnel:

$$\frac{\Delta \bar{P}_m}{\Delta \bar{G}} = \frac{1 - \varphi_T - z_T T_{eT} s + \frac{G(s)}{z_T} T_{eT} s - G(s)}{1 + 0.5(\varphi_T + z_T T_{eT} + G(s)) + \frac{G(s)}{z_T} T_{eT} s} \quad (2.35)$$

Este modelo se basa en la combinación del flujo en la tubería a presión (2.1), la potencia mecánica (2.2) (ambas linealizadas en un punto de operación) y las funciones de transferencia $F(s)$ y $G(s)$, que están definidas por las ecuaciones (2.23) y (2.22) respectivamente.

Sin embargo, si se consideran columnas elásticas de agua en el conducto forzado y columnas inelásticas de agua en el canal de conducción se obtiene la siguiente función de transferencia, que surge como resultado de la sustitución de la ecuación (2.20) en la función de transferencia de la ecuación (2.29):

$$\frac{\Delta \bar{P}_m}{\Delta \bar{G}} = \frac{1 - \varphi_T - z_T \tanh(T_{eT} s) + \frac{G(s)}{z_T} \tanh(T_{eT} s) - G(s)}{1 + 0.5(\varphi_T + z_T T_{eT} + G(s)) + \frac{G(s)}{z_T} \tanh(T_{eT} s)} \quad (2.36)$$

Por último, se debe reemplazar la ecuación (2.23) en la ecuación (2.36), con el fin de sustituir el término hiperbólico por una función de transferencia lineal. El resultado sería la obtención de un modelo lineal:

$$\frac{\Delta \bar{P}_m}{\Delta \bar{G}} = \frac{1 - \varphi_T - z_T \frac{sT_{eT} \left[1 + \left(\frac{sT_{eT}}{\pi} \right)^2 \right]}{\left[1 + \left(\frac{2sT_{eT}}{\pi} \right)^2 \right]} + \frac{G(s)}{z_T} \frac{sT_{eT} \left[1 + \left(\frac{sT_{eT}}{\pi} \right)^2 \right]}{\left[1 + \left(\frac{2sT_{eT}}{\pi} \right)^2 \right]} - G(s)}{1 + 0.5(\varphi_T + z_T T_{eT} + G(s)) + \frac{G(s)}{z_T} \frac{sT_{eT} \left[1 + \left(\frac{sT_{eT}}{\pi} \right)^2 \right]}{\left[1 + \left(\frac{2sT_{eT}}{\pi} \right)^2 \right]}} \quad (2.37)$$

Sin embargo, en el presente trabajo sólo se emplean los tres (3) primeros modelos, suficientes para modelar las microcentrales y pequeñas centrales hidroeléctricas. Este último modelo se puede emplear para grandes centrales, con capacidades de generación por encima de los 10MW. Aunque para centrales muy grandes, en las que hay grandes variaciones de potencia y de velocidad, es recomendable el uso de un modelo no lineal.

2.2.6. La planta hidráulica como sistema de fase no mínima

Si un sistema de control presenta todos sus polos y ceros en el semiplano izquierdo del plano s , el sistema se denomina de fase mínima. Pero si tiene al menos un polo o un cero en el semiplano derecho del plano s , el sistema se considera de fase no mínima. El término de fase no mínima proviene de las características de cambio de fase de tal sistema cuando está sujeto a entradas sinusoidales. Estos sistemas son lentos en su respuesta, debido a su comportamiento defectuoso al inicio de la respuesta.

Las plantas hidroeléctricas presentan esta característica debido a que, como se describía con anterioridad, un cambio en la abertura de la válvula de admisión de agua produce un cambio inicial en la potencia mecánica que es opuesta a la demandada. Este comportamiento dificulta en gran medida la selección de las funciones de ponderación óptimas para el cálculo del controlador H_{∞} que estabiliza la planta.

2.3. DESCRIPCIÓN COMPLETA DEL SISTEMA

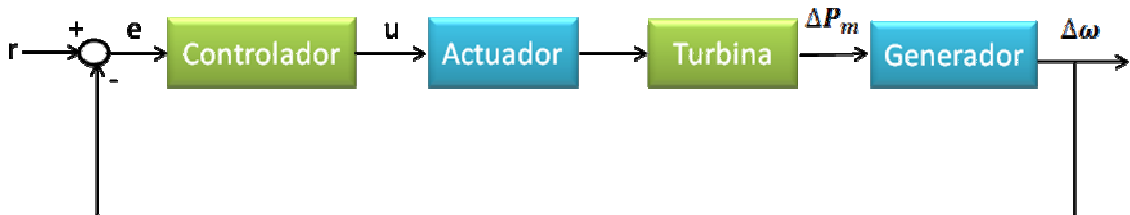
El sistema dinámico empleado para estudiar los diferentes modelos del circuito hidráulico es el lazo de regulación de potencia-frecuencia. Las funciones de este sistema son regular la velocidad de la máquina y la potencia eléctrica suministrada por el generador cuando la máquina se encuentra en carga.

En el caso concreto que ocupa, la magnitud objeto de la regulación es la velocidad o número de revoluciones por minuto a que ha de girar el rodete de la turbina, con el fin de que, por medio del eje se transmita el giro uniforme que debe de existir y mantenerse entre dicho rodete y el rotor del alternador.

Cuando se produce una variación en la carga solicitada al grupo, es decir, según aumente o disminuya el par resistente que actúa sobre la turbina, esta tenderá respectivamente a reducir o aumentar el número de revoluciones antes de producirse la variación de carga. Por tal motivo se requiere de un regulador de velocidad, pues el funcionamiento de la turbina sería totalmente inestable, llegando a pararse al aumentar la carga y a embalsarse cuando ésta disminuyese.

Al regular el caudal de agua preciso para cada valor de carga en cada instante se dispondrá de la potencia requerida debiéndose obtener al mismo tiempo el número de revoluciones de funcionamiento normal de la turbina.

Figura 4. Esquema completo del sistema de control hidráulico



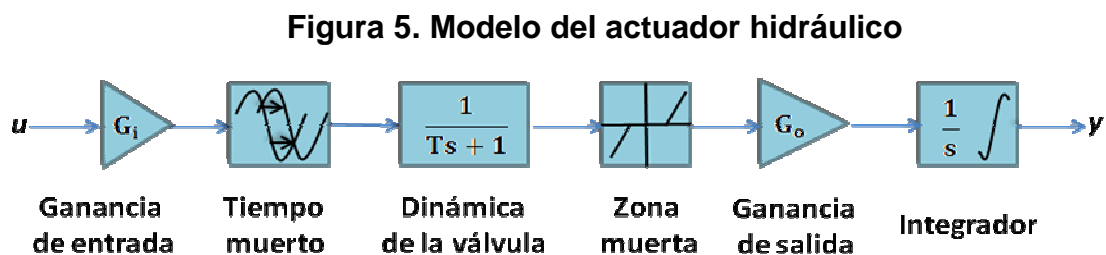
2.3.1. Regulador de velocidad

Su función es asegurar que las respuestas de la frecuencia y la potencia del grupo ante perturbaciones en el sistema, cumplan ciertas especificaciones en cuanto a

rapidez, amortiguamiento y precisión. Este elemento compara el valor de real de la salida de la planta (frecuencia) con la entrada de referencia, determina las desviaciones y produce una señal de control que reduce la desviación a cero o a un valor pequeño.

2.3.2. Actuador hidráulico

Es una válvula que produce la entrada para la planta de acuerdo con la señal de control. El modelo de este elemento es el siguiente:



Como la dinámica en el sistema de posicionamiento es muy rápida comparado con el sistema de hidro turbina-controlada, el sistema de control de posicionamiento del pistón hidráulico se puede representar como un elemento de primer orden:

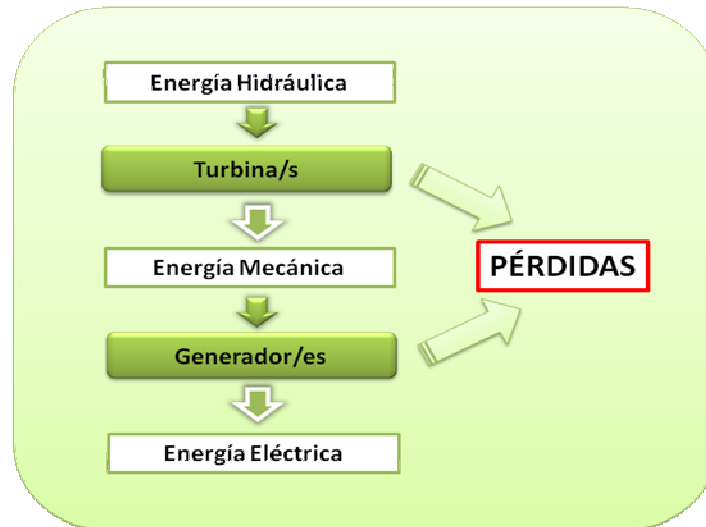
$$\frac{y}{y_{ref}} = \frac{1}{T_a s + 1} \quad (2.38)$$

Donde T_a es la constante de tiempo del sistema es segundos.

2.3.3. Planta

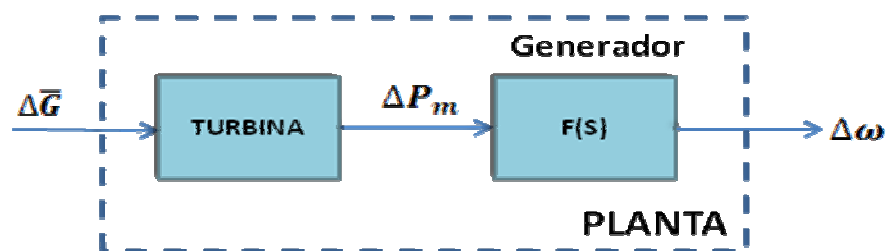
Consta de la turbina y el generador. Las turbinas son máquinas capaces de transformar la energía hidráulica en energía mecánica en su eje de salida. Se modela mediante un conjunto de relaciones estáticas entre la presión, el caudal, la abertura del distribuidor y la potencia.

Figura 6. Transformación de energía hidráulica en energía mecánica



Los generadores por su parte transforman la potencia mecánica de la turbina en potencia eléctrica. Su modelado depende de las condiciones de carga del grupo, ya sea vacío, carga aislada, alimentación de un motor síncrono, conexión a un nudo de potencia infinita, etc. En la figura 7 se muestra el diagrama de bloques que define la planta a controlar en un sistema de control hidroeléctrico.

Figura 7. Diagrama de bloques de la planta



Donde $F(s)$ es la función de transferencia del generador y se modela de la siguiente manera:

$$F(s) = \frac{1}{T_m s + D_g} \quad (2.39)$$

Donde T_m es la constante de tiempo mecánica del generador y D_p es el coeficiente de amortiguamiento de la red eléctrica, que generalmente se encuentra entre 0.5 y 2.5.

Además, la constante T_m es un parámetro de diseño que condiciona el valor máximo de la sobre velocidad alcanzada en un grupo tras un rechazo de carga. Se puede decir también que entre mayor sea el valor de T_m mayor es el valor de sobrepresión en la tubería, y también el valor de sobre velocidad.

3. EL PROBLEMA DEL CONTROL ROBUSTO

3.1. INTRODUCCIÓN

Las teorías de control clásico son capaces de brindar resultados que muchas veces no son suficientes a la hora de implementarlos a sistemas reales. Sus limitaciones se manifiestan cuando se introducen al sistema perturbaciones que no se tomaron en cuenta a la hora del diseño, o cuando la planta tiene parámetros que varían enormemente. Es por esto que se desarrollaron teorías como las de control robusto, para que el sistema de control sea el adecuado para las distintas aplicaciones.

“Un proceso real puede ser considerablemente complejo para describirlo de manera absolutamente precisa por un modelo matemático, en cuyo caso se habla de errores de modelado. Si se añade el hecho de que se trata de describir al sistema con un modelo lineal e invariante en el tiempo, ello implica otro conjunto de hipótesis simplificadoras que incrementan los errores de modelado originales o residuales.

Esto nos lleva a afirmar que todo modelo matemático de un proceso real va a ser en mayor o menor grado impreciso, o dicho de otra forma va a contar con incertidumbres o errores de modelado” [10]. Con el término “incertidumbre en el sistema” se hace referencia a perturbaciones externas, incertidumbres en el modelo de la planta, y ruido de medida.

La necesidad de cumplir unas especificaciones de diseño cada vez más exigentes, y la incapacidad de las técnicas de control tradicionales de satisfacer dichos objetivos, resultando en aplicaciones con un rendimiento bastante pobre, ha llevado a tener en consideración aspectos de importancia práctica en los sistemas de control. Para afrontar este tipo de problemas surgen los métodos de control conocidos como *control robusto*, que abarcan todos aquellos problemas que se

caracterizan por considerar incertidumbres en el modelo que sean tolerables por un controlador fijo lineal e invariante en el tiempo.

3.1.1. Objetivos de control

Los objetivos de control tratan en cualquier caso, de que el controlador diseñado funcione bien cuando se implemente en el proceso real. Como explica Rubio ^[10] este objetivo, a su vez puede considerarse compuesto por una serie de subobjetivos que a su vez se presentan en la tabla 3.

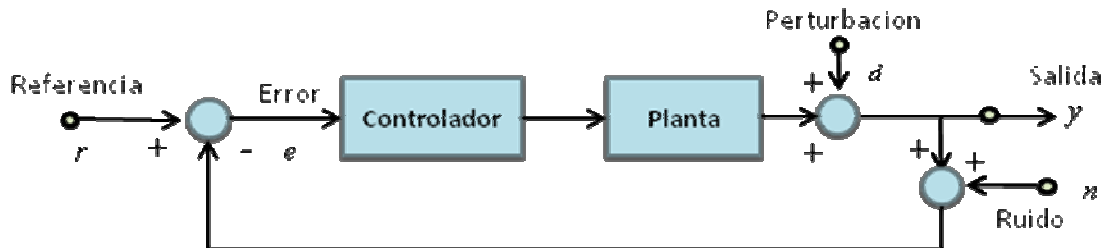
Tabla 3. Subobjetivos de control

SUBOBJETIVO	DESCRIPCIÓN
<i>Estabilidad nominal (NS)</i>	Es el principal subobjetivo y consiste en que el sistema sea estable en lazo cerrado, para unas condiciones de trabajo dadas o nominales.
<i>Comportamiento nominal (NP)</i>	Consiste en que ciertas variables del sistema presenten un comportamiento adecuado y en algunos casos óptimo respecto a una función de costes o índice de comportamiento, una vez conseguida la estabilidad.
<i>Estabilidad robusta (RS)</i>	Requiere que el sistema de control sea estable en lazo cerrado para el conjunto de posibles plantas que se puedan dar como consecuencia de la incertidumbre en el modelo de la planta.
<i>Comportamiento robusto (RP)</i>	Se refiere a las especificaciones de funcionamiento que el sistema de control debe tener además de la estabilidad ante las diferentes plantas debidas a la incertidumbre.

3.2. CONSIDERACIONES DE DESEMPEÑO Y ROBUSTEZ

Considérese el sistema de control en realimentación unitaria de la figura 8.

Figura 8. Sistema de control y señales significativas



Para establecer el formalismo matemático se asume que la planta y el controlador se modelan como sistemas dinámicos de dimensión finita, lineales, estacionarios de tiempo continuo y sistemas SISO. La planta y el controlador pueden representarse por medio de las funciones de transferencia $G(s)$ y $K(s)$. Entonces la función de sensibilidad S y la función de sensibilidad complementaria T están dadas por las siguientes expresiones:

$$S = \frac{1}{1 + G(s)K(s)}$$

$$T = \frac{G(s)K(s)}{1 + G(s)K(s)}$$

Con $S(s) + T(s) = 1$, para todo número complejo s .

Estas ecuaciones capturan las relaciones fundamentales para el presente análisis.

3.2.1. Relaciones fundamentales de control

Del diagrama de bloques de la figura 8 pueden obtenerse las siguientes funciones (matrices en el caso de sistemas multivariables) de transferencia que van a

determinar las propiedades más relevantes a tener en cuenta para el diseño de un sistema de control.

$$\begin{aligned}y &= T(r - n) + Sd \\e &= r - y = S(r - d - n) \\u &= KS(r - n - d)\end{aligned}$$

S mapea la referencia r al error e ;

T mapea la referencia r a la salida y ;

S mapea la referencia d a la salida y ;

T mapea la referencia n a la salida y ;

Las especificaciones de control pueden especificarse en el dominio frecuencial. Una forma de hacerlo es empleando funciones dependientes de la frecuencia, o de ponderación, para acotar las magnitudes de los operadores de sensibilidad y sensibilidad complementaria. De manera que si se desea que exista un seguimiento preciso de la consigna de referencia es razonable requerir la especificación:

$$|T(j\omega)| \approx 1, \forall \omega \in [0, \omega_s]$$

Donde ω_s se refiere a la banda de frecuencia que contiene la información de la señal en baja frecuencia.

Como $T(s) + S(s) = 1$, esto es lo mismo que

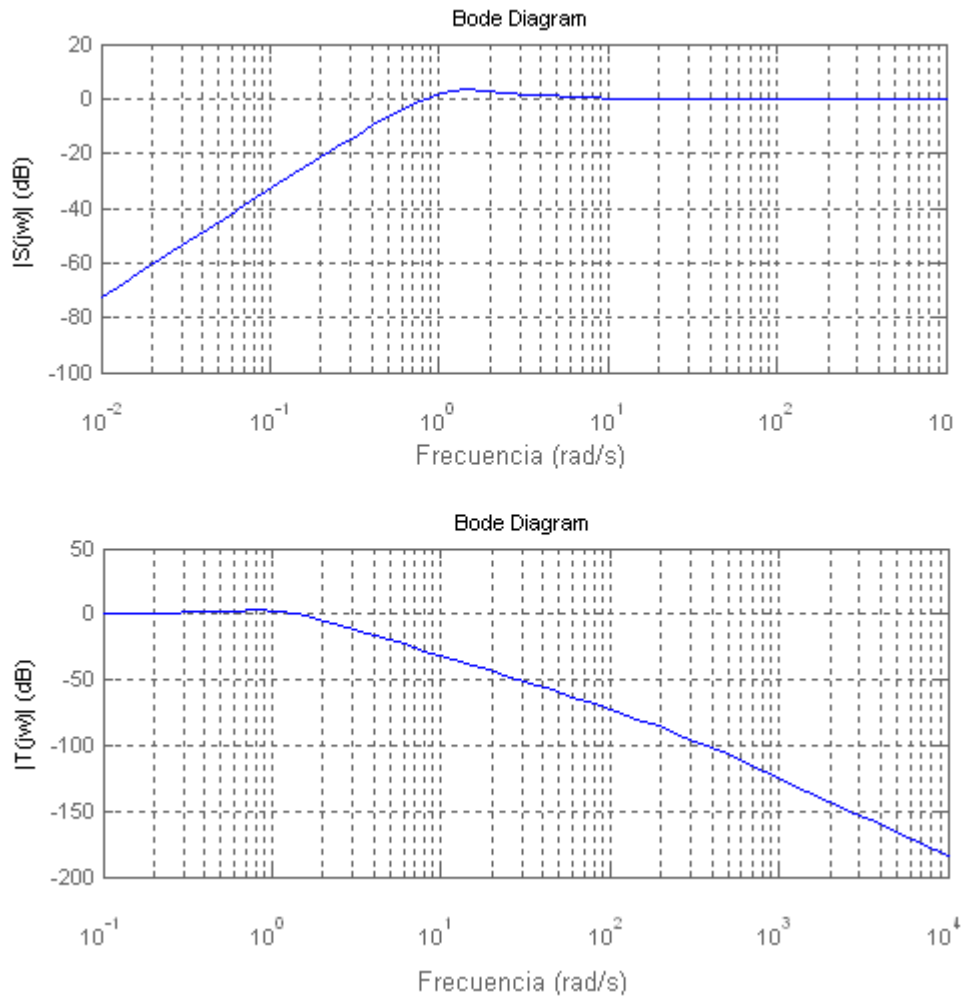
$$|S(j\omega)| \ll 1, \forall \omega \in [0, \omega_s]$$

Esta última ecuación implica que las perturbaciones de salida que tengan contenido en frecuencia en el rango $[0, \omega_s]$ serán atenuadas a la salida del sistema. Por otro lado, el ruido de medición está típicamente concentrado en altas frecuencias, por ello es razonable requerir la especificación:

$$|T(j\omega)| \ll 1, \forall \omega \in [0, \omega_T],$$

para cierta $\omega_T > \omega_s$. Formas típicas para la magnitud de S y de T satisfaciendo este tipo de especificaciones pueden verse en la Figura 9.

Figura 9. Formas típicas para $S(j\omega)$ y $T(j\omega)$

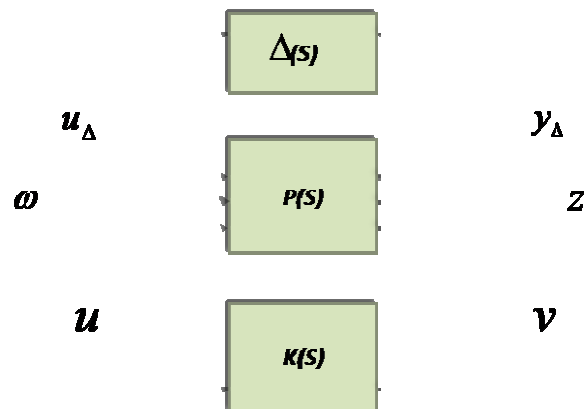


3.2.2. Consideración de la incertidumbre y estabilidad robusta

Debido a la imposibilidad de obtener un modelo exacto de un sistema real en la teoría de control robusto se considera la presencia de incertidumbres a la hora de modelar la planta.

En la figura 10 aparece la representación con la que se trabaja en un problema de control robusto. Se distinguen tres elementos en el diagrama. Por un lado aparece la planta objeto de control $P(s)$; esta planta está sometida a una serie de perturbaciones que se representan mediante $\Delta(s)$; y por último se incorpora a este esquema un controlador $K(s)$ que alimenta a la planta. Con este planteamiento el problema de control robusto es encontrar un controlador $K(s)$ de tal forma que la función de transferencia de u_Δ a y_Δ verifique unos requisitos de estabilidad y especificaciones.

Figura 10. Formulación del problema de control robusto



Si el sistema de control diseñado con el modelo nominal es estable, interesa saber si el sistema mantendrá la estabilidad para cada uno de los elementos P^i del conjunto ξ de las plantas posibles [10]:

$$\xi = \{P^i\}$$

Para el análisis anterior, es útil una representación del sistema como la de la figura 11.

Un teorema (llamado teorema de la pequeña ganancia) que permite analizar la estabilidad de sistemas como el que se muestra en la figura establece que:

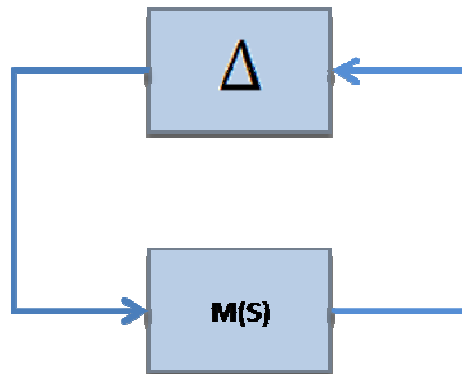
Si $M(s)$ y $\Delta(s)$ son matrices de transferencia estables, entonces el sistema $M-\Delta$ es estable para cualquier $\Delta(s)$ que satisfaga:

$$\bar{\sigma}(\Delta(j\omega)) < \frac{1}{\bar{\sigma}(M(j\omega))}$$

para todo $\omega \in \mathbb{R}$

donde $\Delta = \text{diag}(\Delta_1, \dots, \Delta_n)$ y $\bar{\sigma}$ hace referencia al mayor valor singular.

Figura 11. Sistema de interconexión



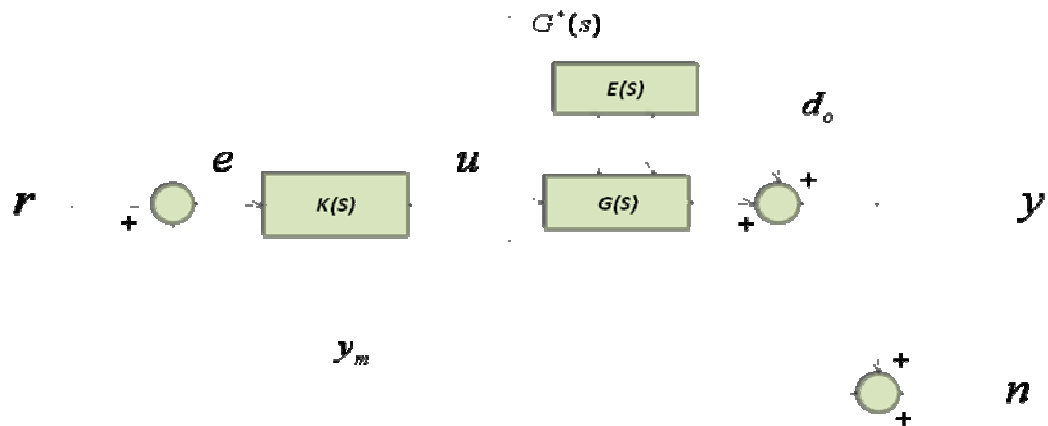
En el caso de tratarse de sistemas LTI, las señales externas, tales como perturbaciones y señales de referencia, no van a afectar la estabilidad del sistema y para el análisis de robustez solo interesa la forma de cómo es visto el sistema por la incertidumbre.

3.3. DESCRIPCIÓN DE LAS INCERTIDUMBRES ^[10]

Un diagrama de bloques $E(s)$ representa la función de transferencia de los errores de modelado existentes en la planta.

En general, a la hora de la descripción analítica de las incertidumbres en la planta éstas pueden clasificarse en dos grandes grupos: *estructuradas* y *no estructuradas*.

Figura 12. Sistema de control con incertidumbre en la planta



3.3.1. Incertidumbres no estructuradas

Para este tipo de incertidumbres lo que se conoce de $E(s)$ puede consistir en una cota de magnitud, generalmente de la frecuencia:

$$\overline{\sigma}[E(j\omega)] \leq \delta(\omega) \quad \forall \omega$$

Todas estas descripciones abarcan la posibilidad de acoplamiento entre distintas fuentes de incertidumbres, considerándose este el caso más desfavorable pues $E(s)$ resultaría de una matriz con elementos no nulos fuera de la diagonal principal, pudiendo ocurrir que se contemplen ciertas posibilidades que en la práctica nunca se produzcan. Si eso ocurriera, el diseño realizado se caracterizaría por ser excesivamente conservador.

3.3.2. Incertidumbres estructuradas

Para este tipo de incertidumbre se localizan las fuentes de las incertidumbres del sistema obteniéndose con esto una descripción más ajustada o estructurada de los errores de modelado. Esta puede estar constituida a su vez por múltiples incertidumbres independientes no estructuradas ($E_i(s)$). Las cuales pueden corresponder a dinámicas no modeladas de los actuadores, de los sensores, o de la

propia planta. Entonces la incertidumbre total del sistema queda representada de la siguiente forma:

$$E(s) = \text{diag}\{E_i(s)\} \quad i = 1, 2, \dots, p$$

Siendo p el número de bloques.

Los errores de modelado también podrían consistir en imprecisiones en algunos parámetros del proceso, suponiendo en este caso una incertidumbre paramétrica.

4. INDICES DE DESEMPEÑO Y SELECCIÓN DE LAS FUNCIONES DE PONDERACIÓN

En este capítulo se explica el significado de los coeficientes dinámicos (o índices de comportamiento) empleados para medir la calidad de la respuesta transitoria del sistema de control. Ellos se emplean como medidas cuantitativas que dan una idea del desempeño y la eficacia del controlador y del esfuerzo necesario para obtener una óptima regulación.

Por otra parte se explica la manera en que se seleccionaron las funciones de ponderación que minimizan la norma H_{∞} y que permiten obtener un controlador óptimo con buenas características de prestación y robustez.

Para seleccionar los pesos w_1 , w_2 y w_3 , de prestación, robustez y actuación, el diseñador debe hacer una traducción de las especificaciones requeridas pues no existe metodología sistemática de diseño. Por esta razón se han desarrollado algunas reglas generales para seleccionar tales funciones de ponderación, que se aplican a todos los problemas de diseño de controladores robustos en H_{∞} y H_2 .

4.1. INDICES DE DESEMPEÑO DE CONTROLADORES

En aplicaciones de control modernas como sistemas adaptables, optimización automática de parámetros y diseño de sistemas óptimos se hace necesaria la medida cuantitativa del comportamiento del sistema de control. Los índices de desempeño son medidas cuantitativas del sistema de control que intentan comparar la calidad de la regulación del controlador y el esfuerzo de control necesario para alcanzarla. Algunos de estos índices aparecen en la tabla.

Tabla 4. Definición de índices de desempeño

Índice de desempeño	Definición	Ecuación
Integral del valor absoluto del error (IAE)	Este índice es una función muy sensible al error y suele emplearse en estudios con simulación en computador.	$IAE = \int_0^{\infty} e(t) dt$
Integral del error cuadrático (ISE)	Se emplea siempre que el error no sea mucho menor que 1 ($e(t) \ll 1$) y Al igual que el IAE este índice trata de que el sobrepaso máximo sea lo menor posible de manera que el valor de la integral sea mínimo.	$ISE = \int_0^{\infty} [e(t)]^2 dt$
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, así como los errores que pueden ocurrir después en la respuesta	$ITAE = \int_0^{\infty} t e(t) dt$
Integral del tiempo por el error cuadrático (ITSE)	Al igual que el ITAE por utilizar como base la multiplicación entre el error y el tiempo indica la rapidez del sistema.	$ITSE = \int_0^{\infty} te(t)^2 dt$

4.2. DEFINICIÓN DE LAS FUNCIONES DE PONDERACIÓN

En aplicaciones prácticas de control óptimo H_{∞} la mayor dificultad consiste en la selección de las funciones de ponderación (o de peso) que permitan ciertos requerimientos de estabilidad y de desempeño. El resultado del diseño dependerá significativamente de estas funciones de ponderación sin importar qué tan bueno sea el algoritmo empleado para calcular el controlador.

A la hora de seleccionar las funciones de ponderación para el cálculo de los controladores se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) W_1 se toma con valores altos para frecuencias bajas. Proporciona adecuada atenuación para las perturbaciones de baja frecuencia y un seguimiento preciso de las consignas escalón. Los errores de modelado y el ancho de banda de los actuadores impone generalmente que W_1 tome valores bajos a alta frecuencia.
- b) W_2 se emplea para restringir el ancho de banda de la señal actuadora, evitando así que el actuador reciba señales de gran amplitud que puedan deteriorarlo.
- c) W_3 toma valores bajos a bajas frecuencias y altos a alta frecuencia. Determina el ancho de banda y limita la estabilidad robusta que tendrá el sistema de control.

Existen muchas formas de seleccionar pero teniendo en cuenta las anteriores consideraciones y realizando diversas pruebas se optó por seleccionar las siguientes funciones de peso:

4.2.1. Cálculo de la función W_1

Para la selección de esta función de peso Martínez, Ortega y Rubio ^[14] proponen un W_1 de la siguiente forma:

$$W_1(s) = \left[\frac{\sqrt[N]{\alpha} * s + 10^{(k-1)} * \omega_T}{s + \sqrt[N]{\beta} * 10^{(k-1)} * \omega_T} \right]^N \quad (4.1)$$

donde:

$\alpha = 0.5$: Ganancia de alta frecuencia.

$\beta = 10^{-4}$: Ganancia de baja frecuencia

$\omega_T = 3$: Frecuencia de corte de W_3

$K = 1$: Determina la frecuencia de corte de la función.

$N = 1$: Determina la pendiente de los polos y ceros.

Con el empleo de tales parámetros se obtiene la siguiente función:

$$W_1(s) = \frac{0.5 * s + 3}{s + 3 * 10^{-4}} \quad (4.2)$$

Esta reduce la sensibilidad unos 80db ($1/10^4$) garantizando una adecuada atenuación para las perturbaciones de baja frecuencia y un seguimiento preciso de la entrada.

4.2.2. Cálculo de la función W_2

Esta función tiene como objetivo disminuir la sobreoscilación de la respuesta temporal afectando poco a la rapidez del mismo. Así mismo la inclusión de W_2 permite evitar problemas numéricos en el cálculo del controlador.

Para evitar que grandes señales puedan deteriorar el actuador se escogió la siguiente función de peso:

$$W_2 = \frac{10 * s}{s + 2} \quad (4.3)$$

4.2.3. Cálculo de la función W_3

Como se ha dicho ya, la función $W_3(s)$ es utilizada para hacer robusto el sistema frente a las incertidumbres que se presentan por la inexactitud del modelo linealizado y por variación de los parámetros de la planta. Para garantizar un ancho de banda de unos 100 rad/s aproximadamente y ante todo proporcionar buena estabilidad robusta al sistema de control, se optó por la siguiente función de peso:

$$W_3 = \frac{0.2 * \left(\frac{s}{20} + 1\right)}{\left(\frac{s}{300} + 1\right)} \quad (4.4)$$

Esta función de ponderación fue seleccionada tras realizar varias pruebas con otras funciones de transferencia y resultó ser la mejor opción al proporcionar buena

estabilidad robusta al sistema de control, permitiendo al sistema de control excelente desempeño ante las variaciones paramétricas de la planta.

Figura 13. Respuesta en frecuencia de W_1 y W_3

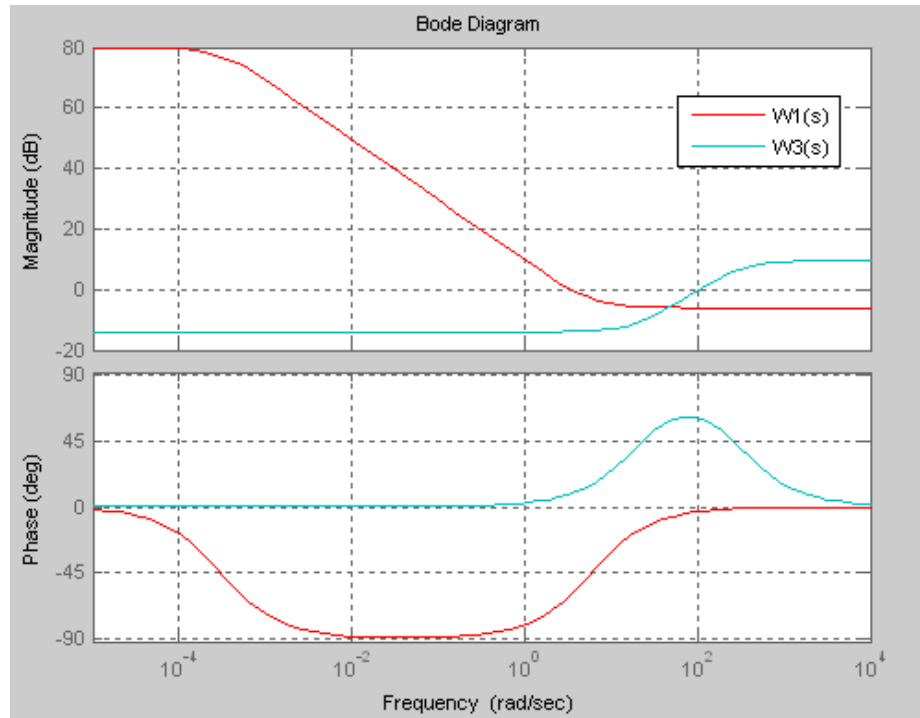
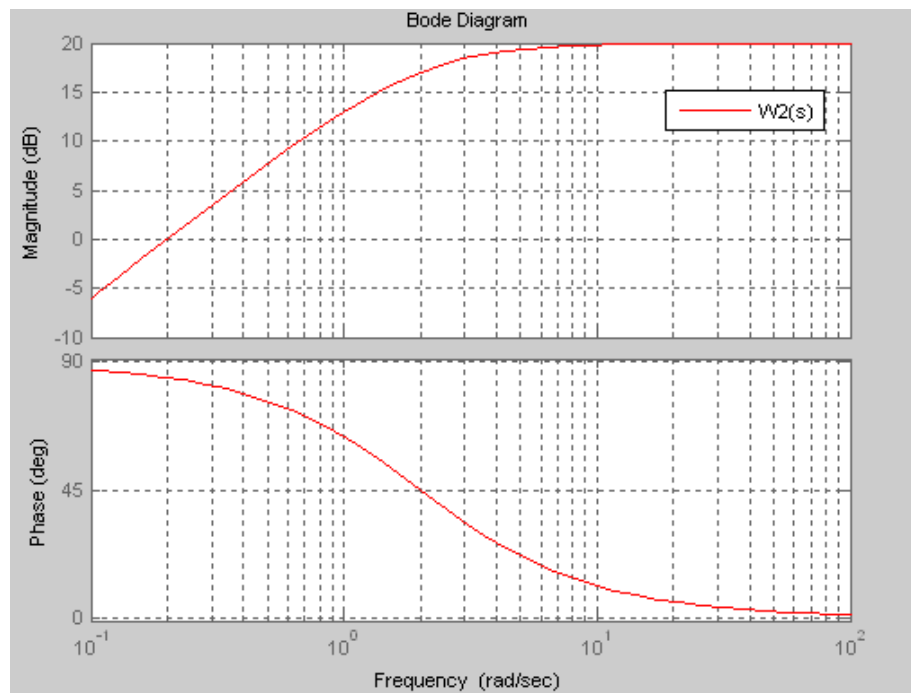


Figura 14. Respuesta en frecuencia de W_2



En las figuras 13 y 14 aparece la representación en diagrama de bode de las funciones de ponderación. Estas funciones de ponderación generan un controlador que garantiza un adecuado desempeño del sistema de control: un buen seguimiento de la consigna, una adecuada respuesta ante perturbaciones externas y grandes variaciones en el modelo de la planta y una apropiada restricción de la señal actuadora.

5. DESARROLLO DEL PROGRAMA

El programa se desarrolla teniendo como fin el cumplimiento de los objetivos específicos del trabajo de grado. Como ya se ha dicho, la idea es diseñar una herramienta software que calcule los controladores robustos óptimos para cada central hidroeléctrica y para ello se emplean diversas funciones y comandos de la herramienta computacional MATLAB.

Inicialmente se diseña el algoritmo requerido para calcular el controlador H_{∞} para cada uno de los modelos de turbinas hidráulicas, después se reduce el orden del controlador obtenido con el fin de implementarlo físicamente en la industria y se definen las funciones para el modelado de la incertidumbre de la planta obtenida por la variación de algunos parámetros.

Finalmente, se presentan estos resultados en una amable interfaz gráfica que permita una fácil comunicación entre el usuario y el programa.

5.1. HERRAMIENTAS DE MATLAB EMPLEADAS

Los comandos contenidos en estas cajas de herramientas, empleados en la realización del software aparecen en la tabla 5.

Además de estos comandos el software emplea el uso de la herramienta Simulink. Este programa se emplea para simular la evolución dinámica del sistema de control con el controlador obtenido y de esta manera verificar su eficacia.

Tabla 5. Definición de los comandos de MATLAB utilizados

Comando	Definición
<i>Hinfopt</i>	Se emplea para calcular el controlador H_{∞} óptimo de la planta a controlar. Para ello deben definirse primeramente las funciones de ponderación adecuadas para obtener un controlador con el mejor desempeño y la mejor robustez.
<i>Augtf</i>	Produce una matriz aumentada en espacio de estados para el sistema de control H_{∞} diseñado.
<i>mksys</i>	Empaqueta matrices generando un sistema con estructura llamada "árbol" (TREE). Es necesario "empaquetar" la planta para que se pueda obtener la matriz aumentada a partir de la función <i>augtf</i>
<i>branch</i>	Se utiliza para recuperar matrices empaquetadas de un sistema LTI. Especialmente se emplea después de obtener el controlador H_{∞} a partir de la función <i>Hinfopt</i> , pues este se encuentra empaquetado en un vector S tipo árbol.
<i>tfdata</i>	Retorna el numerador y el denominador de la función de transferencia del modelo del sistema.
<i>reduce</i>	Se emplea para reducir el orden del controlador obtenido.
<i>wcgain</i>	Permite obtener el peor caso de ganancia de un sistema de incertidumbre.
<i>Usubs</i>	Es usado para subtítular un valor específico de un elemento de un sistema de incertidumbres.
<i>Usample</i>	Se emplea para tomar muestras al azar del sistema de incertidumbre.

5.2. DISEÑO DE LA INTERFAZ

La creación de la interfaz gráfica del software se llevó a cabo mediante los dos tipos de diseños de interfaces gráficas: en modo texto y empleando la herramienta gráfica GUI de MATLAB.

Como se aprecia en la figura 15, el diseño del conjunto de interfaces del programa consta de cinco etapas: inicio, introducción, introducción de los parámetros de la planta, síntesis de controlador y análisis de robustez y desempeño del controlador.

Figura 15. Diagrama de bloques de la interfaz gráfica



Para la construcción de la interfaz gráfica que comunica al usuario con la herramienta computacional las ventanas que aparecen al ejecutar el programa son las siguientes:

1. Ventana de inicio.
2. Ventana de introducción.
3. Ventana para la introducción de los parámetros de la planta.
4. Ventana para el análisis del desempeño del controlador.
5. Ventana para el modelado de la incertidumbre y prueba del controlador bajo valores no nominales.

Para una mayor comprensión acerca del diseño de la interfaz gráfica del programa es recomendable que el usuario lea el anexo C del presente documento.

6. PRUEBAS Y RESULTADOS

Como parte final del diseño de implementación, se realizaron las pruebas y ensayos de la herramienta software con el objetivo de verificar la eficacia del controlador obtenido. Para ello se hacen las simulaciones de tres casos de plantas hidroeléctricas.

6.1. MODELO SIN ALMENARA CONSIDERANDO COLUMNAS INELÁSTICAS DE AGUA EN LAS TUBERÍAS

Como un ejemplo del procedimiento propuesto para diseñar controladores robustos para centrales hidroeléctricas se presenta primeramente una minicentral de 622 Kw. Los parámetros que se consideran para esta planta son los siguientes:

$$H_B = 60 \text{ m}, \quad Q_B = 1.2 \text{ m}^3/\text{s}, \quad P_B = 622 \text{ kW}, \quad \omega_B = 300 \text{ r/min}, \quad T_a = 0.6 \text{ s}, \quad T_m = 8 \text{ s}, \\ D_p = 2.0.$$

Las dimensiones de la tubería a presión son:

Longitud = 100 metros

Diámetro = 1.6 metros

Suponiendo una variación del 10% en el diámetro de la tubería, los resultados de simulación con el controlador aparecen en la figura 16. A partir de estos valores de los parámetros se obtiene la siguiente función de transferencia que caracteriza la dinámica de la turbina:

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta G} = \frac{-0.1014s + 1}{0.0507s + 1}$$

Figura 16. Parámetros de la planta del modelo 1

Como se puede apreciar en la figura 17 los límites de desempeño generados a partir del empleo del controlador obtenido indican un buen comportamiento del sistema de control, pues no presentan valores gigantescos si no que describen valores finitos relativamente pequeños.

En esta figura también aparecen los resultados de la potencia y velocidad nominales y las señales de error y de control ante variaciones en la demanda de energía. Para este caso se supuso que después de 35 segundos de haber arrancado el sistema de generación una carga demanda 180kW de potencia activa y es por esta razón que aparece una perturbación de aproximadamente 0.25 p.u. en el sistema en ese instante.

Se puede ver además que con dicho controlador el sistema control responde con gran rapidez estabilizándose aproximadamente a los 10 segundos y generando una señal de error casi nula.

En la gráfica se puede verificar que la función de transferencia del controlador de cuarto orden obtenido es:

$$K(s) = \frac{40.9708s^3 + 111.3685s^2 + 59.2446s + 8.499}{s^4 + 41.1108s^3 + 52.6009s^2 + 14.6054s + 4.3769 \cdot 10^{-3}}$$

Figura 17. Desempeño del controlador del modelo 1

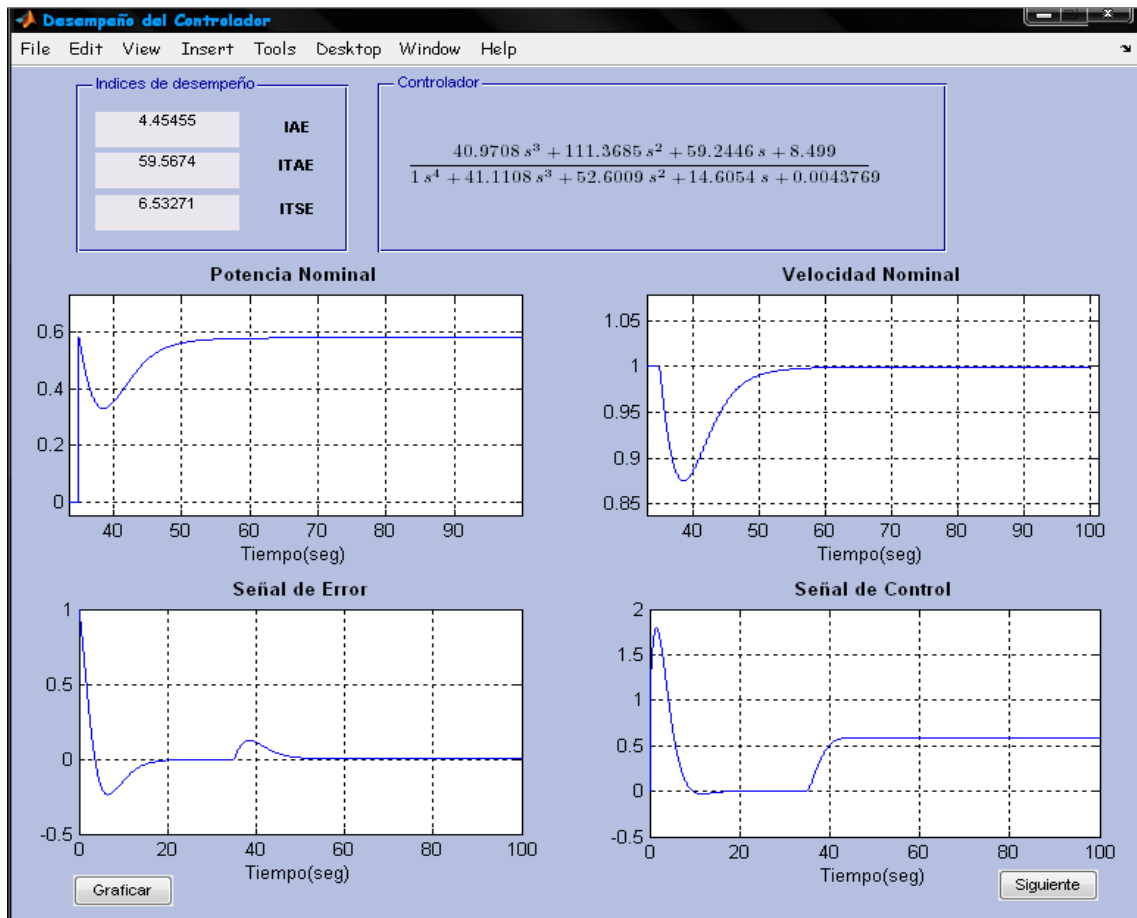
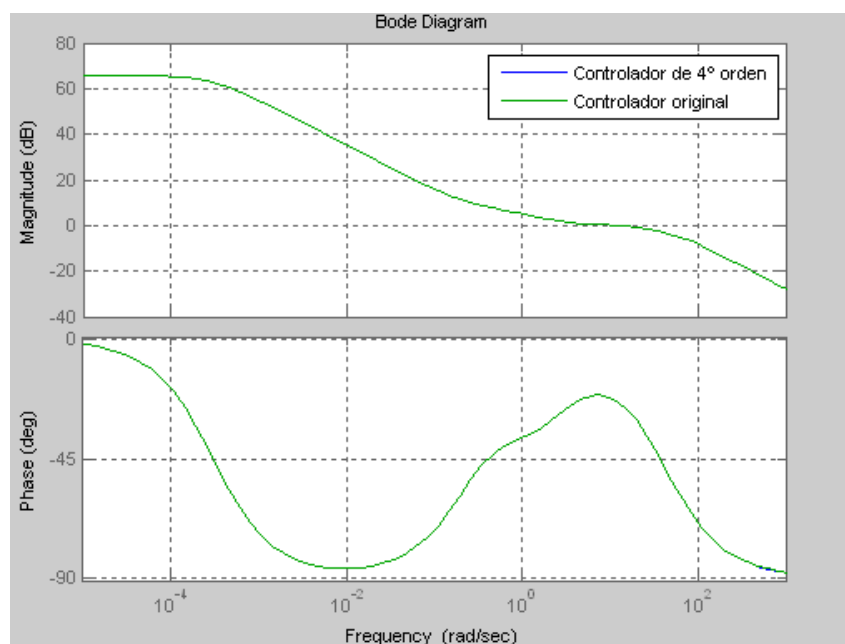


Figura 18. Comparación entre el controlador obtenido por el software y el reducido a 4º orden

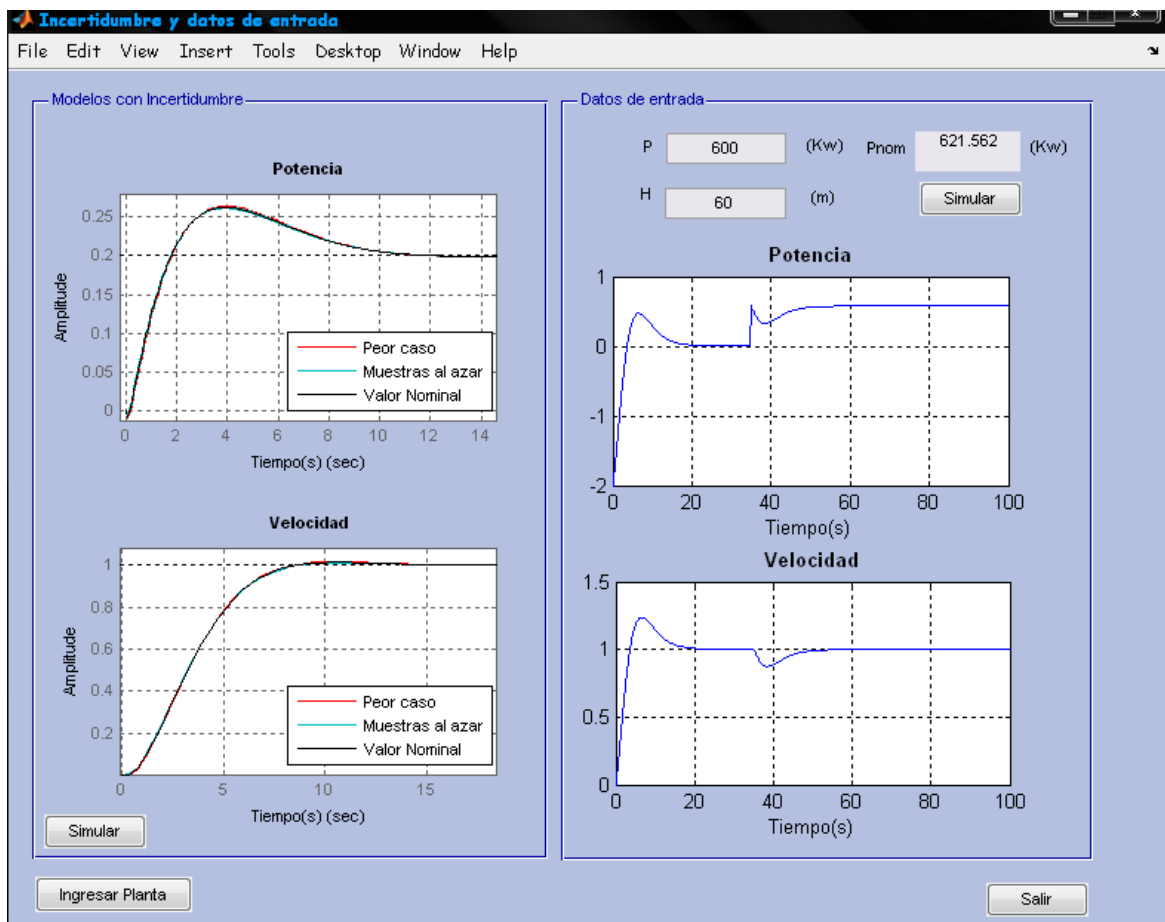


Como se puede notar en la figura 18 el controlador de cuarto orden obtenido resulta confiable por la gran similitud con el original. Esto implica que el método de reducción del orden es preciso y confiable.

En la figura 19 se presenta la simulación del modelado de la incertidumbre y el comportamiento del sistema ante una potencia activa diferente a la nominal. Con respecto a la incertidumbre se verifica la robustez del sistema de control, y se puede ver que en este caso la variación del diámetro de la tubería forzada no influye de manera considerable sobre la estabilidad de la planta debido su valor no es lo suficientemente grande.

Con respecto al desempeño del controlador ante diferentes valores de potencia generada en la turbina se comprueba una vez más que el controlador obtenido a partir de la herramienta software es el óptimo.

Figura 19. Modelado de la incertidumbre y datos de entrada del modelo 1



Por otra parte, con el fin de realizar un análisis acerca de la robustez del sistema hidráulico en la tabla 6 se presentan los resultados obtenidos en este tema. Para ello se emplean las funciones *robuststab* y *robustperf*, para calcular el margen de estabilidad robusta y el margen de desempeño robusto del sistema, respectivamente.

Tabla 6. Análisis de robustez del modelo 1

<p>Margen de estabilidad robusta stabmargin = UpperBound: Inf LowerBound: 5.5152 DestabilizingFrequency: 0.0050</p>	<p>Indica que el sistema de incertidumbre es robustamente estable al ser capaz de tolerar una incertidumbre por encima del 552% del modelado de la incertidumbre y que existe una incertidumbre no modelada a causa de una inestabilidad a 0.005 rad/s.</p>
<p>Margen de desempeño robusto perfmarg = UpperBound: 1.0011 LowerBound: 0.9966 CriticalFrequency: 0.0050</p>	<p>El sistema de control consigue un margen de desempeño robusto de 1.001 y una incertidumbre del tamaño de 99.7% resulta en un margen de desempeño de 1 a 0.05 rad/s.</p>

6.2. MODELO SIN ALMENARA CONSIDERANDO COLUMNAS ELÁSTICAS DE AGUA EN LA TUBERÍA A PRESIÓN

Como ya se ha visto, para este tipo de centrales se tienen en cuenta otros parámetros adicionales: la longitud, el espesor, el coeficiente de fricción y el módulo de elasticidad de la tubería de carga. Para propósitos de simulación y con el fin de verificar la eficacia del controlador obtenido por la herramienta software se consideran los parámetros de la hidroeléctrica croata Zavrelje ^[17]:

$$H_B = 76 \text{ m}, \quad Q_B = 3.2 \text{ m}^3/\text{s}, \quad P_B = 2.1 \text{ MW}, \quad \omega_B = 600 \text{ r/mtn}, \quad T_\alpha = 0.22 \text{ s}, \quad T_m = 5 \text{ s}, \quad D_p = 2.0.$$

Las dimensiones de la tubería a presión para esta planta son las siguientes:

Material: Palastros de hierro y acero

Coefficiente de fricción = 0.01

Longitud = 269 metros

Diámetro = 1.3 metros

Espesor = 1.5cm

Suponiendo una variación del 15% en cada uno de los parámetros de la tubería, los resultados de simulación con el controlador calculado fueron los siguientes:

Figura 20. Parámetros de la planta del modelo 2

La función de transferencia de la planta a partir de los parámetros de la central es:

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta G} = \frac{-0.00596s^3 + 0.0271s^2 - 0.87s + 0.99}{0.003s^3 + 0.027556s^2 + 0.4349s + 1.005}$$

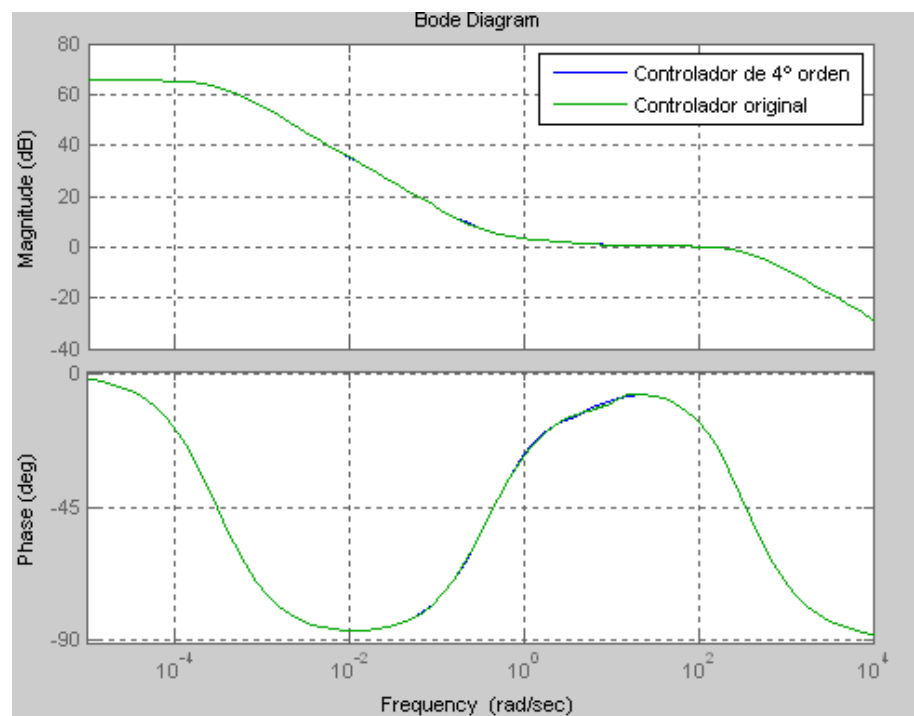
En la figura 22 se puede verificar que la función de transferencia del controlador de cuarto orden obtenido es:

$$K(s) = \frac{587.26s^3 + 2965.42s^2 + 1689.8s + 219.57}{s^4 + 560.69s^3 + 2021.14s^2 + 381.5s + 0.1143}$$

En esta figura también aparecen los resultados de la potencia y velocidad nominales y las señales de error y de control ante variaciones en la demanda de energía. Para este caso se supuso que después de 35 segundos de haber arrancado el sistema de generación una carga demanda 525 KW de potencia activa y es por esta razón que aparece una perturbación de aproximadamente 0.25 p.u. en el sistema en ese instante.

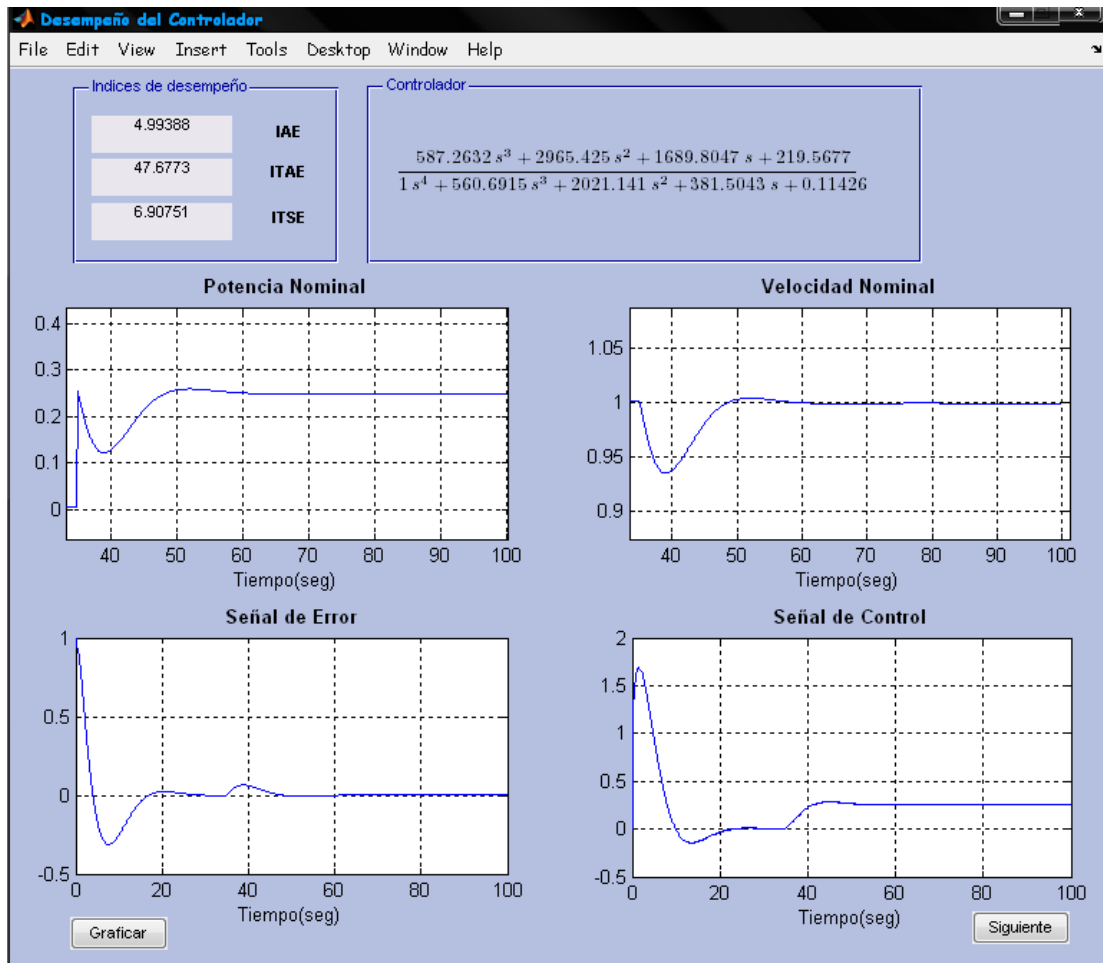
Por otro lado, con el fin de comparar la exactitud con la que se reduce el orden del controlador obtenido por el presente software en la figura aparece el diagrama de bode en fase y magnitud de ambas funciones de transferencia.

Figura 21. Comparación entre el controlador original y el controlador reducido a 4º orden



Como se puede notar el controlador de cuarto orden obtenido resulta confiable por la gran similitud con el original. Esto implica que el método de reducción del orden es preciso y confiable.

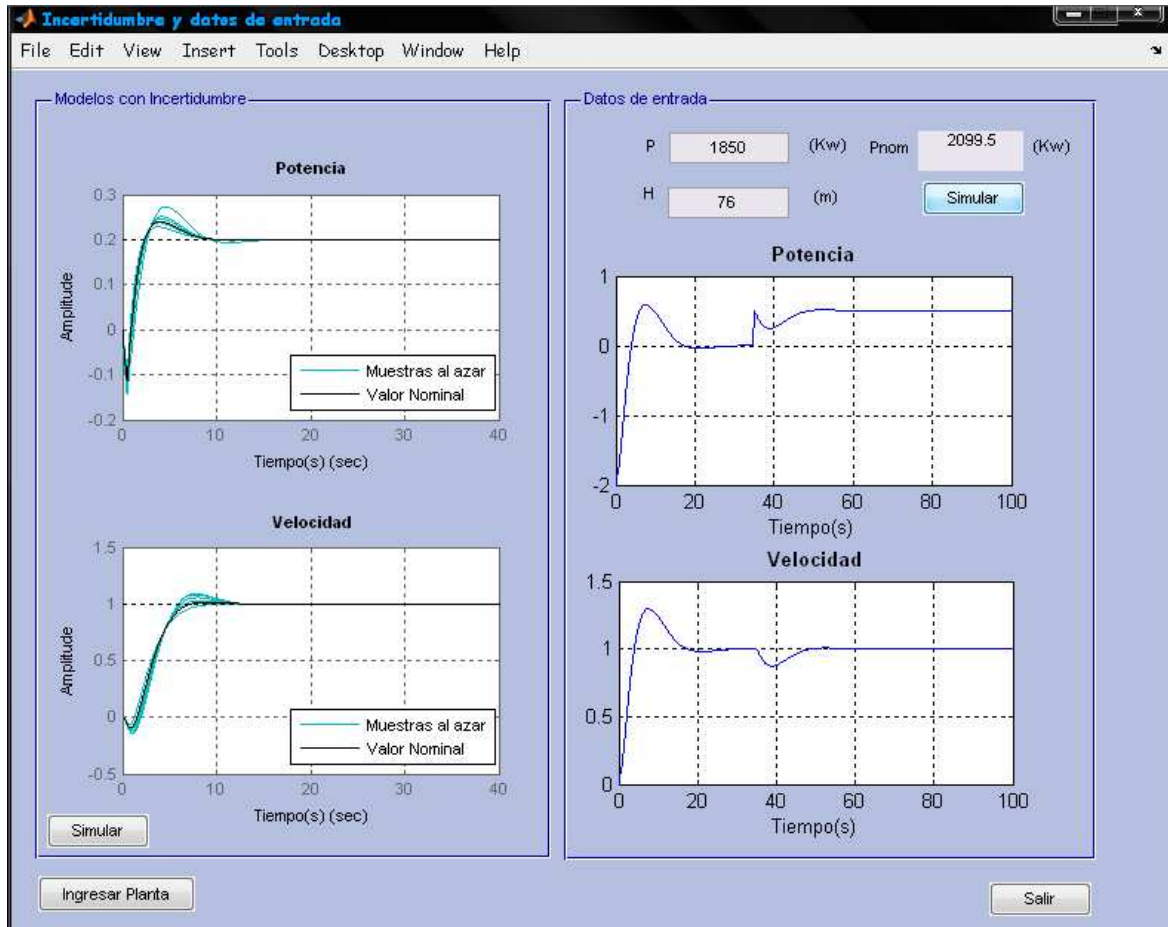
Figura 22. Desempeño del controlador del modelo 2



En la figura 23 se presenta la simulación del modelado de la incertidumbre y el comportamiento del sistema ante una potencia activa diferente a la nominal. Con respecto a la incertidumbre se verifica la estabilidad robusta del sistema de control ante la variación del diámetro, el espesor y el coeficiente de fricción de la tubería forzada. En este caso la estabilidad del sistema de control es considerablemente afectada por la variación de los parámetros aunque el controlador es lo suficientemente robusto para resistir dichas variaciones.

Con respecto al desempeño del controlador ante diferentes valores de potencia generada en la turbina se comprueba una vez más que el controlador obtenido a partir de la herramienta software es el óptimo.

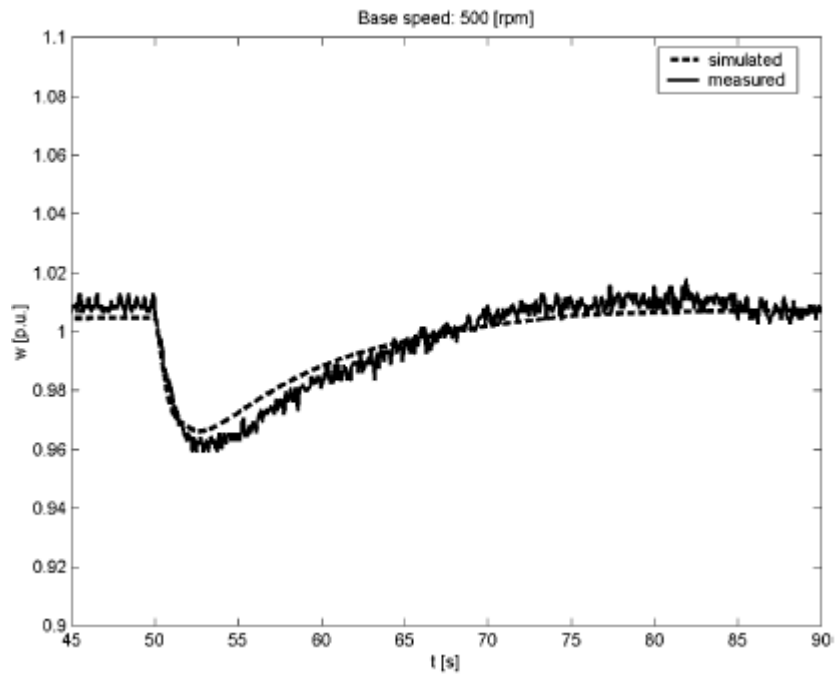
Figura 23. Incertidumbre y datos de entrada del modelo 2



Estos resultados de simulación pueden ser comparados con los conseguidos a partir del controlador PID empleado en la planta croata. Los parámetros de dicho controlador son obtenidos de polos de lazo cerrado y parámetros de la turbina por fórmulas analíticas derivadas de un gran rango de puntos de operación de la turbina [17]. En las figuras 24 y 25 aparecen los resultados de simulación de la velocidad y de la potencia activa de la central para el cambio de carga dado.

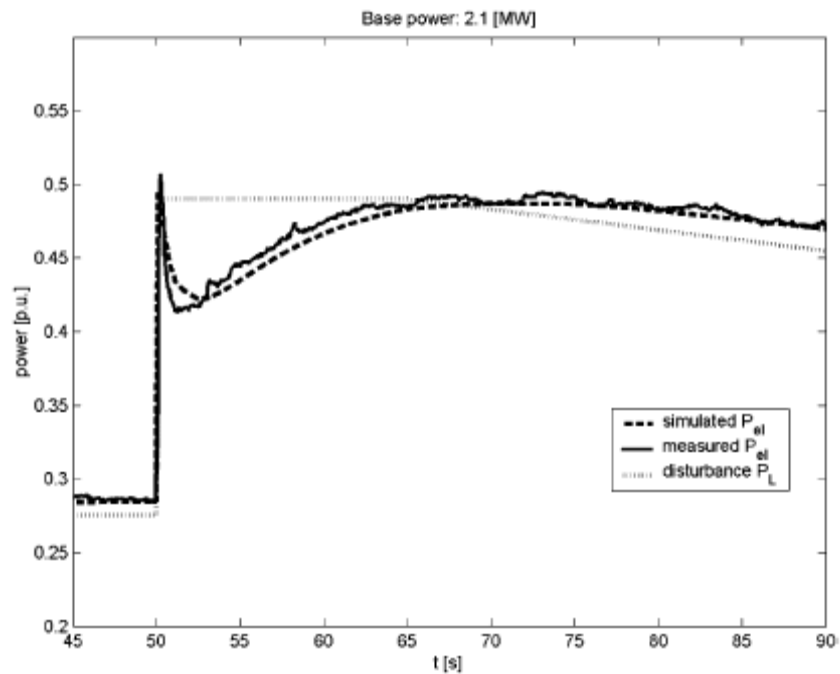
A partir de las figuras se puede ver que el controlador empleado presenta un buen desempeño y que los resultados de simulación son muy parecidos a los experimentales. El sistema de control alcanza su respuesta en estado estable en 35 segundos, y esto puede verificarse en la simulación de las figuras 26 y 27 en la que se emplea el modelo lineal propuesto por el presente trabajo.

Figura 24. Velocidad con controlador PID

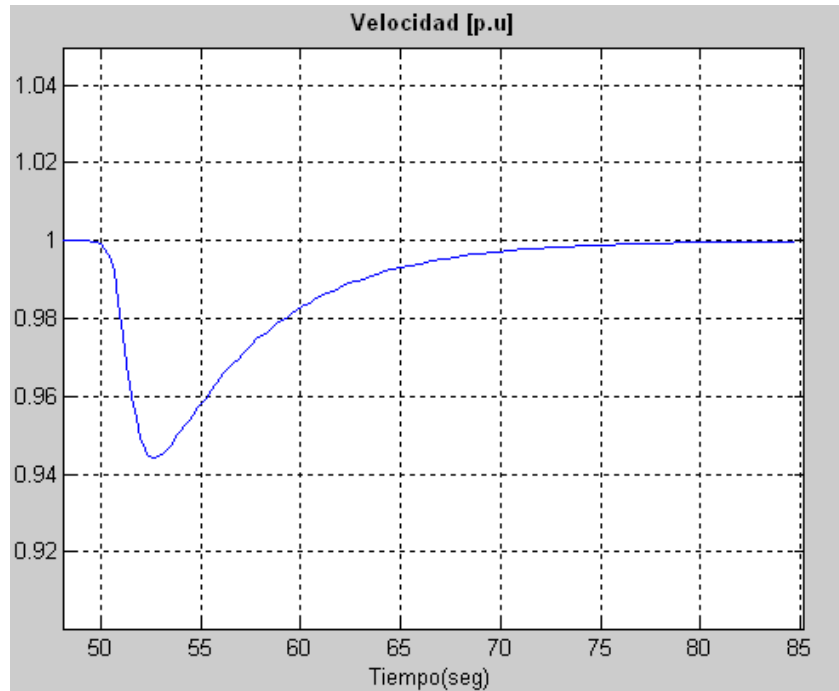
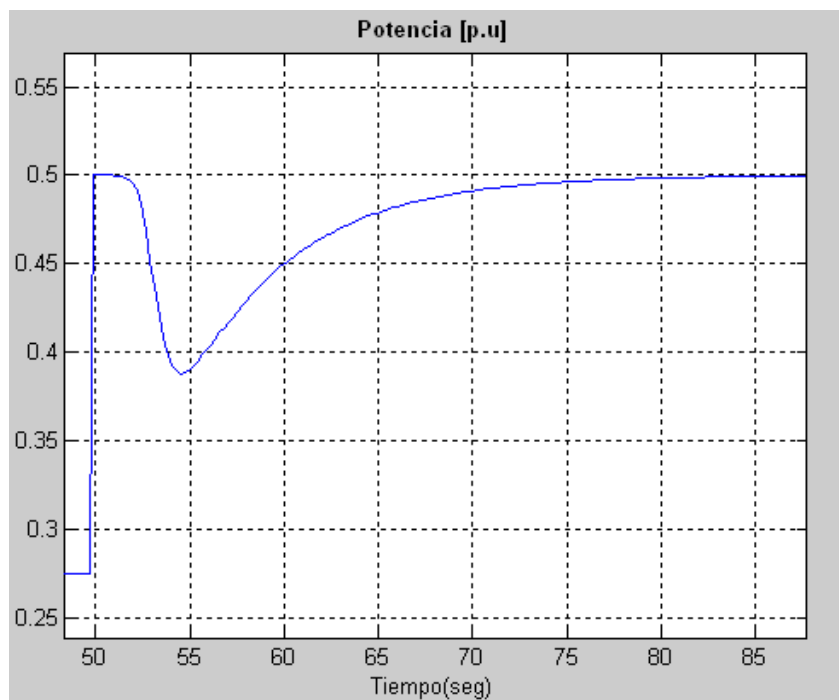


Fuente: B. Strah, O. Kuljaca y Z. Vukic. Speed and Active Power Control of Hydro Turbine Unit. *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 20, N°2, Junio 2005.

Figura 25. Potencia activa con controlador PID



Fuente: B. Strah, O. Kuljaca y Z. Vukic. Speed and Active Power Control of Hydro Turbine Unit. *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 20, N°2, Junio 2005.

Figura 26. Velocidad con controlador PID y utilizando modelo lineal**Figura 27. Potencia con controlador PID y utilizando modelo lineal**

Los índices de desempeño del sistema empleando el controlador PID son los siguientes:

IAE=4.964

ITAE=56.35

ITSE=8.042

Al comparar estos resultados con los resultados obtenidos a partir del controlador óptimo H_{∞} se puede concluir que este último presenta un mejor desempeño que el controlador PID empleado en la hidroeléctrica Zavrelje, notándose con claridad que mientras este alcanza su respuesta en estado estable a los 30 segundos, el controlador H_{∞} lo hace en 15 segundos. Tiene una mayor velocidad de respuesta y un buen seguimiento de la señal de referencia.

Por otra parte, para el análisis de la robustez del sistema en la tabla 7 se emplean dos criterios.

Tabla 7. Análisis de robustez del modelo 2

<p>Margen de estabilidad robusta</p> <p>stabmargin =</p> <p> UpperBound: 14.0172</p> <p> LowerBound: 3.2929</p> <p> DestabilizingFrequency: 222.2595</p>	<p>Con esto se concluye que el sistema es robustamente estable al ser capaz de tolerar una incertidumbre por encima del 329% del modelado de la incertidumbre y que una combinación desestabilizante del 1401% de la incertidumbre modelada existente causa una inestabilidad a 222.26 rad/s.</p>
<p>Margen de desempeño robusto</p> <p>perfmarg =</p> <p> UpperBound: 0.9142</p> <p> LowerBound: 0.9110</p> <p> CriticalFrequency: 0.3578</p>	<p>El sistema de control consigue un margen de desempeño robusto de 0.9142 y que una incertidumbre del tamaño de 91.1% resulta en un margen de desempeño de 1.1 a 0.358 rad/s.</p>

6.3. MODELO CON ALMENARA CONSIDERANDO COLUMNAS INELÁSTICAS DE AGUA EN LAS TUBERÍAS

Como ya se ha dicho, para este tipo de centrales se tienen en cuenta todos los parámetros de la planta: las constantes del generador y del actuador de la turbina y los datos de la tubería forzada, el canal de derivación y la almenara.

Para propósitos de simulación y con el fin de verificar la eficacia del controlador obtenido por la herramienta software se considera una planta con los siguientes parámetros:

$$H_B = 110 \text{ m}, Q_B = 7.4 \text{ m}^3/\text{s}, P_B = 6.95 \text{ MW}, \omega_B = 720 \text{ r/min}, T_a = 0.5 \text{ s}, T_m = 8.0 \text{ s}, D_p = 1.0.$$

Las dimensiones de la tubería a presión para esta planta son las siguientes:

Material: Palastros de hierro y acero

Coeficiente de fricción = 0.01

Longitud = 800 metros

Diámetro = 2.5 metros

Espesor = 2.0 cm

Figura 28. Parámetros de la planta del modelo 3

The screenshot shows a software window titled "Parametros de la planta" with several sections for parameter configuration:

- Modelo:** Three radio buttons: "Sin almenara inelastico", "Sin almenara elastico", and "Con almenara inelastico" (selected).
- Planta y actuador:** Input fields for Hb (110 m), Qb (7.4 m³/s), ef (.87), Ta (.5 s), N (720 r.p.m.), and f.p (1).
- Funcion de Transferencia de la Turbina:** A large text area containing a transfer function:
$$\frac{-5145.8991 s^3 + 4494.6185 s^2 + 54.6545 s + 0.94554}{2572.9496 s^3 + 4669.7153 s^2 + 67.6895 s + 1.1031}$$
 and a field for Pnom (6947.25 Kw).
- Tuberia Forzada:** Input fields for ft (.01), L (800 m), d (2.5 m), e (2 cm), and a dropdown menu for "me" set to "Fundicion".
- Tunel y almenara:** Input fields for Lc (3000 m), Ac (3.14 m²), fc (.09), and Aa (45 m²).
- Incertidumbre:** Input fields for d (10%), e (10%), ft (10%), fc (10%), and Ac (10%).
- Generador y carga:** Input fields for Tm (8 s), Dp (1), and PL (1400 Kw).

Buttons at the bottom include "Salir", "Manual", "Simular", and "Siguiente".

Por otra parte, las dimensiones del canal de derivación y la chimenea de equilibrio para esta planta son las siguientes:

Coeficiente de fricción del canal = 0.09

Longitud del canal = 3000 metros

Área del canal = 3.14 m²

Área de la almenara = 45 m²

A partir de las dimensiones de los elementos de la central se puede verificar que la función de transferencia que caracteriza la dinámica de la turbina en esta planta es la siguiente:

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta G} = \frac{-5145.9s^3 + 4494.6s^2 - 54.65s + 0.946}{2572.9s^3 + 4669.7s^2 + 67.69s + 1.103}$$

En la figura 29 se puede verificar que la función de transferencia del controlador de cuarto orden obtenido es:

$$K(s) = \frac{6505.65s^3 + 12.1088s^2 + 0.0956s + 0.002236}{s^4 + 45.13s^3 + 0.2989s^2 + 0.008259s + 2.457 * 10^{-6}}$$

En esta figura también aparecen los resultados de la potencia y velocidad nominales y las señales de error y de control ante variaciones en la demanda de energía. Para este caso se supuso que después de 35 segundos de haber arrancado el sistema de generación una carga demanda 1.4 MW de potencia activa y es por esta razón que aparece una perturbación de aproximadamente 0.25 p.u. en el sistema en ese instante.

Se puede ver además que con dicho controlador el sistema control responde con gran rapidez estabilizándose aproximadamente a los 10 segundos y generando una señal de error casi nula.

Figura 29. Desempeño del controlador del modelo 3

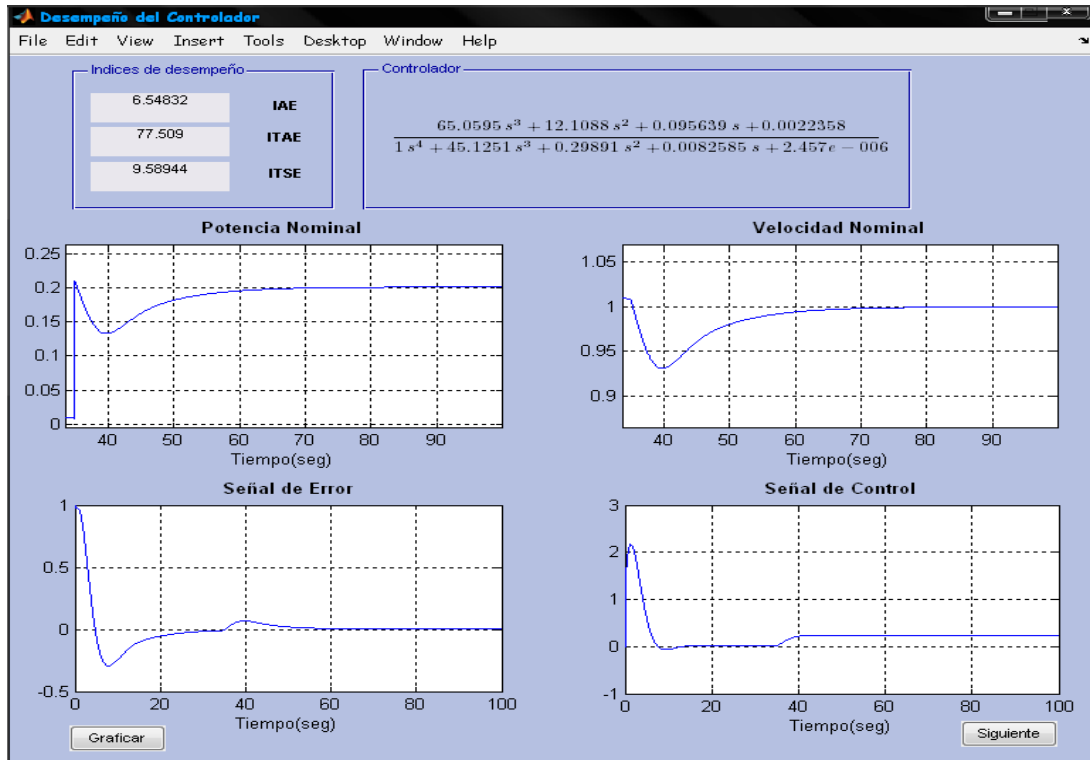
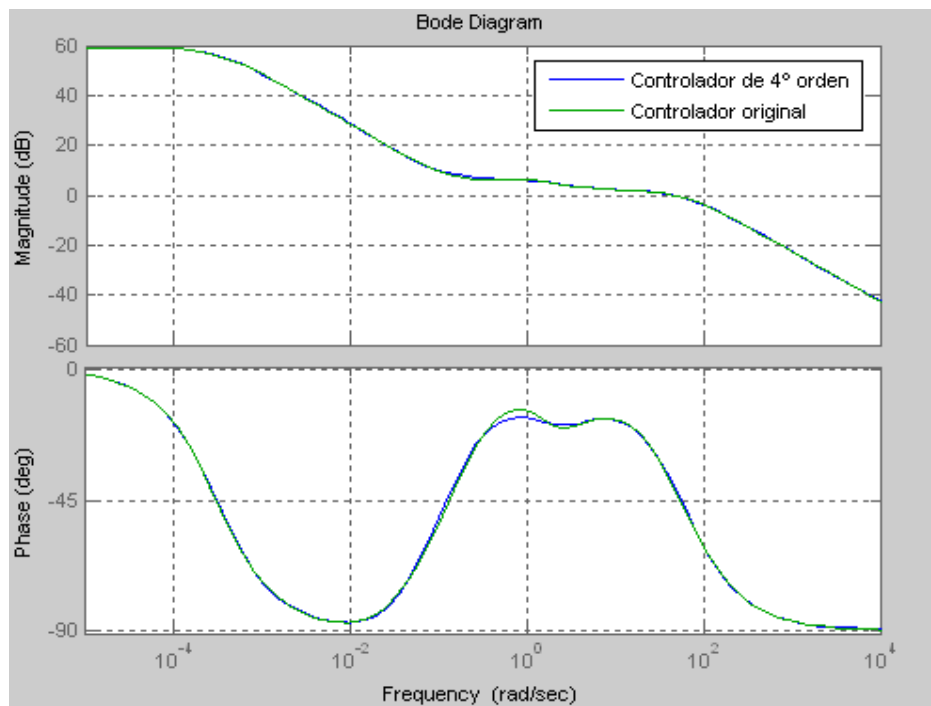


Figura 30. Comparación entre el controlador original y el controlador reducido a 4º orden



Por otro lado, en la figura 30 se verifica la exactitud del controlador reducido a cuarto orden al compararlo con el controlador robusto de alto orden obtenido con la herramienta computacional.

Por otra parte, en la figura 31 se presenta la simulación del modelado de la incertidumbre y el comportamiento del sistema ante una potencia activa diferente a la nominal. Con respecto a la incertidumbre se verifica la estabilidad robusta del sistema de control ante la variación del diámetro, el espesor y el coeficiente de fricción de la tubería forzada, así como el área transversal y el coeficiente de fricción del canal de derivación. En este caso la estabilidad del sistema de control es considerablemente afectada por la variación de los parámetros aunque el controlador es lo suficientemente robusto para resistir dichas variaciones.

Con respecto al desempeño del controlador ante diferentes valores de potencia generada en la turbina se comprueba una vez más que el controlador obtenido a partir de la herramienta software es el óptimo.

Figura 31. Incertidumbre y datos de la planta del modelo

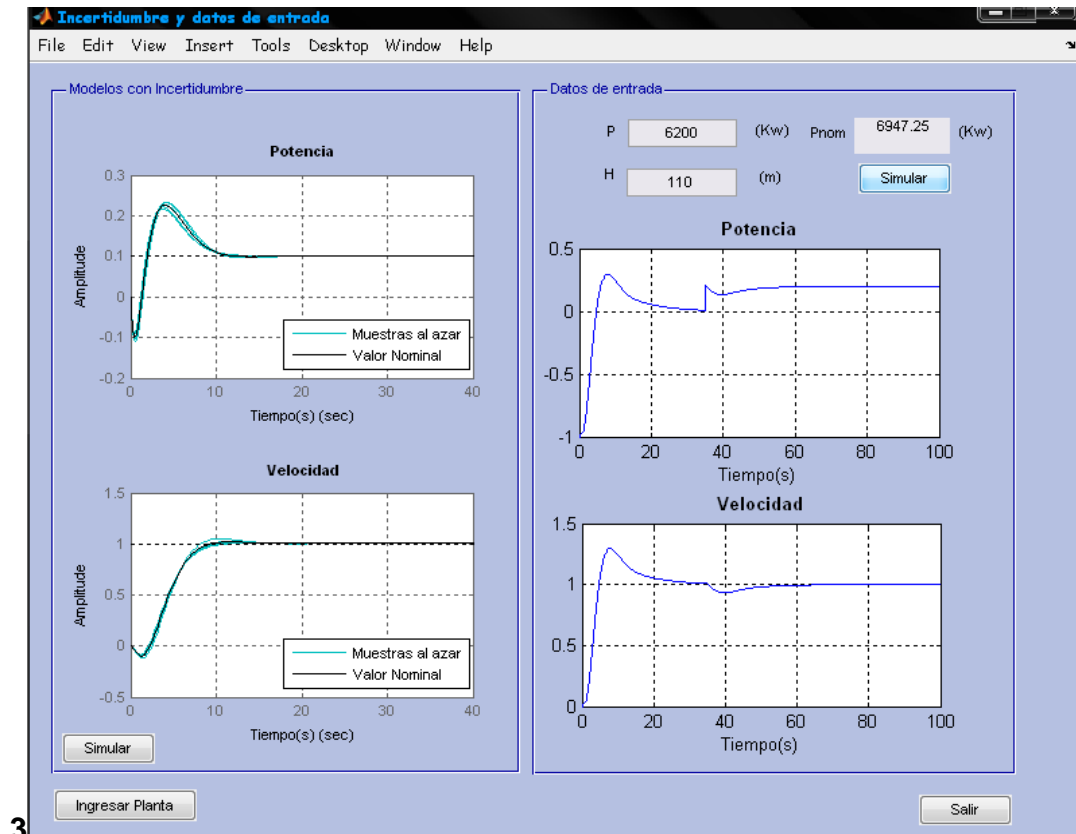


Tabla 8. Análisis de robustez del modelo 3

<p>Margen de estabilidad robusta</p> <p>stabmargin =</p> <p>UpperBound: 9.4634</p> <p>LowerBound: 4.2970</p> <p>DestabilizingFrequency: 0.011</p>	<p>Con esto se concluye que el sistema es robustamente estable al ser capaz de tolerar una incertidumbre por encima del 430% del modelado de la incertidumbre y que una combinación desestabilizante del 946% de la incertidumbre modelada existente causa una inestabilidad a 0.0111 rad/s.</p>
<p>Margen de desempeño robusto</p> <p>perfmarg =</p> <p>UpperBound: 0.8902</p> <p>LowerBound: 0.8840</p> <p>CriticalFrequency: 0.2621</p>	<p>El sistema de control consigue un margen de desempeño robusto de 0.89 y que una incertidumbre del tamaño de 88.4% resulta en un margen de desempeño de 1.13 a 0.262 rad/s.</p>

Para finalizar, el análisis de la robustez del sistema se presenta en la tabla 7. Allí se puede ver que el sistema de control es robustamente estable para grandes valores de incertidumbre y presenta también un buen comportamiento robusto.

7. CONCLUSIONES

En el presente trabajo de grado se ha diseñado una herramienta software que selecciona automáticamente controladores robustos H_∞ para turbinas hidráulicas con capacidades de generación inferiores a 10MW, teniendo como variables a regular la potencia activa y la frecuencia, a partir de los parámetros de la planta y la potencia nominal del sistema. Para ello, se han linealizado los modelos dinámicos de centrales hidroeléctricas obtenidos por [9] y se han diseñado las funciones de ponderación para calcular el controlador robusto adecuado. A partir de los resultados obtenidos con esta herramienta computacional se logran obtener las siguientes conclusiones:

- ✓ Los modelos lineales empleados en el presente trabajo para describir la dinámica del sistema hidroeléctrico demuestran ser tan eficaces como los modelos no lineales empleados en la industria para la obtención de controladores de turbinas hidráulicas.
- ✓ La bibliografía existente acerca del modelado de centrales hidroeléctricas y sus sistemas de control manifiestan el problema del ajuste de los reguladores de velocidad. La presente herramienta computacional genera automáticamente controladores de turbinas eficientes, aptos para ser implementados en la industria y que no necesitan ser ajustados.
- ✓ Al comparar los resultados alcanzados con un controlador PID propuesto por expertos y empleado en una planta de Croacia con el controlador obtenido con la presente herramienta se puede ver claramente que el sistema hidráulico presenta un mejor comportamiento y una mejor estabilidad robusta cuando se utiliza el controlador H_∞ .
- ✓ El programa desarrollado puede ser de gran utilidad para el estudio y análisis de sistemas de control robusto en la medida en que le permite al usuario realizar un análisis riguroso de los sistemas de control hidroeléctricos en

cuanto a su comportamiento y robustez, y sus resultados pueden ser comparados con los obtenidos a partir de controladores clásicos convencionales PID.

- ✓ Como primera medida, antes de intentar sintetizar un controlador H_∞ es imprescindible analizar el sistema a lazo abierto y conocer cuales son sus limitaciones con el fin de no querer que cumpla con especificaciones que son imposibles para el sistema de control. Por este motivo en el presente trabajo no se simularon incertidumbres paramétricas superiores al 15%, pues son más que suficientes para el modelado de sistemas hidroeléctricos reales (teniendo en cuenta además que el desgaste de los elementos de la planta se presenta a paso de tortuga) y porque valores superiores podrían imposibilitar la estabilidad robusta.

8. RECOMENDACIONES

Para la correcta utilización del software se recomienda leer primero el manual de usuario y entender de manera clara el funcionamiento y dinámica de los sistemas hidroeléctricos. Esto es necesario pues se debe comprender qué datos de la planta son introducidos en el programa y de esta forma evitar que por la sensibilidad de la respuesta a estos parámetros se obtengan controladores incapaces de estabilizar la planta.

Por otra parte se recomienda que las instituciones educativas incluyan en sus programas de pregrado el curso de control robusto, pues resulta útil para comprender de mejor manera el área de modelado y simulación de sistemas de control y ubican al estudiante en un entorno más crítico y real de este campo.

También se propone realizar un trabajo futuro para el diseño automático de filtros y controlador para plantas hidroeléctricas por medio del uso de algoritmos genéticos. Esto sería bastante útil pues se realizaría de forma automática el diseño de las funciones de ponderación, seleccionándose los filtros que generen mayores ventajas para el cómputo del controlador H_{∞} .

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Apuntes de cátedra de ingeniería rural. Escuela universitaria técnica Agrícola de Ciudad Real.
- [2]. BARRAGÁN, Diego Armando. Manual de interfaz gráfica de usuario en MATLAB 7.0.
- [3]. CÁMARA J.F., CASTAÑO F., ORTEGA M.G. y RUBIO F.R.. Controlador mediante sensibilidad mixta $S/KS/T$ aplicado a una planta piloto. Depto. Ingeniería de sistemas y automática, Escuela superior de ingenieros. Universidad de Sevilla.
- [4]. CHIANG R. y HADAEGH F. Theory and weighting strategies of mixed sensitivity H_{∞} synthesis on a class of Aerospace applications. *Jet Propulsion Laboratory*, California Institute of Technology.
- [5]. CHIANG, R y SAFONOV, M. Robust Control Toolbox of MATLAB, User's Guide, Version 2.
- [6]. COLMENARES, W. y TADEO, F.. Apuntes sobre control robusto y multiobjetivos de sistemas. Editorial Equinoccio, editorial de la Universidad Simón Bolívar.
- [7]. CORCHERO M.A., M.G. ORTEGA y F.R. RUBIO. Aplicación del control robusto H_{∞} a una planta solar. Depto. Ingeniería de sistemas y automática, Escuela superior de ingenieros. Universidad de Sevilla.
- [8]. Ente Vasco de la Energía (EVE). *Minihidráulica en el país Vasco*. División de investigación y recursos. Bilbao, Noviembre de 1995.
- [9]. KUNDUR, Prabha. Power system Stability and control. Mc Graw-Hill M Professional, 1994.
- [10]. LÓPEZ, M. y RODRIGUEZ, F. Control Adaptativo y Robusto. Universidad de Sevilla. Sevilla, 1996.
- [11]. LÓPEZ M., ORTEGA M.G. y RUBIO F.R.. Control robusto de un sistema de dos rotores en cuadratura. Depto. Ingeniería de sistemas y automática, Escuela superior de ingenieros. Universidad de Sevilla.
- [12]. MAZZONE, Virginia. Control robusto de péndulo invertido. Ingeniería en automatización y control industrial. Universidad Nacional de Quilmes.
- [13]. OLDENBURGER, R. y DONELSON J., Jr.. Dynamic Response of Hydrielectric Plant. *AIEE Transactions on Power Apparatus and systems*, vol. 81, p. 403-409, October 1962.

- [14]. ORTEGA M. G., RUBIO F. R. Systematic Design of Weighting Matrices for the H_{∞} Mixed Sensitivity Problem. *Journal of Process Control*. 2004. Vol. 14, p. 89-98.
- [15]. QUIROGA, Oscar Daniel. Modelling and nonlinear control of voltage frequency of hydroelectric power plants. Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2000.
- [16]. Rocha R. y Martins L.S.. A Multivariable H_{∞} Control for Wind Energy Conversion System. Department of Control and Automation. Federal University of Ouro Preto, Brazil.
- [17]. STRAH B., KULJACA O. y VUKIC Z.. Speed and Active Power Control of Hydro Turbine Unit. *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 20, N°2, Junio 2005.
- [18]. Working group on Prime Mover and energy supply models for system dynamic performance studies. *Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies*, Vol. 7, N°1, Febrero 1992.
- [19]. WWW.flickr.com/photos/7898810@N07/2273510951

ANEXOS

Anexo A

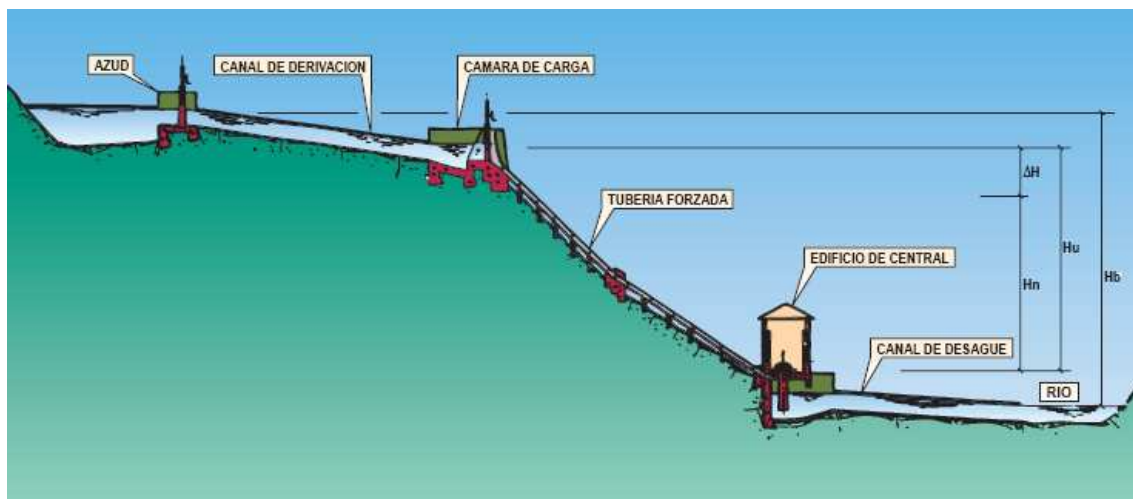
Generalidades de las Plantas hidroeléctricas

A.1 Elementos de un central

Las centrales hidroeléctricas son instalaciones mediante las que se consigue aprovechar la energía contenida en una masa de agua situada a una cierta altura, transformándola en energía eléctrica. Esto se logra conduciendo el agua desde el nivel en el que se encuentra, hasta un nivel inferior en el que se sitúan una o varias turbinas hidráulicas que son accionadas por el agua y que a su vez hacen girar uno o varios generadores, produciendo energía eléctrica.

La potencia de una central hidroeléctrica depende del caudal que pueda turbinar y del salto, es decir, de la diferencia de cotas del agua a la entrada y la salida de la central. En función de dichos parámetros (salto y caudal) se elegirá el tipo de turbina más adecuada.

Figura A1. Esquema de un salto de agua



Fuente: Ente Vasco de la Energía (EVE). *Minihidráulica en el país Vasco*. División de investigación y recursos. Bilbao, Noviembre de 1995.

Una planta hidroeléctrica está constituida básicamente por un embalse, obras de conducción, tanques de oscilación, tuberías de alta presión, casa de máquinas, turbinas, generadores, tuberías de desfogue, centro de control, controladores, etc.

Embalse

Son las obras que se construyen en el curso del agua, transversalmente al mismo, para la retención y desviación hacia la toma del caudal que se deriva hacia la central. Son estructuras de construcción de mucha utilidad pues son usados en campo como el riego, el aprovechamiento y la generación de energía, el control de inundaciones, la navegación, la pesca, el control de sedimentos, y la recreación.

Figura A2. Represa de Bocas, Santander (Colombia)



Canal de derivación

Es la conducción que transporta el agua que se deriva hacia la central desde la toma hasta la almenara.

A lo largo del canal, dependiendo de su longitud, puede haber varias compuertas para limpieza y vaciado del canal en caso necesario. Al final del canal, antes de la cámara de carga, suelen instalarse una reja de finos con su correspondiente máquina limpiarrejas, así como una compuerta de seguridad.

Figura A3. Canal de derivación de la minicentral El Portal, Santander (Colombia)



Desarenador

Se emplea para evitar el ingreso de materiales extraños que puedan perturbar el funcionamiento de la turbina.

Figura A4. Desarenador de Bocas, Santander (Colombia)



Almenara

Consiste en un pozo vertical situado lo más cerca posible de las turbinas. Cuando existe una sobrepresión de agua esta encuentra menos resistencia para penetrar al pozo que a la cámara de presión de las turbinas haciendo que suba el nivel de la almenara. En el caso de depresión ocurrirá lo contrario y el nivel bajará. Con esto se consigue evitar sobrepresiones en las tuberías forzadas y álabes de las turbinas el golpe de ariete debidas a las variaciones de carga del generador o a condiciones imprevistas.

Cuando la carga de trabajo de la turbina disminuye bruscamente se produce una sobrepresión positiva, ya que el regulador automático de la turbina cierra la admisión de agua

De este modo la chimenea de equilibrio o almenara actúa como un muelle hidráulico o un condensador eléctrico, es decir, absorbiendo y devolviendo energía.

Figura A5. Chimenea de equilibrio de la presa Futaleufú, Provincia del Chubut (Argentina)



Fuente: WWW.flickr.com/photos/7898810@N07/2273510951

Tubería forzada

Conduce el agua desde la chimenea de equilibrio hasta la turbina. Soporta grandes presiones en su superficie y consiste de uno o dos tubos, de acero generalmente, con un diámetro superior a 45 cm.

Debido al declive del terreno un canal no es apto para transportar el agua se requiere necesariamente cerrar el conducto y con suficiente espesor para soportar la presión interior que se desarrolla en el agua al cambiar de altitud más de lo que corresponde a la velocidad con que se mueve. Es por este motivo que se requiere del empleo de tuberías forzadas.

Figura A6. Tubería de forzada Central Palmas, Santander (Colombia)



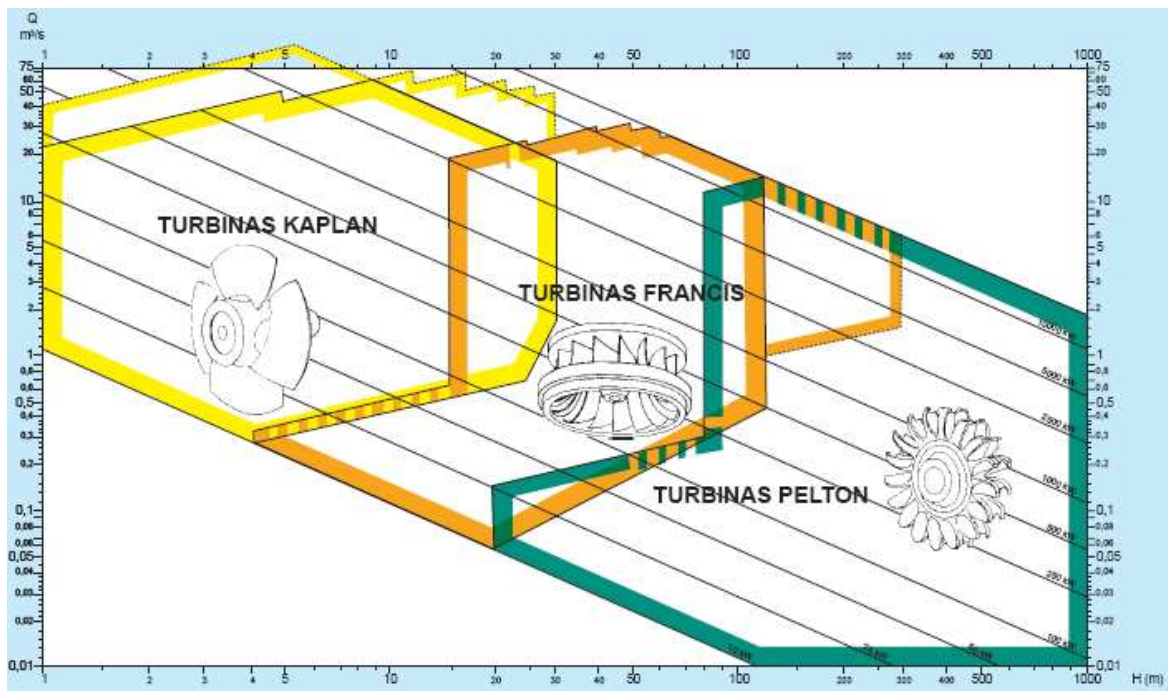
Turbinas hidráulicas

Son máquinas que transforman la energía hidráulica en energía mecánica de rotación en su eje. En otras palabras, son los mecanismos mecánicos que proveen la energía necesaria para hacer girar el generador. Pueden ser de tres tipos:

- Pelton: Son ruedas de impulso que se emplean cuando la caída es grande y el caudal pequeño. Permiten una gran flexibilidad de funcionamiento, al ser capaces de turbinar hasta el 10% de su caudal nominal con rendimientos óptimos y usualmente son de eje horizontal.
- Francis: llamada también turbina de reacción, de remolino o de vórtice; se emplean en caídas medianas y con caudales también medianos. Usualmente son de eje vertical. Su rango de funcionamiento es aceptable, siendo capaces de turbinar hasta el 40% del caudal nominal de la turbina.

- Kaplan: Son turbinas Francis modificadas para caídas muy pequeñas, generalmente inferiores a 50 metros, y caudales muy grandes. La gama de funcionamiento es muy alta siendo capaces de turbinar hasta el 25% del caudal nominal de la turbina.

Figura A7. Selección del tipo de turbina (Cortesía de VOEST-ALPINE)



Fuente: Ente Vasco de la Energía (EVE). *Minihidráulica en el país Vasco*. División de investigación y recursos. Bilbao, Noviembre de 1995, p.26.

Generadores

Son un grupo de aparatos que se utilizan para convertir la energía mecánica en eléctrica, o a la inversa, con medios electromagnéticos. Se les denomina también alternadores o dínamos y están constituidas básicamente por dos elementos: el estator (que es externo y estático) y el rotor, que es interno y gira dentro del primero.

Por lo general se utilizan generadores síncronos, sin embargo también, aunque en raras ocasiones, es posible el uso de máquinas asíncronas.

Figura A8. Unidades turbogeneradoras



A.2 Control y protección de los sistemas hidroeléctricos

Los sistemas de control de las plantas hidroeléctricas están constituidos de los siguientes niveles de protección y regulación:

Primer Nivel

Desde un centro de control que supervisa en tiempo real el estado del sistema mediante medidas teletransmitidas y eficazmente procesadas se controlan y vigilan los elementos que componen el esquema principal del sistema.

Segundo Nivel

Los sistemas de control instalados en las centrales de protección son:

1. *Regulación de velocidad:* Se hace variando la posición de los alabes del distribuidor y, en consecuencia, se controla la cantidad de agua admitida en el rodete por medio de un regulador automático que reacciona

instantáneamente a las variaciones de velocidad. Se comprende que no es posible mantener una velocidad constante luego de una variación de la carga puesto que la acción del regulador es una consecuencia de una variación de velocidad de la turbina. Sin embargo, para llevar la velocidad de rotación, acelerada (o desacelerada) por la variación de la carga a su valor de régimen especificado, debe actuar el regulador automático o gobernador con la celeridad y capacidad requeridas.

2. *Regulación de presión:* Para reducir las variaciones de presión en un conducto forzado, causada por admisión o cierre brusco de la admisión de las turbinas, debidas a su vez a demanda o supresión instantánea de una porción de la carga, usualmente se emplean mecanismos como chimeneas de equilibrio (o almenaras). La capacidad de descarga de estos reguladores es siempre suficientemente grande para reducir los aumentos de presión a una pequeña porción de la carga, menor generalmente que la considerada en el caso experimental, aún para un cierre total a plena carga.
3. *Regulación de tensión:* Es importante para la seguridad del sistema y para garantizar una razonable calidad en la entrega del suministro que las tensiones del sistema permanezcan dentro de ciertos márgenes permitidos.

Tercer Nivel

Consta de los equipos de control, protección y maniobra en las redes y en las subestaciones orientados a proteger el sistema de los cortocircuitos en las líneas o en las barras de subestaciones.

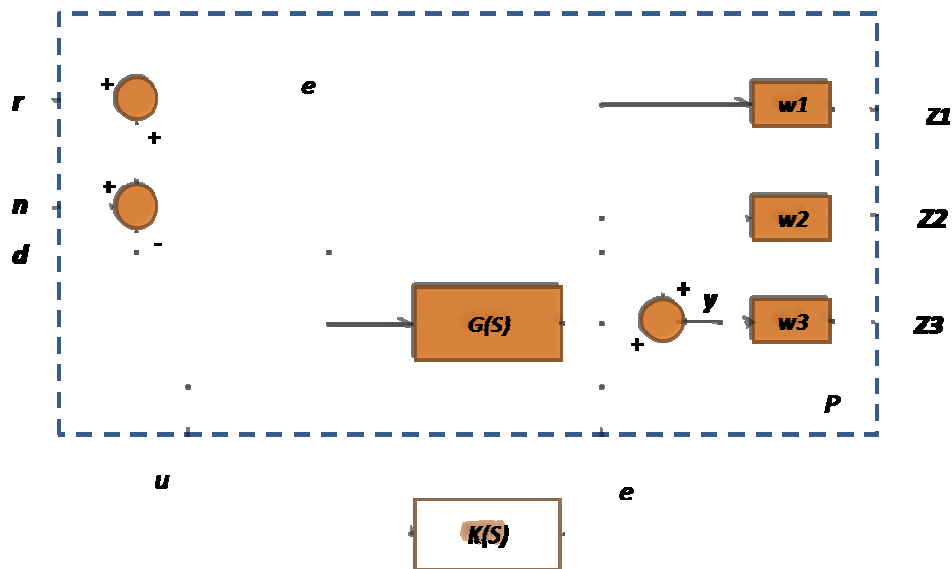
Anexo B

Síntesis de Controladores H_∞

B.1 Introducción al control H_∞

El método de optimización de sistemas de control H_∞ está relacionado con la minimización del valor pico de la respuesta en frecuencia de cierta función en lazo cerrado. Para tal objetivo se introducen en el sistema funciones de ponderación W_i que reflejen los objetivos de diseño y también el conocimiento que se posee de las señales de entrada y de salida. Dichas señales serán acotadas pues en el cálculo del controlador robusto H_∞ la norma $\| \cdot \|_\infty$ de cada señal tiene como límite superior la unidad.

Figura B1. Configuración general para problemas de control H_∞



La inclusión de funciones de ponderación en una configuración general de realimentación se puede observar en la figura B1. Como se puede ver las señales de entrada son respectivamente la señal de referencia (r), el ruido (n) y las perturbaciones a la salida; y las salidas ponderadas del sistema son z_1 , z_2 y z_3 .

Los objetivos y metas del diseño deben ser especificados claramente y evaluados ante el modelo de la planta para analizar su aceptación. Considerando el sistema generalizado $P(s)$ mostrado en la figura B2 el problema del diseño del controlador H_{∞} radica en encontrar todos los compensadores admisibles $K_{\infty}(s)$ que estabilizan internamente el sistema y minimicen la norma:

$$\|T_{zw}\|_{\infty} = \text{Sup}_w \bar{\sigma}[T_{zw}] \quad (1)$$

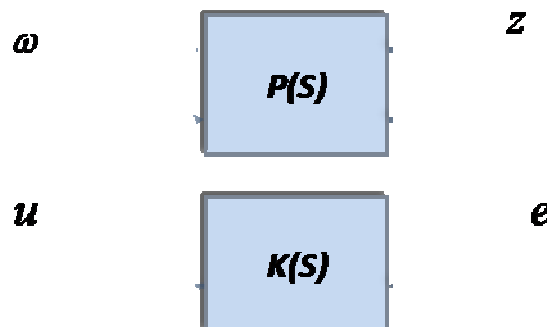
Donde T_{zw} denota la matriz función de transferencia desde w a z .

B.2 Planta aumentada

La planta P generalizada de la figura B2 puede escribirse de la siguiente forma:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Figura B2. Planta generalizada y regulador



De aquí se obtiene que:

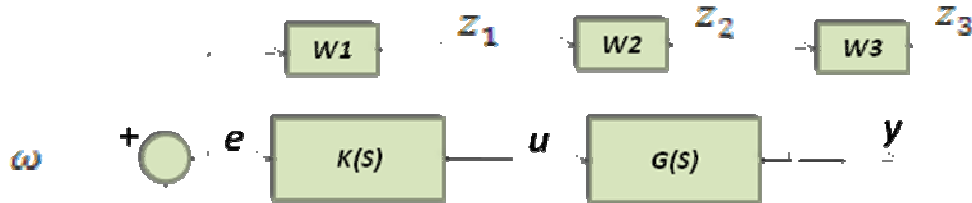
$$\begin{aligned} z &= P_{11}w + P_{12}u \\ e &= P_{21}w + P_{22}u \\ u &= Ke \end{aligned} \quad (3)$$

Sin embargo, a partir del modelo de la figura B3 tenemos que:

$$\begin{aligned} z_1 &= W_1(w - Gu) \\ z_2 &= W_2 u \end{aligned} \quad (4)$$

$$z_3 = W_3 G u$$

Figura B3. Sistema de control con funciones de ponderación



Donde la variable z de la ecuación (3) se representa por la siguiente matriz:

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

A partir de esto obtenemos:

$$P_{11} = \begin{bmatrix} W_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; P_{12} = \begin{bmatrix} -W_1 G \\ W_2 \\ W_3 G \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$P_{21} = I; P_{22} = -G$$

B.2 Problema del control H_∞ en el espacio de estados

Si asumimos que $x \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estado de la planta, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ es la entrada de control y que $e \in \mathbb{R}^p$ es la entrada del controlador el sistema de la figura B3 puede ser descrito de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_1 w + B_2 u \\ z &= C_1 x + D_{11} w + D_{12} u \quad (7) \\ e &= C_2 x + D_{21} w + D_{22} u \\ u &= Ke \end{aligned}$$

O en forma abreviada como,

$$P(s) \equiv (A_P, B_P, C_P, D_P)$$

Con,

$$B_P = [B_1 \ B_2]; C_P^T = [C_1 \ C_2]$$

$$D_P = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix}$$

Al sustituir la ecuación (7) obtenemos la siguiente representación de matriz de función de transferencia T_{zw} :

$$z = T_{zw}w \quad (8)$$

Donde

$$T_{zw} = [P_{11} + P_{12}K(I - P_{22}K)^{-1}P_{21}] \quad (9)$$

Esta última matriz de transferencia se conoce como transformación lineal fraccionaria y a partir de ella se plantea encontrar un regulador K que minimice la norma H_∞ de la función de transferencia que relaciona a w con z , bajo la restricción de que estabilice a P .

Las suposiciones supuestas para las matrices de estado de la planta ampliada $P(s)$ son las siguientes:

- 1) Los pares (A_P, B_1) y (A_P, B_2) son estabilizables.
- 2) Los pares (C_1, A_P) y (C_2, A_P) son detectables.
- 3) $D_{12}^T C_1 = 0$ y $D_{12}^T D_{12} = I$
- 4) $B_1 D_{21}^T = 0$ y $D_{21} D_{21}^T = I$
- 5) $D_{11} = 0$ y $D_{22} = 0$

Anexo C

Diseño de la interfaz gráfica

Para la realización del programa el software cuenta con una interfaz gráfica de cinco (5) ventanas. Dichas ventanas son las siguientes:

1. Ventana de inicio.
2. Ventana de introducción.
3. Ventana para la introducción de los parámetros de la planta.
4. Ventana para el análisis del desempeño del controlador.
5. Ventana para el modelado de la incertidumbre y prueba del controlador bajo valores no nominales.

C.1 Ventana de inicio

En la figura C1 se muestra la ventana de inicio del programa. Allí aparece el título del trabajo de grado, nombre del autor y del director de proyecto y de la entidad propietaria del mismo. Esta ventana permanece abierta durante 8 segundos y después de cerrada instantáneamente se abre la ventana de introducción.

Figura C1. Ventana de inicio



Para desplegar el título de la ventana de inicio, por ejemplo, se empleó la siguiente secuencia:

```
% A.3. Creación de una Etiqueta para Desplegar el texto:
% "HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE CONTROLADORES ROBUSTOS HINF"
%
%Definición de la posición de la etiqueta
posx = (tVentLar - .9*tVentLar)/2;
posy = (tVentAlt - 0.1*tVentAlt);
largo = .9*tVentLar;
alto = 0.0434028*tVentAlt;

uicontrol('style','text','position',[posx,posy,largo,alto],'fontName',...
    'verdana','fontSize',15,'fontWeight','bold','string',...
    {'HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL DISEÑO AUTOMATICO'},...
    'backgroundColor',[.7098,.7529,.8824],'foregroundColor',[0.2,0.2,0.6]);

posx = (tVentLar - .82*tVentLar)/2;
posy = (tVentAlt-0.18*tVentAlt);
largo1 = 0.8*tVentLar;

uicontrol('style','text','position',[posx,posy,largo1,alto],'fontName',...
    'verdana','fontSize',15,'fontWeight','bold','string',...
    {'DE CONTROLADORES ROBUSTOS HINF PARA
MICRO'}, 'backgroundColor',[.7098,.7529,.8824],...
    'foregroundColor',[0.2,0.2,0.6]);

posx = (tVentLar - .82*tVentLar)/2;
posy = (tVentAlt-0.26*tVentAlt);
largo1 = 0.8*tVentLar;
alto=0.05*tVentAlt;
uicontrol('style','text','position',[posx,posy,largo1,alto],'fontName',...
    'verdana','fontSize',15,'fontWeight','bold','string',...
    {'Y PEQUEÑAS CENTRALES
HIDROELECTRICAS'}, 'backgroundColor',[.7098,.7529,.8824],...
    'foregroundColor',[0.2,0.2,0.6]);
```

Para crear las demás etiquetas de texto se emplean secuencias con la misma estructura. Sin embargo, para desplegar imágenes se emplean otro tipo de secuencias. En la ventana de inicio, por ejemplo, para cargar las imágenes de UIS y E3T se utiliza la siguiente secuencia:

```
% % A.2. Creación de un Control Axes para Desplegar Imagenes de UIS y E3T
anchol = tVentLar/4;
alto1 = tVentAlt/4;
Figura_uis = axes('units','pixels','color',[1,1,1],...
    'position',[0,0,anchol,alto1],'XTick',[],'YTick',[],'XColor',...
    [.7098,.7529,.8824],'YColor',[.7098,.7529,.8824]);
[x,map]=imread('uis2.jpg','jpg');
%Representamos imagen en figura, con su mapa de colores
image(x),colormap(map),axis off,hold on
```

```

set(Figura_uis, 'XTick', [], 'YTick', []);

ancho2 = tVentLar/5.5;
alto2 = tVentAlt/5;
posx = tVentLar - ancho2;
posy = tVentAlt - 0.99*tVentAlt;

Figura_e3t = axes('units','pixels','color',[1,1,1] ,...

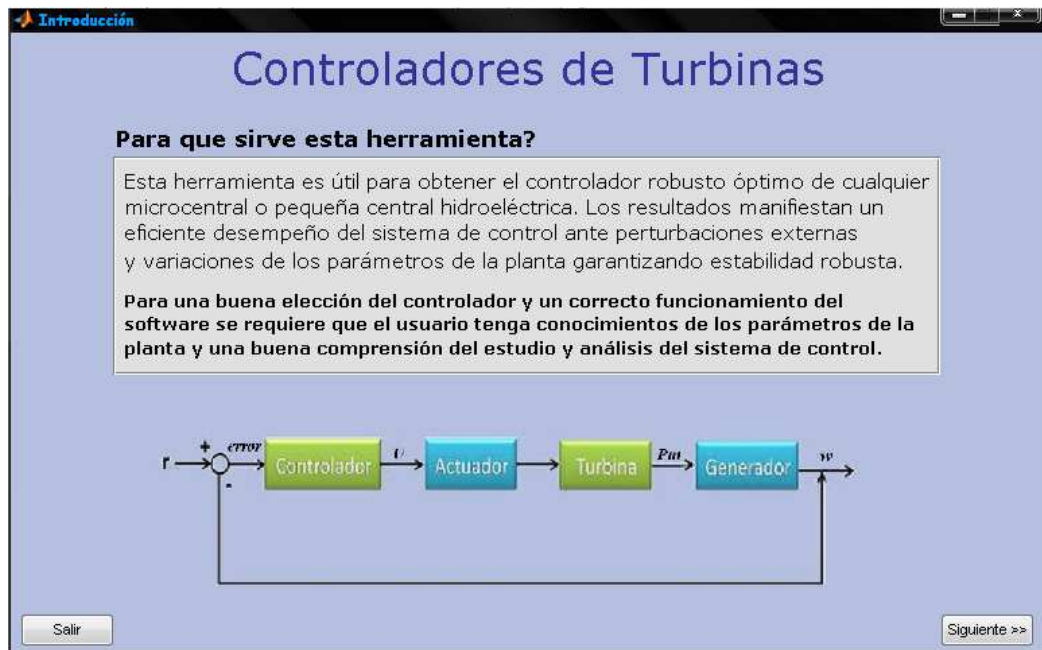
'position',[.935*posx,posy,ancho2,alto2], 'XTick', [], 'YTick', [], 'XColor',...
    [.7098,.7529,.8824], 'YColor', [.7098,.7529,.8824]);
[y,map]=imread('e3t2.jpg','jpg');
%Representamos imagen en figura, con su mapa de colores
image(y),colormap(map),axis off,hold on
set(Figura_e3t, 'XTick', [], 'YTick', []);

```

C.2 Ventana de introducción

En esta ventana se explica la utilidad que tiene la herramienta software y su desempeño y algunas recomendaciones que el usuario debe tener en cuenta para su correcto funcionamiento. En la figura C2 se visualiza dicha ventana y se puede apreciar que consta de dos botones, uno para salir del programa y otro para avanzar a la siguiente interfaz y de una representación en diagrama de bloques del sistema de generación.

Figura C2. Ventana de introducción



Para crear ambos botones se utiliza el comando *uicontrol* que permite la creación de diversos tipos de control, obteniéndose de esta manera la siguiente secuencia de código:

```
% B.6. Creación del Botón (Siguiete>>)
posxbsi = tVentLar*0.9;
posybsi = tVentAlt*0.01;
largobsi = 0.0911458*tVentLar;
altobsi = 0.0542534*tVentAlt;

boton1 =
uicontrol('style','pushbutton','pos',[posxbsi,posybsi,largobsi,altobsi],'parent',...
Vent_int,'string','Siguiete
>>','backgroundColor',[.7098,.7529,.8824],'callback',@siguiete1);

% B.7. Creación del Botón (Salir)
posxbsa = tVentLar*0.01;
posybsa = tVentAlt*0.01;
largobsa = largobsi;
altobsa = altobsi;

boton_salir =
uicontrol('style','pushbutton','pos',[posxbsa,posybsa,largobsa,altobsa],'parent',Vent_int,'string','Salir','backgroundColor',[.7098,.7529,.8824],'callback',@salir);
```

C.3 Ventana Parámetros de la planta

Al presionar el botón *siguiete* de la ventana de Introducción se genera la ventana donde se ingresan los datos de los parámetros que caracterizan la planta hidráulica. Como se puede apreciar en la figura 18, esta ventana consta de siete (7) paneles de control y cuatro (4) botones.

En el panel de control *Modelo* se selecciona uno de los tres modelos de turbinas hidráulicas a trabajar: sin almenara (elástico o inelástico) o con almenara (inelástico). El panel de control *Planta y actuador* contiene las variables de la planta y el actuador: salto o altura efectiva (H_b), caudal base turbinado (Q_b), eficiencia de la central (ef), constante de tiempo de la válvula (T_v), velocidad de la turbina en r.p.m. (N) y el factor de potencia del sistema de generación (fp).

Figura C3. Ventana de Parámetros de la Planta

En los módulos *Tubería forzada* y *Túnel y almenara* se especifican los parámetros de las tuberías y la almenara (en el caso de que haya) de la planta hidráulica, como coeficientes de fricción, longitudes, diámetros y grosores, módulo de elasticidad, etc. Con respecto al módulo de elasticidad del material de la tubería se cuenta con una tabla (ver tabla 1) de los materiales más empleados en centrales hidroelectricas: Fundición, palastros de hierro y acero, hormigón, fibrocemento, PVC y polietileno de baja o de alta densidad son las siete opciones que existen.

En los paneles de control *Incertidumbre* y *Generador y carga* se definen los valores de incertidumbre de los parámetros de la planta que tienden a variar y las constantes que caracterizan el generador y la carga demandada, respectivamente. En el programa se permite una incertidumbre hasta el 15% del valor nominal del parámetro, valor suficiente para analizar la robustez de cualquier planta pues en una central hidroeléctrica las variaciones se presentan en largos períodos de tiempo por deterioro de las tuberías.

Por otra parte, para visualizar la potencia que genera la planta a partir de la introducción de los parámetros y la función de transferencia de la turbina hidráulica se emplea el panel de control *Función de Transferencia de la Planta*. Y si el usuario

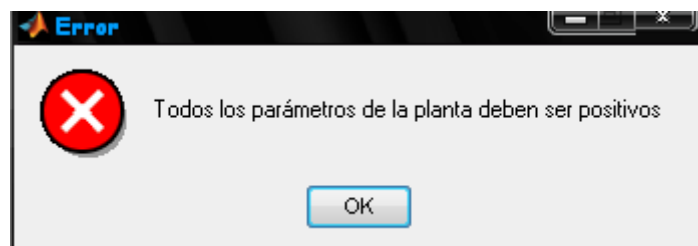
desea revisar una guía de ayuda para el uso de la herramienta computacional el software cuenta con un manual al que se puede acceder con solo presionar el botón *Manual* que aparece en la parte inferior.

5.2.3.1. Ventanas de mensajes

Para mostrar al usuario mensajes de error, avisos, de ayudas y de preguntas el programa cuenta con ventanas que muestran información. En esta interface de Parámetros de la Planta los mensajes que aparecen son:

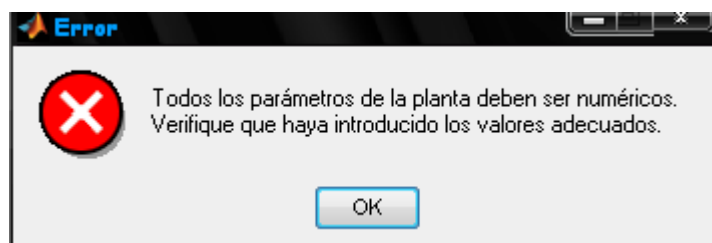
- ✓ Mensaje de error al introducir valores negativos en los parámetros de la planta.

Figura C4. Ventana de error cuando se ingresan números negativos



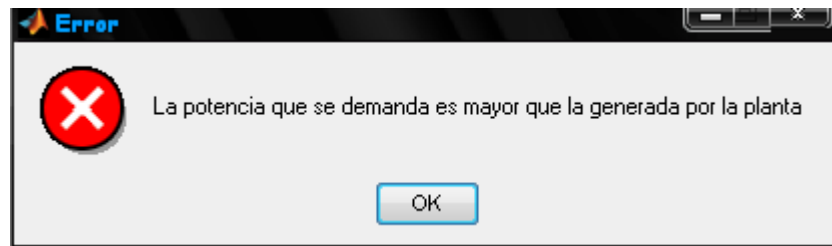
- ✓ Mensajes de error al dejar espacios sin llenar en las casillas o introducir letras o símbolos.

Figura C5. Ventana de error cuando se ingresan letras o no se ingresan todos los datos



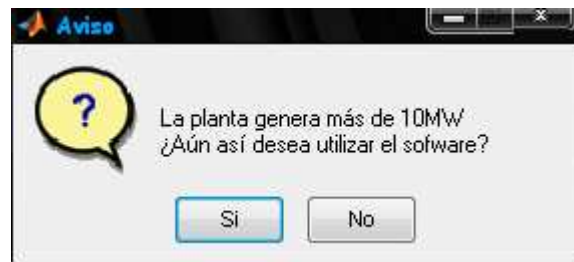
- ✓ Mensaje de error cuando la potencia que se demanda es mayor que la potencia que puede generar la central.

Figura C6. Ventana de error cuando la potencia generada es inferior a la demandada



- ✓ Mensaje de advertencia cuando la planta sobrepasa los 10MW de generación. En esta ventana el usuario tiene la opción de emplear o no el software aún cuando se trata de una central hidroeléctrica y no de una PCH.

Figura C7. Mensaje de advertencia cuando la planta sobrepasa los 10MW de generación



- ✓ Ventana para salir del programa. Con esta ventana el usuario tiene la opción de salir del programa. Esta opción también aparece en la última ventana.

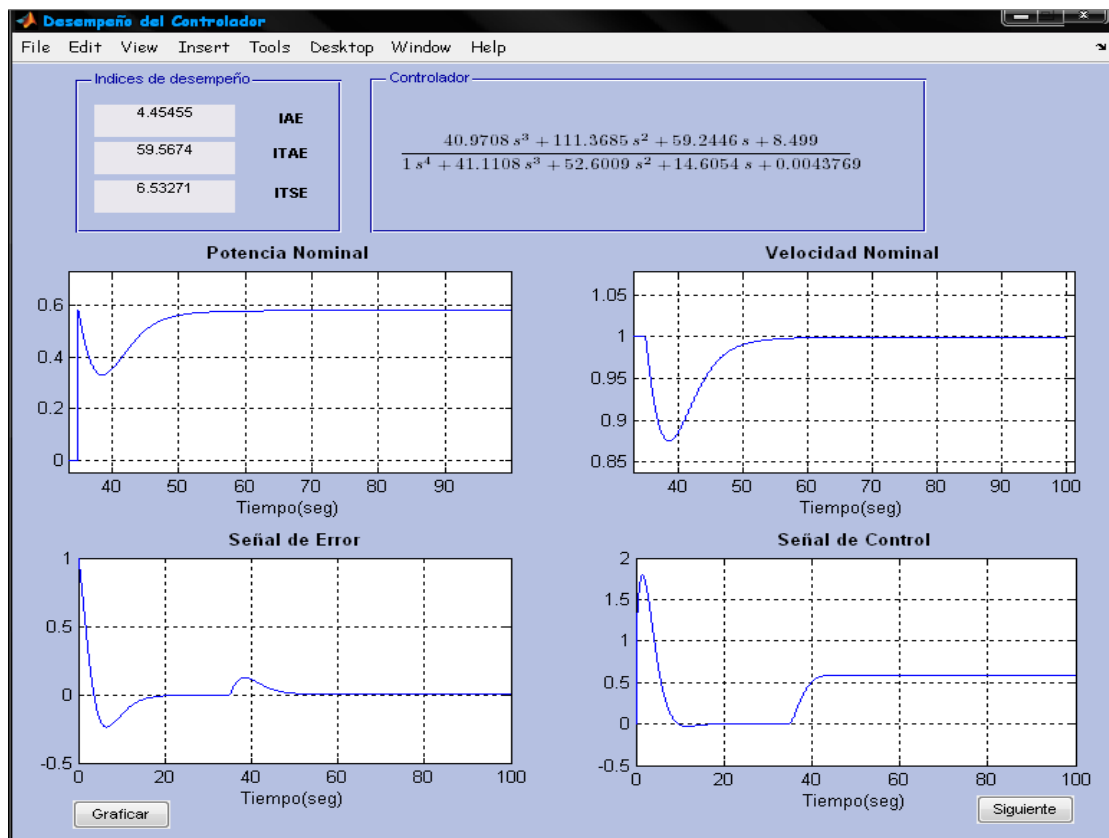
Figura C8. Ventana para salir del programa



C.4 Ventana Desempeño del Controlador

En esta ventana se presenta el resultado de los índices de desempeño calculados y la función de transferencia del controlador obtenido con el comando *Hinfopt* de MATLAB, así como las gráficas de la señal de error, la señal de control y la salida (velocidad y potencia nominales).

Figura C9. Ventana Desempeño del Controlador



El controlador calculado se transforma en un controlador de cuarto orden por medio de técnicas de reducción para que pueda ser fácilmente implementado en la industria. El procedimiento para calcular el controlador óptimo para la planta y reducirlo a uno de cuarto orden es el siguiente:

```
[A,B,C,D]=tf2ss(num,de)
SSG=mksys(A,B,C,D);
TSS=augtf(SSG,w1,w2,w3);
[gamma,controller,closed_loop]=hinfopt(TSS);
fprintf('Ecuaciones de estado:')
[a1,b1,c1,d1]=branch(controller)
fprintf('Sistema de control:')
```

```
[nu,de]=ss2tf(a1,b1,c1,d1);
control=tf(nu,de);
[Kred,redinfo] = reduce(control,4);
z=tf(Kred);
```

Donde las matrices A, B, C y D son las matrices de estado que describen la dinámica del sistema a controlar (válvula, turbina, y generador) y las funciones w_1 , w_2 y w_3 hacen referencia a las funciones de ponderación para el error, la señal de control y la salida.

Los índices de desempeño y las gráficas son generados desde un archivo en Simulink que contiene y simula el diagrama de bloques del sistema completo y guarda las variables en bloques llamados WorkSpaces. Desde la interfaz el software ejecuta el archivo en Simulink e imprime los resultados guardados en cada Workspace.

Además, el software cuenta con una barra de herramientas que le permite al usuario trabajar con una interfaz amigable en la que puede estudiar y analizar las gráficas obtenidas y comprender de manera práctica el comportamiento del sistema de control.

C.5 Ventana de Incertidumbre y datos de entrada

En esta ventana se trazan las gráficas que describen la respuesta del sistema de control (potencia y velocidad) ante incertidumbres en los parámetros de la planta. Para observar las gráficas de una manera clara y organizada se visualizan cuatro muestras al azar, el valor nominal y el peor de los casos. Todas diferenciadas con diversos colores para una mayor claridad, como se observa en la figura C10.

La secuencia de código empleada para generar estas gráficas es la siguiente:

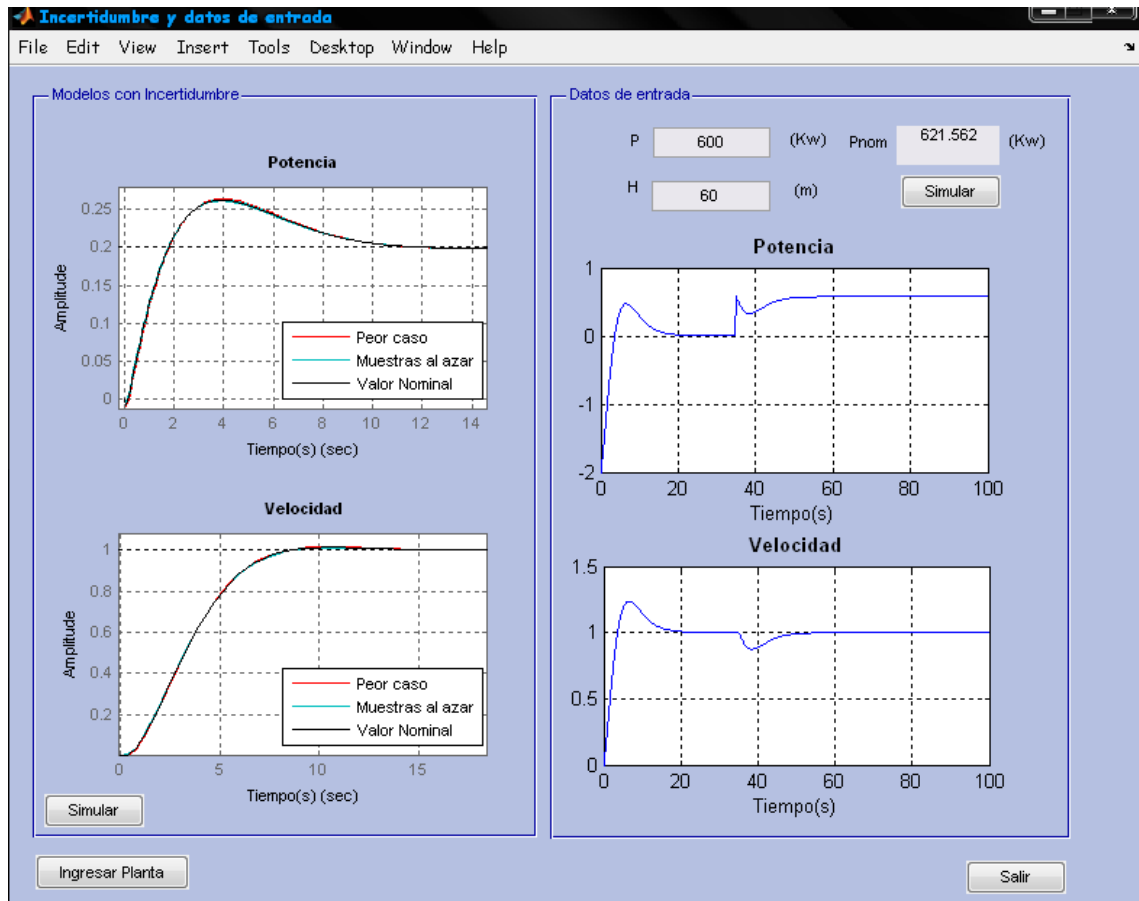
```
[PeakGainp,Uwcp] = wcgain(scp);
Twcp=usubs(scp,Uwcp); % Worst case closed-loop system
incp=usample(scp,4);
axes(handles.axes5);
subplot(2,1,1);step(Twcp,'r',incp,'c',scp.Nominal,'k',40)
title('Potencia','FontWeight','bold')
xlabel('Tiempo(s)')
grid
legend('Peor caso','Muestras al azar','Valor Nominal',4);
[PeakGaing,Uwcp] = wcgain(scg);
```

```

Twcg=usubs(scg,Uwcg); % Worst case closed-loop system
incg=usample(scg,4);
axes(handles.axes13);
subplot(2,1,2);step(Twcg,'r',incg,'c',scg.Nominal,'k',40)
legend('Peor caso','Muestras al azar','Valor Nominal',4);
title('Velocidad','FontWeight','bold')
xlabel('Tiempo(s)')
grid

```

Figura C10. Ventana de Incertidumbre y datos de entrada



Por otro lado, en el panel de control *Datos de Entrada* se mide el desempeño del controlador obtenido ante valores de potencia diferentes al nominal. Debido a que en algunos períodos del año la altura efectiva del salto y el caudal en la turbina varían, se cuenta con la opción de cambiar el valor de la altura neta y/o la potencia generada.

Anexo D

Manual de Usuario

**HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL DISEÑO AUTOMÁTICO DE
CONTROLADORES H_{∞} PARA MICRO Y PEQUEÑAS CENTRALES
HIDROELÉCTRICAS**

MANUAL DE USUARIO

JOSE JORGE CARREÑO ZAGARRA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2008**

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	92
1. FUNCIONES DEL PROGRAMA	92
2. REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA	93
3. INSTALACIÓN DEL PROGRAMA	93
4. EJECUCIÓN DEL PROGRAMA.....	93
4.1 Ventana de inicio.....	93
4.2 Ventana de introducción.....	94
4.3 Ventana para la introducción de los la planta.....	95
4.4 Ventana para la introducción de los la planta.....	96
4.5 Ventana para el modelado de la incertidumbre y prueba del controlador bajo valores no nominales.....	98
BIBLIOGRAFÍA	100

INTRODUCCIÓN

El programa es una herramienta que permite calcular automáticamente los parámetros de los controladores robustos de turbinas hidráulicas con capacidades de generación inferiores a 10MW. La herramienta sirve como una solución práctica y eficaz a la tediosa tarea de diseñar un controlador diferente para cada tipo de turbina, de generador y diferentes parámetros y condiciones de la planta.

1. FUNCIONES DEL PROGRAMA

La herramienta software cuenta con la habilidad de calcular automáticamente los parámetros de controladores robustos de turbinas hidráulicas para micro y pequeñas centrales hidroeléctricas. Esta herramienta es capaz de realizar las siguientes tareas:

- Calcular la función de transferencia del sistema hidroeléctrico a partir de los datos introducidos en el programa. Esta se caracteriza por ser una función de transferencia de fase no mínima.
- Calcular la función de transferencia del controlador H_{∞} óptimo que estabiliza la planta, a partir de los parámetros de la misma. Este controlador obtenido es reducido a un controlador de cuarto orden que podrá ser implementado en la industria.
- Evaluar los tres índices de desempeño *IAE*, *ITAE* e *ITSE* del sistema de control, con el fin de comparar la calidad de la regulación del controlador y el esfuerzo de control necesario para alcanzarla.
- Graficar las respuestas de la señal de error, la señal de control y la salida (potencia y velocidad nominales) del sistema de control para verificar la eficacia y exactitud del controlador robusto obtenido.
- Graficar la respuesta del sistema de control (potencia y velocidad) ante incertidumbres en los parámetros de la planta.

- Medir el desempeño del controlador obtenido ante valores de potencia y/o altura neta diferentes a la nominal.

2. REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

Requerimientos mínimos:

- Procesador Pentium III (o su equivalente) a 800MHz; 256MB memoria RAM.
- MATLAB 7.1. Version 7.1.0.246 (R14) Service Pack 3. Agosto 2/2005. (Para el modelado de la incertidumbre de los parámetros).
- Resolución de pantalla 800 x 600 píxeles.

3. INSTALACIÓN DEL PROGRAMA

Procedimiento a seguir:

1. Abrir el archivo *hydropower.zip* y extraer los archivos en la carpeta *work* de MATLAB.
2. Desde la línea de comando de MATLAB ejecutar el archivo *Introduccion*, con lo cual se abrirá la ventana de inicio del programa.
3. Desde este momento el programa se ha iniciado y está listo para usarse.

4. EJECUCIÓN DEL PROGRAMA

A continuación se explica de manera clara y detallada como emplear la herramienta computacional para el diseño de controladores de turbinas hidráulicas. Las ventanas que aparecen al ejecutar el programa son las siguientes:

4.1 Ventana de inicio

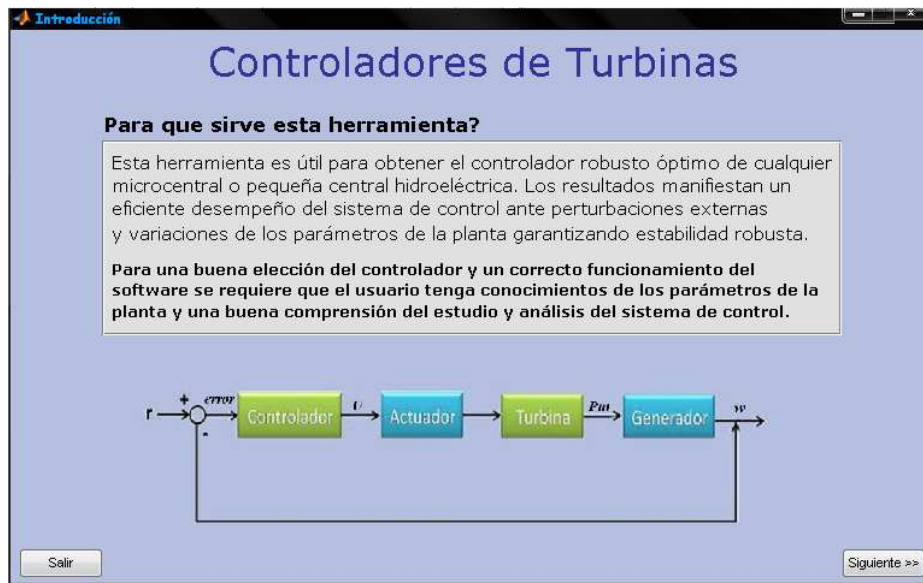
En la figura C1 se muestra la ventana de inicio del programa. Allí aparece el título del trabajo de grado, nombre del autor y del director de proyecto y de la entidad propietaria del mismo. Esta ventana permanece abierta durante 8 segundos y después de cerrada instantáneamente se abre la ventana de introducción.

Figura C1. Ventana de inicio

4.2 Ventana de introducción

En esta ventana se explica la utilidad que tiene la herramienta software y su desempeño y algunas recomendaciones que el usuario debe tener en cuenta para su correcto funcionamiento. En la figura C2 se visualiza dicha ventana y se puede apreciar que consta de dos botones, uno para salir del programa y otro para avanzar a la siguiente interfaz y de una representación en diagrama de bloques del sistema de generación.

Figura C2. Ventana de introducción



4.3 Ventana para la introducción de los parámetros de la planta.

Al presionar el botón *siguiente* de la ventana de Introducción se genera la ventana donde se ingresan los datos de los parámetros que caracterizan la planta hidráulica. Como se puede apreciar en la figura C3, esta ventana consta de siete (7) paneles de control y cuatro (4) botones.

Para el correcto funcionamiento del software se deben seguir los siguientes pasos:

1. Introducir cada uno de los valores de los parámetros según las unidades de medida que aparecen a la derecha de cada casilla. Dicho de otra manera, se deben ajustar los datos de la planta al sistema de unidades empleado por el software.
2. Debe tener en cuenta evitar introducir letras, valores negativos o no llenar alguna de las casillas.
3. En cada modelo aparecen por defecto valores de parámetros de plantas existentes, los cuales pueden ser modificados por el usuario según las necesidades y el tipo de central que tenga.
4. Presionar el botón *simular* después de haber introducido todos los datos.

5. En caso de seleccionar el modelo 3 que incluye almenara, para escoger el módulo de elasticidad del material se cuenta con la siguiente tabla:

Tabla C1. Valores del módulo de elasticidad para hallar la celeridad

Material de la tubería	ε (Kg/m ²)	K
Palastros de hierro y acero	$2 \cdot 10^{10}$	0.5
Fundición	10^{10}	1.0
Hormigón (sin armar)	$2 \cdot 10^9$	5
Fibrocemento	$1.85 \cdot 10^9$	5.5 (5-6)
PVC	$3 \cdot 10^8$	33.3 (20-50)
PE baja densidad	$2 \cdot 10^7$	500
PE alta densidad	$9 \cdot 10^7$	111.11

6. Presionar el botón *siguiente* después de que aparezcan impresos en la pantalla el valor de la potencia nominal de la planta y la función de transferencia obtenida a partir de los valores introducidos.

Figura C3. Ventana de Parámetros de la Planta

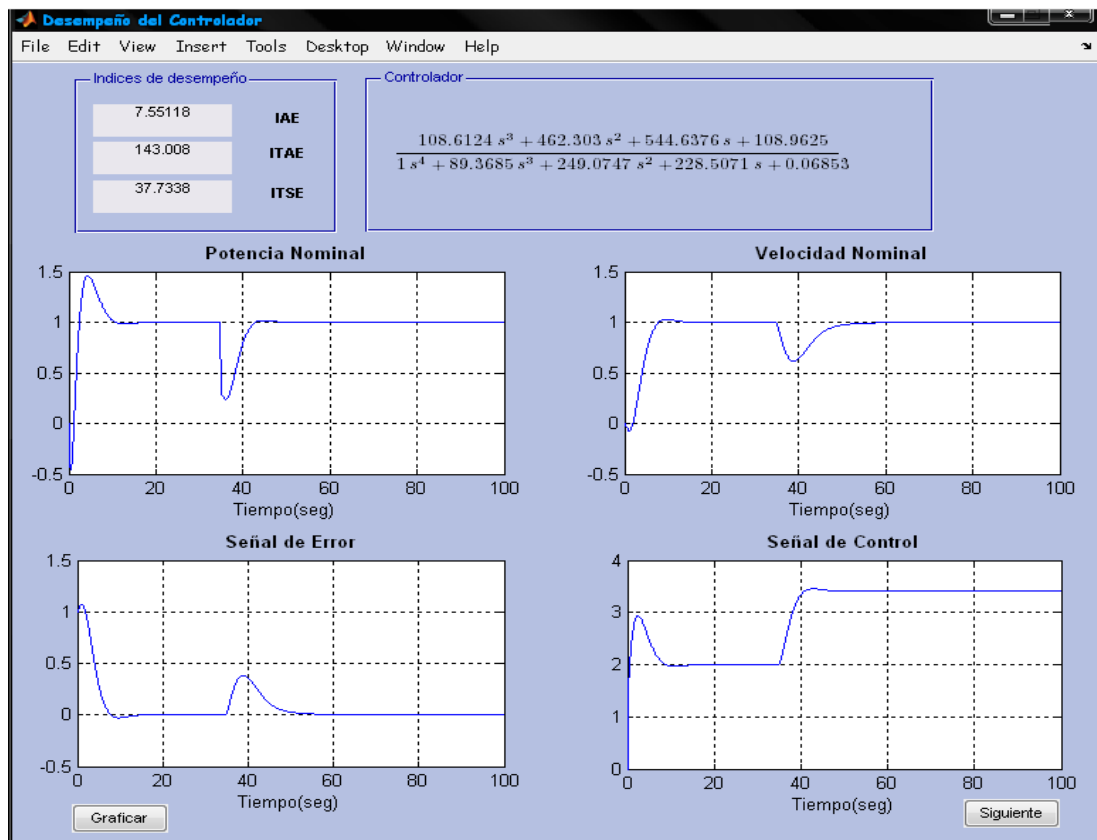
4.4 Ventana para el análisis del desempeño del controlador.

En esta ventana se presenta el resultado de los índices de desempeño calculados, la función de transferencia del controlador de cuarto orden obtenido y las gráficas de la señal de error, la señal de control y la salida (velocidad y potencia nominales) al presionar el botón *Graficar* que aparece en la parte izquierda inferior de la interfaz.

Además, en la parte superior de la interfaz aparece una barra de herramientas que le permite al usuario trabajar con un programa amigable en el que puede estudiar y analizar las gráficas obtenidas y comprender de manera práctica el comportamiento del sistema de control.

Esta barra de herramientas cuenta con ocho (8) íconos. Estos son: *File, Edit, View, Insert, Tools, Desktop, Window* y *Help*.

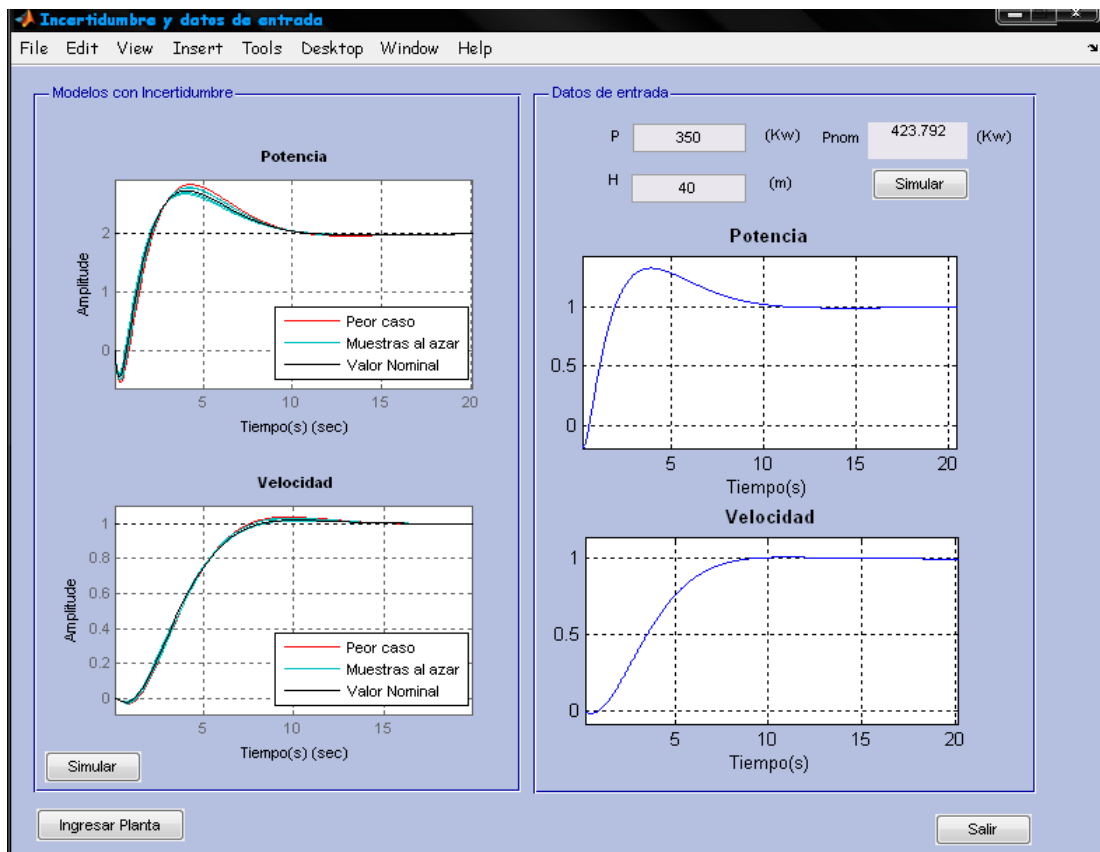
Figura C4. Ventana Desempeño del Controlador



4.5 Ventana para el modelado de la incertidumbre y prueba del controlador bajo valores no nominales

En esta ventana está constituida por dos columnas. En la primera columna, al presionar el botón *Simular*, se trazan las gráficas que describen la respuesta del sistema de control (potencia y velocidad) ante incertidumbres en los parámetros de la planta. Para observar las gráficas de una manera clara y organizada se visualizan cuatro muestras al azar, el valor nominal y el peor de los casos. Todas diferenciadas con diversos colores para una mayor claridad, como se observa en la figura C5.

Figura C5. Ventana de Incertidumbre y datos de entrada



En la columna derecha, en el panel de control *Datos de Entrada*, se mide el desempeño del controlador obtenido ante valores de potencia diferentes al nominal. Debido a que en algunos períodos del año la altura efectiva del salto y el caudal en la turbina varían, se cuenta con la opción de cambiar el valor de la altura neta y/o la potencia generada.

Después de haber llenado las dos casillas, Potencia y Altura, se presiona el botón *Simular* y aparecen automáticamente las simulaciones.

Además de esto, el usuario cuenta con la posibilidad de ingresar una nueva planta al presionar el botón *Ingresar Planta* que aparece en la parte inferior izquierda de la interfaz. O puede también presionar el botón *Salir* para abandonar la herramienta software.

BIBLIOGRAFÍA

- CARREÑO ZAGARRA, José Jorge. Herramienta Software para el diseño automático de controladores H_{∞} para micro y pequeñas centrales hidroeléctricas. Bucaramanga, 2008. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.