DESARROLLO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA INCREMENTAR LA EFICIENCIA DE UNA PCH

CÓDIGO DE PROYECTO: PG-19-1-13

GORDILLO AGUDELO JOSÉ ALEJANDRO

CÓDIGO: 1411319

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1.026.588.846

GARZÓN TRIANA FABIAN ALEJANDRO

CÓDIGO: 1410726

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1.014.278.554

MORA CRUZ MILLER FABIAN

CÓDIGO: 1411216

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1.018.482.627

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

BOGOTÁ, D.C.

2020

DESARROLLO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA INCREMENTAR LA EFICIENCIA DE UNA PCH

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO DE LA UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA

GORDILLO AGUDELO JOSÉ ALEJANDRO

CÓDIGO: 1411319

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1.026.588.846

GARZÓN TRIANA FABIAN ALEJANDRO

CÓDIGO: 1410726

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1.014.278.554

MORA CRUZ MILLER FABIAN

CÓDIGO: 1411216

IDENTIFICACIÓN: C.C. 1.018.482.627

DIRECTOR:

ING. DAVID HERRERA ALFONSO

CODIRECTOR

ING. CAROLINA SANDOVAL MEJÌA

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

BOGOTÁ, D.C.

2020

NOTA DE ACEPTACIÓN

Una vez realizada la revisión metodológica y técnica del documento final de proyecto de grado, doy constancia de que él (los) estudiante (s) ha cumplido a cabalidad con los objetivos propuestos, cumple a cabalidad con los Lineamientos de Opción de Grado vigentes del programa de Ingeniería Mecatrónica y con las leyes de derechos de autor de la República de Colombia, por tanto, se encuentra(n) preparado(s) para la defensa del mismo ante un jurado evaluador que considere idóneo el Comité de Investigaciones del Programa de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Piloto de Colombia.

ING. DAVID HERRERA ALFONSO

Director del Proyecto

ING. CAROLINA SANDOVAL MEJÌA

Codirector del Proyecto

DEDICATORIA

Dedicamos esta tesis a nuestros amigos quienes fueron un gran apoyo emocional, con aquellos que compartimos momentos inmemorables en el transcurso de la Universidad esos pilares incondicionales, la segunda familia la que por decisión propia cada uno escogemos en la vida las voces de aliento mientras redactábamos esta tesis.

A nuestros padres quienes nos apoyaron todo el tiempo.

A nuestros maestros quienes nunca desistieron al enseñarnos, aun sin importar que muchas veces no estuviésemos en clase, a ellos que continuaron depositando su esperanza en mí.

A todos los que nos apoyaron para escribir y concluir esta tesis.

Para ellos es esta dedicatoria de tesis, pues es a ellos a quienes se las debo por su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por ser nuestra guía y acompañarnos en el transcurso de nuestras vidas, brindándonos paciencia y sabiduría para culminar con éxito nuestra tesis.

A nuestros padres por ser unos pilares fundamentales y habernos apoyado incondicionalmente.

También a nuestro director de tesis Ing. David Herrera Alfonso quien con su experiencia, conocimiento y motivación nos orientó en la investigación además de ser un apoyo emocional motivándonos a continuar en cada reunión. A la Ing. Carolina Sandoval por sus consejos, enseñanzas, apoyo y sobre todo, el modo de afrontar problemáticas desde otro punto de vista.

Finalmente, a todos los docentes que con su sabiduría, conocimiento y apoyo, que nos motivaron para alcanzar el nivel profesional en la Universidad Piloto de Colombia.

TABLA DE CONTENIDO

PÁG.

NOTA DE ACEPTACIÓN

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

LISTA DE TABLAS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE ANEXOS

INTRODUCCIÓN 3

RESUMEN 6

ABSTRACT 6

1. CAPÍTULO 1: GENERALIDADES 7

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 7

1.1.1 Antecedentes del Problema 7

1.1.2 Descripción del problema 8

1.1.3 Formulación del problema 8

1.1.4 Línea de investigación del programa 9

1.2 JUSTIFICACIÓN 9

1.3 OBJETIVOS 10

1.3.1 Objetivo General 10

1.3.2 Objetivos específicos 10

1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES 10

1.4.1 Alcances.....10
1.4.2 Limitaciones 11
1.5 MARCO REFERENCIAL.....11
1.5.1 Marco Teórico 11
1.5.2 Estado del arte 14
2 CAPÍTULO 2: COMPONENTES Y VARIABLES DE UNA PCH.....17
2.1 ESTIMACIÓN DE ALTURA MÁXIMA DE LA REPRESA. 17
2.2 MODELADO DE LA TURBINA.....18
2.3 MODELO DEL GENERADOR.....25
3 CAPÍTULO 3: CONTROLADORES Y RESPUESTA DEL SISTEMA.....33
3.1 DIAGRAMAS DE BLOQUES.....33
3.2 DISEÑO DE CONTROLADORES 35
3.2.1 Parámetros de diseño 35
3.2.2 Método de Ziegler & Nichols 36
3.2.3 Descripción del método lugar de las raíces.....37
3.2.4 Descripción de la herramienta sisotool 38
3.2.5 Valores esperados del generador 39
3.3 SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL.....39
3.3.1 PI con el método lugar de las raíces. 39
3.3.2 PID con el método lugar de las raíces 40
3.3.3 Ziegler & Nichols con el método curva de reacción 42
3.3.4 IMC con herramienta de sisotool.....44
3.3.5 LQG con herramienta de sisotool.....46
3.3.6 Loop shaping con herramienta sisotool.....48
4 CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.....50
4.1 TABLA COMPARACIÓN RESPUESTA CONTROLADORES.....50

4.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS CONTROLADORES 51

5 CAPÍTULO 5: EFICIENCIA 53

5.1 RELACIÓN CANTIDAD DE ENERGÍA GENERADA EN LA PCH CON Y SIN CONTROLADOR 53

6 CONCLUSIONES 56

7 RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS 57

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 58

ANEXOS 61

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Potencia de los tipos de centrales hidroeléctricas 12
Tabla 2. Gráfico de potencia contra altura de central hidroeléctrica en Pisba 17
Tabla 3. Datos relevantes de cada controlador sin filtro de saturación.....50
Tabla 4. Datos relevantes del controlador que excede la señal de control. 51
Tabla 5.Ventajas y desventajas de cada controlador.....51
Tabla 6.Comparación de controlador seleccionados 53

LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1: Central hidroeléctrica.....4
Ilustración 2. Comportamiento anual de la demanda de energía GWh.....9
Ilustración 3. Porcentajes de fuentes energéticas en Colombia 12
Ilustración 4. Esquema de una central hidroeléctrica.....13
Ilustración 5. Simulación de turbina con entrada al paso.....25
Ilustración 6. Efecto de la potencia sobre la frecuencia angular 30
Ilustración 7.Simulación del generador con entrada al paso.....32
Ilustración 8. Modelo matemático no controlado de la PCH 33
Ilustración 9. Diagrama de bloques en lazo abierto de función de transferencia unificada 33
Ilustración 10. Respuesta al paso de la planta en lazo abierto 34
Ilustración 11. Diagrama de bloques en lazo cerrado de función de transferencia y controlador.....34
Ilustración 12. Diagrama de flujo del método Ziegler & Nichols.....36
Ilustración 13. Diagrama de flujo del método de lugar de las raíces.....37
Ilustración 14.Diagrama de flujo del método de sisotool.....38
Ilustración 15. Respuesta al paso en lazo cerrado de función de transferencia con controlador PI.....39
Ilustración 16.Señal de control con controlador PI.....40
Ilustración 17. Respuesta al paso en lazo cerrado de función de transferencia con controlador PID.....41
Ilustración 18.Señal de control con controlador PID. 41
Ilustración 19.Respuesta al paso en lazo cerrado de función de transferencia con controlador Ziegler & Nichols.....42
Ilustración 20.Señal de control con controlador Ziegler & Nichols 43
Ilustración 21. Respuesta al paso en lazo cerrado de función de transferencia con controlador Ziegler & Nichols con bloque de saturación.....43

Ilustración 22. Señal de control con controlador Ziegler & Nichols con bloque de saturación 44
Ilustración 23.Respuesta al paso en lazo cerrado de función de transferencia con controlador IMC 45
Ilustración 24.Señal de control con controlador IMC.....46
Ilustración 25.Respuesta al paso en lazo cerrado de función de transferencia con controlador LQG 47
Ilustración 26.Señal de control con controlador LQG.....47
Ilustración 27.Respuesta al paso en lazo cerrado de función de transferencia con controlador Loop shaping 48
Ilustración 28.Señal de control con controlador Loop shaping.....49

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Algoritmo para la simulación de la turbina (MATLAB)

Anexo B. Algoritmo para la simulación del generador (MATLAB)

Anexo C. Algoritmo para la simulación del generador con turbina (MATLAB)

INTRODUCCIÓN

Colombia es un país con gran potencial hidroeléctrico, en la actualidad, aproximadamente el 70% de la energía eléctrica que es consumida en el país, proviene del recurso hídrico, según el Centro de Estudios en Medio Ambiente y Energías Renovables (CEMAER) [1]. En promedio, las grandes centrales hidroeléctricas de Colombia tienen una capacidad instalada de 96GW, más un aproximado de 25GW en las pequeñas centrales hidroeléctricas [1].

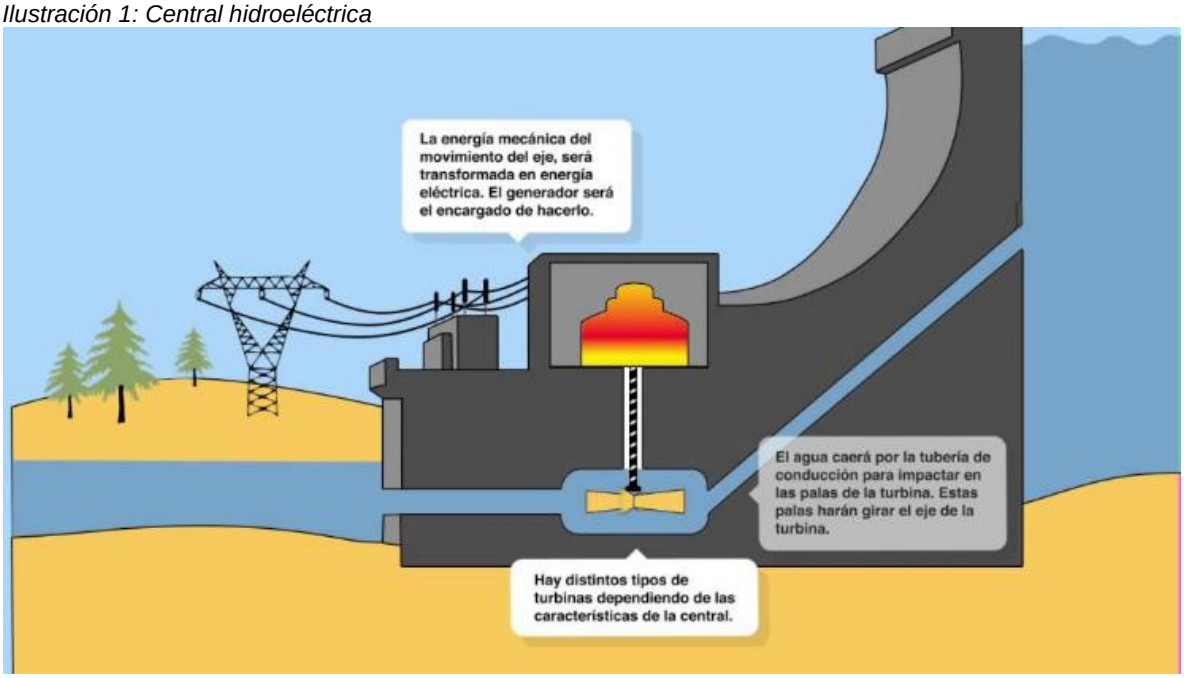
Es necesario conocer e identificar los elementos principales de una central hidroeléctrica, esto con el fin de realizar mejoras en la misma y lograr una mayor eficiencia; según Morales y Saavedra [2] junto con Mott [3]. básicamente, una central hidroeléctrica está compuesta por 3 elementos principales, como se explica a continuación, con su correspondiente ilustración:

En primer lugar, la presa, la cual se encarga de almacenar el agua y así mismo contener energía potencial que posteriormente y mediante una tubería se transforma en energía cinética para ser transferida a la turbina [4, p. 15].

Seguidamente, la turbina, una máquina que convierte la presión del fluido ejercido sobre las aspas, en potencia mecánica transferida en un eje el cual conecta directamente con el generador [4, p. 19].

Finalmente, el generador, una máquina que transforma la energía mecánica transferida por el eje mecánico interconectado, con la turbina a fin de transformarlo en energía eléctrica [4, p. 12].

Ilustración 1: Central hidroeléctrica



Tomado de: (CENTRO DE ESTUDIOS EN MEDIO AMBIENTE Y ENERGÍAS RENOVABLES (CEMAER). Energía Hidroeléctrica – Una Controversial Fuente de Energía [sitio web]; [Consultado: 2 de septiembre de 2019]. Disponible en: https://www.cemaer.org/energia-hidroelectrica-controversial-fuente/)

A la fecha, se han desarrollado diferentes estrategias tecnológicas con el fin de aumentar la cantidad de energía eléctrica a partir de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), por ejemplo, las cuales han modificado los elementos principales de la central como también, el diseño de las turbinas, el aumento del salto neto en la represa, el cambio de generadores más eficientes; sin embargo, estas mejoras representan un alto costo para la implementación en las anteriores. Altos costos en los que participa la mano de obra de operarios y tiempo de ejecución. Sin embargo, es necesario advertir que el desarrollo de estrategias de control permite mejorar la eficiencia de la PCH sin un prolongado tiempo de implementación, inclusive a bajo costo y no se requiere de mucha mano de obra.

Al momento de implementarse un controlador en una PCH se garantiza alcanzar una respuesta de diseño, la cual proporciona un mejor rendimiento de la PCH con las características de los elementos principales implementados en el momento y a su vez permite lograr que se alcance la cantidad máxima de generación de la anterior, sin ningún cambio sobre los elementos principales y se alcance mediante la señal de control una referencia esperada en este caso específicamente estaría retroalimentada, que mediante la apertura de una electroválvula, aumentará o disminuirá la potencia del sistema.

Este documento abarca desde la simulación y modelado matemático de una PCH, analizando el comportamiento dinámico y la eficiencia del sistema no controlado, hasta incluir estrategias de control con la finalidad de comparar ambos estados del sistema (controlado y no regulado), con el objetivo de estudiar el aumento de eficiencia en el anterior.

RESUMEN

La importancia del uso de las energías renovables ha tomado peso en los últimos años, esto debido a su uso en el campo de la generación de electricidad ,sin embargo, es necesario hacer uso eficientemente de este recurso puesto que el buen aprovechamiento de este recurso garantiza una mayor cantidad de generación eléctrica ; en este documento se expone la simulación de una Pequeña central hidroeléctrica (PCH), analizando los diferentes requerimientos de operación basándose en turbinas lineales existentes, con la finalidad de analizar la eficiencia con diferentes metodologías de control y seleccionar la que proporciona mejor eficiencia para resolver el problema.

Palabras Clave: Control, controlador en lazo cerrado, pequeñas centrales hidroeléctricas, **eficiencia, energía, matlab, simulink.**

ABSTRACT

The use of renewable energy has become important in recent years, this because of it is use in the field of electricity generation, however, it is necessary to make efficient use of this resource since the good use of this resource guarantees greater amount of electricity generation; This document shows the simulation of a small hydroelectric power station, analyzing the different operating requirements affected on the basis of linear turbines, for purpose to analyze the efficiency with different control methodologies and select the one that provides the best efficiency to solve the problem.

Keywords: Control, Closed loop system, small power plant, energy, matlab, simulink, efficiency.

1. CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1 Antecedentes del Problema

La energía hidráulica a proporcionado por décadas gran cantidad de la energía consumida por el ser humano lo que lleva a la construcción de nuevas centrales hidroeléctricas, sin embargo, el aumento de población año tras año lleva al interés del ser humano por desarrollar nuevas estrategias que aumenten la eficiencia de estas con el fin de suplir la demanda de la población.

Además, los estudios realizados hoy en día han llevado al resultado de que la cantidad de energía eléctrica depende de la eficiencia de la PCH y está a su vez la anterior pende de:

- Caída bruta: “Es la diferencia de cotas entre el nivel del agua en la toma y en la descarga.” [5, p. 3]
- Perdidas hidráulicas: Es referente al efecto de piezas y dispositivos intercalados en los conductos, tales como rejas, portones, válvulas y codos. [6, pp. 12-13]
- cabeza neta: “Es el salto neto para el que se diseña la turbina y con el que se consigue el punto de máxima eficiencia en la turbinación.” [5, p. 3]
- Eficiencia turbina-generador: La energía mecánica transmitida al generador a través del eje de la turbina es menor que la energía hidráulica disponible en la sección de entrada al rodete, debido a que en el interior de la turbina se generan las denominadas pérdidas manométricas, producidas por el rozamiento, el choque y los cambios de dirección del agua al entrar en contacto con los álabes de la turbina. La eficiencia o rendimiento hidráulico de la turbina, se define como el cociente entre el salto útil, o energía por unidad de masa transmitida al generador, y el salto neto, o energía por unidad de masa disponible a la entrada del rodete [7, p. 2].

En este documento se profundiza únicamente en el factor de la eficiencia turbina-generador puesto que los demás factores requieren modificaciones físicas en la estructura de la PCH, con el propósito de mejorar la eficiencia de esta, las estrategias de control son aplicadas en un modelo idealizado turbina-generador, usualmente, lo que se busca es alcanzar la velocidad máxima requerida para alcanzar la mejor eficiencia.

1.1.2 Descripción del problema

A la fecha algunas de las centrales hidroeléctricas no alcanzan su máximo aprovechamiento de energía eléctrica, esto depende de muchos factores tales como el diseño de la turbina, las pérdidas en tubería, fugas y eficiencia del generador.

De igual forma, los sistemas de control en las pequeñas centrales hidroeléctricas fueron diseñados en el momento de construcción, por ende, en el instante en el que nos encontramos se puede recurrir a métodos de control innovadores que permitan lograr, garantizar y aumentar la cantidad de energía generada por el mismo.

Una central hidroeléctrica que no alcance su máximo potencial de generación energética tiene como significado un gran desperdicio de aprovechamiento energético, el cual, a su vez representa un aumento en el costo de producción kW/hora, por esta razón, es indispensable desarrollar estrategias que garanticen tener la máxima eficiencia en la central.

1.1.3 Formulación del problema

Las PCH proporcionan gran cantidad de energía eléctrica a la población, sin embargo, en pocas ocasiones alcanzan su valor máximo de eficiencia por los siguientes factores, tales como, turbina-generador, cabeza neta, la caída bruta y perdidas hidráulicas.

En ese contexto, se puede lograr mejorar la eficiencia de una PCH sin necesidad de modificar la estructura ni realizar grandes cambios físicos y de materiales; por medio de sistemas de control se logra que el modelo turbina generador siempre alcance su máximo potencial puesto que finalmente la producción energética va directamente relacionada con la transformación de energía del generador.

Para esto es necesario diseñar un gobernador de velocidad mediante una estrategia de control, con el fin de regular el generador mediante la apertura de una electroválvula y de esta forma garantizar la máxima generación de energía eléctrica en la central.

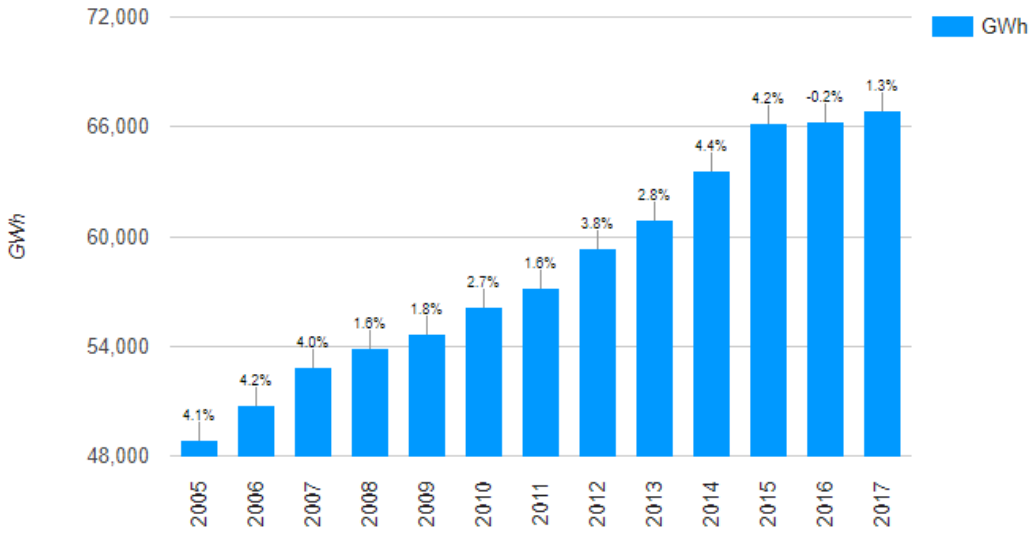
1.1.4 Línea de investigación del programa

Energías renovables.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Actualmente existen una gran cantidad de centrales hidroeléctricas las cuales generan alrededor del 60% de energía eléctrica consumida en el país [8, p. 42], sin embargo, Colombia se encuentra con una demanda lineal creciente de energía eléctrica, la cual, puede ser representada con la siguiente ilustración.

Ilustración 2. Comportamiento anual de la demanda de energía GWh



Tomado de: (XM. Informe de operación del SIN y administración del mercado 20179 [sitio web]; [Consultado: 5 de septiembre de 2019]. Disponible en: http://informesanuales.xm.com.co/2017/SitePages/operacion/4-1-Demanda-de-energia-nacional.aspx)

A la fecha existen una gran cantidad de centrales hidroeléctricas las cuales generan la mayor cantidad de energía eléctrica consumida en el país, sin embargo, algunas de estas centrales no aprovechan en su totalidad el recurso hídrico. Esta problemática puede significar un aumento de producción kW/hora y puede ser debido a los diferentes factores, tales como, eficiencia de turbina-generador, cabeza neta, la caída bruta y perdidas hidráulicas.

Desde la ingeniería mecatrónica se contempla cada rama implicada con los factores que afecta la eficiencia de la central, como son, el desarrollo de estrategias de control con el fin de regular la velocidad del generador hasta el cálculo de almacenamiento soportado por la estructura de la represa y pérdidas hídricas en el trazado de la tubería.

El presente proyecto busca aumentar la cantidad de energía generada mediante una central hidroeléctrica involucrando estrategias de control las cuales, no suponen un gran costo de implementación y que por el contrario brindan una mayor eficiencia para en una pequeña central hidroeléctrica.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

- Modelar y simular el comportamiento dinámico de una PCH con el fin de desarrollar estrategias de control para mejorar la eficiencia del sistema.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar la estructura, componentes, parámetros y variables de una PCH para delimitar el modelo a obtener.
- Modelar el comportamiento dinámico de una PCH con el objetivo de estimar la producción de energía mediante simulación.
- Diseñar y simular diferentes estrategias de control sobre el modelo dinámico de la PCH que permitan mejorar su eficiencia.
- Validar y comparar los controladores obtenidos para el sistema, analizando la cantidad de energía generada por la PCH de un estado no regulado y uno controlado por diferentes estrategias.

1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES

1.4.1 Alcances

- El proyecto investigativo abarca el diseño y modelamiento de una PCH para la generación de energía eléctrica.

- Este proyecto solo proporciona información de modelamiento y simulación de una PCH así mismo como implementar un controlador y comparar su comportamiento por medio de herramientas computacionales.

- Las variables para el diseño del modelo se basarán en datos de centrales hidroeléctricas reales.

1.4.2 Limitaciones

- Falta de datos para variables del modelo matemático

- Con el fin de lograr una simulación más acertada se deben obtener datos reales, los cuales no pueden ser obtenidas mediante mediciones propias, puesto que para obtener estas mediciones se debe contar con unos permisos especiales, por esta razón se hará uso de datos reales encontrados en artículos de centrales hidroeléctricas los cuales permiten asignarles un valor a esas variables.

- Modelar y simular el modelo de la PCH

- Se hará uso de software con vínculo directo a la Universidad como lo es Matlab/ Simulink para diseñar y analizar la respuesta del modelo dinámico.

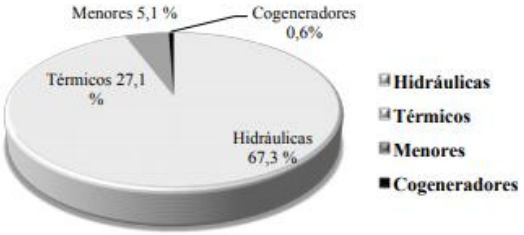
1.5 MARCO REFERENCIAL

1.5.1 Marco Teórico

La energía es una necesidad en la actualidad siendo uno de los pilares de los procesos industriales, fundamento para el desarrollo tecnológico. Según informes de la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), “la cobertura de energía eléctrica en el país alcanzó el 95,6 % a nivel nacional en 2012, el cual el sector residencial aporta alrededor de 11.569.602” *[8, p. 42]* el consumo de energía

eléctrica proporcionado por las siguientes fuentes de energía como se muestra en la siguiente ilustración.

Ilustración 3. Porcentajes de fuentes energéticas en Colombia



Tomado de: (CASTILLO, York; CASTRILLÓ, Melisa; VANEGAS-CHAMORRO, Marley; VALENCIA, Guillermo y VILLICAÑA, Eunice. Rol de las Fuentes No Convencionales de Energía en el sector eléctrico colombiano. Colombia: Universidad Autónoma del Caribe, 2015. p. 42.)

La ilustración 3, representa el recurso hídrico en mayor cantidad de energía eléctrica en el país, ubicando el presente proyecto de investigación como centro este recurso, con el fin de implementar métodos mediante los cuales se alcance el máximo aprovechamiento en la eficiencia de generación de energía.

La energía hidráulica, se define como la energía cinética aprovechada de una masa de agua, en la actualidad, las centrales hidroeléctricas hacen uso de represas las cuales aumentan la energía potencial, esto se debe al aprovechamiento de la altura generado por el fluido, para posteriormente hacer que el fluido en su caída pase por turbinas hidráulicas [3, pp. 166-168], el tamaño de estas centrales hidráulicas se representa por tres grandes familias las cuales se identifican por el rango de producción energética, como se evidencia en la tabla siguiente.

Tabla 1. Potencia de los tipos de centrales hidroeléctricas

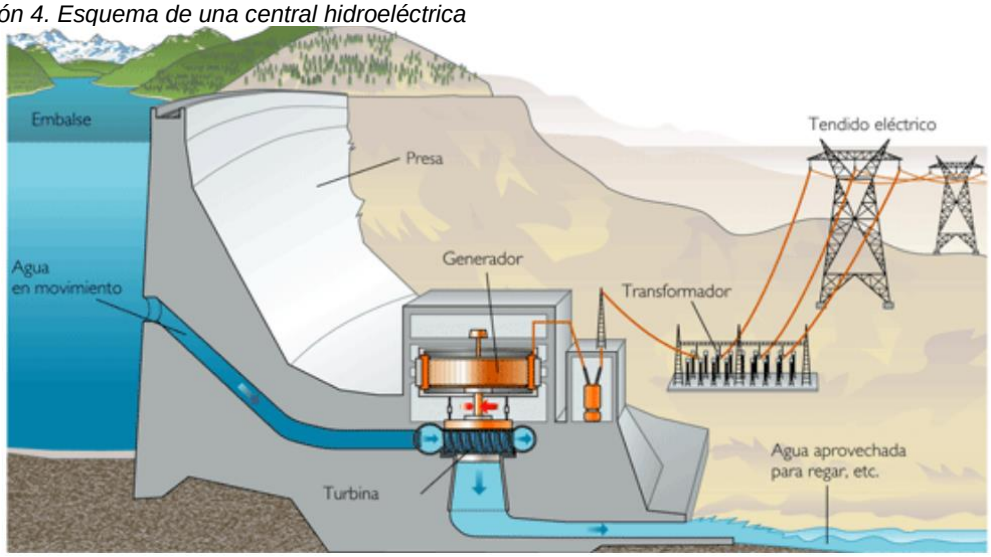
TIPOS	POTENCIA MW
MICROCENTRALES	Menores a 0,1
MINICENTRALES	De 0,1 a 1
PCH	De 1 a 10

Tomado de: (TORRES QUINTERO, Ernesto. Investigación de pequeñas centrales en Colombia. p. 02.)

Estas centrales de generación cuentan con los siguientes componentes sin importar su tamaño, mejor especificado más adelante en la ilustración 4, sin embargo, es importante conocer que para aumentar la eficiencia energética en

este tipo de centrales de generación de energía es relevante conocer el modelo matemático de estos componentes con el fin de obtener el mejor aprovechamiento.

Ilustración 4. Esquema de una central hidroeléctrica



Tomado de: (QUEZADA COBOS, Rómulo. Área de la energía, las industrias y los recursos no renovables. Ecuador: Universidad Nacional de Loja, 2013. p. 6.)

Es preciso identificar los componentes que se muestran en la ilustración 4, por lo que a continuación se muestra una breve descripción de los más importantes:

Primeramente, el embalse es un depósito de agua artificial proveniente de un río o arroyo, la cual se encuentra atrapada por una obra hidráulica llamada presa [4, p. 15]; la anterior se encarga de almacenar el agua y así mismo contener energía potencial la cual posteriormente mediante una apertura se transforma en energía cinética y es transferida a la turbina [4, p. 15], esta es la encargada de convertir la presión del fluido ejercida en las aspas en potencia mecánica transferida en un eje el cual conecta directamente con el generador [4, p. 19], el anterior es la máquina el cual transforma la energía mecánica transferida por el eje mecánico interconectado con la turbina con el fin de transformarlo en energía eléctrica [4, p. 23], finalmente, el transformador se encarga de convertir la tensión producida por el generador con la finalidad de distribuirla en las redes eléctricas con menor pérdida [9, p. 1].

Posteriormente en el documento se profundizará acerca del modelo matemático turbina-generador puesto que con estos dos elementos son los de mayor importancia en cuestión de diseñar un controlador el cual garantice alcanzarla regulación de velocidad del generador.

1.5.2 Estado del arte

A la fecha, la demanda energética esta al alza, como se evidenció en la ilustración 2, por lo que las centrales hidroeléctricas son las principales ofertantes de electricidad, lo que se demostró anteriormente en la ilustración 3. Todas sus magnitudes de generación de energía, tales como: pequeñas centrales hidroeléctricas, minicentrales hidroeléctricas, microcentrales hidroeléctricas y grandes centrales hidroeléctricas, han realizado mejoras que garantizar el máximo aprovechamiento del recurso hídrico.

Sin embargo, estas implican un gran costo de implementación y que tiene un lapso prolongado: caída bruta, perdida hidráulica, cabeza neta; a excepción de las técnicas de control aplicadas a la eficiencia turbina-generador [4, p. 25], la cual su costo es menor y no influye en la operación. Es necesario aclarar que las técnicas de control son diversas, pero se va a centrar en este trabajo sobre los gobernadores de velocidad.

Los gobernadores de velocidad garantizan el máximo potencial de los generadores mediante el control de velocidad angular. Tradicionalmente en el diseño de estos se obtiene un modelo matemático ideal de la misma, despreciando variables que afectan el resultado de la respuesta de la función de transferencia con la real.

Las variables que no se tienen en cuenta en un modelo y que afectan el comportamiento del mismo son: en primer lugar, el coeficiente de amortiguamiento en el generador, que actúa como un mecanismo de amortiguamiento de la variación de la frecuencia e influye directamente con la velocidad angular la cual busca controlar, con las técnicas de control [10, p. 32]; en segundo lugar, la pérdida en cojinetes, que afecta la velocidad angular del generador; el tercer lugar, las pérdidas mecánicas, debido al eje que conecta a la turbina y el generador; la eficiencia del diseño de la turbina que se debe a los alabes y rodamientos de la misma y el cuarto y último lugar la eficiencia del generador. Es importante señalar que al despreciar estas variables el modelo matemático idealizado se convierte a uno de primer orden.

A la fecha, existen técnicas de control que permiten alcanzar, mantener y controlar la respuesta de un sistema. Estas técnicas tienen mayor aplicación en el control de sistemas hídricos, tales como: los gobernadores de velocidad, sin embargo, también existen software como Matlab que, mediante aplicativos como lo es Sisotool, permite diseñar diferentes estrategias de control con un amplio catálogo de controladores y diferentes métodos, para identificar las variables de control que se adapte mejor a la respuesta esperada de un modelo matemático [11].

Por su parte, las investigaciones realizadas acerca del tema se encontraron que existen documentos académicos e investigativos que proporcionan conocimientos claves referentes a simulaciones y estrategias de control sobre centrales

hidroeléctricas. Un ejemplo de ello es el de Naghizadeh, Jazebi y Vahidi [12], quienes realizan un estudio acerca de la implementación de gobernadores de velocidad mediante técnicas de control en una central hidroeléctrica, un modelado matemático, el cual, contempla ambos tipos de generadores, como son síncrono y asíncrono; además, tienen en cuenta los efectos del coeficiente de amortiguamiento y el efecto de onda de presión. Los autores, plantean realizar modificaciones en el modelo tradicional de una central idealizada al proponer la obtención de gobernadores de velocidad que garanticen el valor de velocidad angular requerido por el generador, aumentando así la eficiencia de la central. A su vez, profundizan en la *linearization of the Nonlinear Model*, que es fundamental en el abordaje que se está realizando.

Por otra parte, Moura y Moura [13, pp. 108-112], son más allegados a los métodos de control tradicional, es decir, a controladores como: el proporcional (P), proporcional-integrador (PI), proporcional-derivativo (PD) y proporcional-integrador-derivativo (PID). Los anteriores controladores son aplicados a los modelos matemáticos idealizados de centrales hidroeléctricas, permiten explicar el comportamiento de cada componente por individual con el fin de lograr que el lector adquiera conocimientos básicos del comportamiento dinámico de los elementos principales, entre los que se encuentran: la presa, el generador y la turbina. Define

Así mismo, los autores Estrada Viana, Peña Palacio y Guarnizo Lemus [14, p. 9], se centran en la estrategia de control de tipo predictivo, implementando sobre el modelo de la PCH, un modelo de predicción lineal que abarca desde presa hasta el generador. El sistema de predicción se basó en el uso de redes neuronales con el fin de responder a situaciones poco esperadas en el sistema.

Esta técnica de control garantiza una rápida respuesta y aprendizaje frente a las adversidades, mediante la retroalimentación de los datos obtenidos posterior a su implementación, con la finalidad de mejorar la eficiencia del sistema. Este tipo de controlador no se profundiza en este documento porque es necesario indicar que la información allí consignada es restringida y, por ende, para acceder a esta data es necesario contar con permisos especiales. Lo anterior es prescindible para la elaboración del modelo matemático y, posteriormente, el modelo de predicción lineal.

Por otro lado, Morales Acevedo y Saavedra Martínez [2], realizaron un estudio para el diseño de una central hidroeléctrica ubicada en Pisba-Boyacá, el cual menciona información perteneciente a la eficiencia y pérdidas en el sistema, donde se enfatiza en los factores relacionados a: cabeza neta, longitud de la tubería, rendimiento de proceso turbina-generador; además, identifica los componentes que se deben usar con el fin de obtener un mayor aprovechamiento hídrico, como es: la correcta elección del tipo de turbina. Es necesario recalcar que decidir la mejor opción, dadas las condiciones de una central hidroeléctrica, se debe cumplir parámetros de selección [2, pp. 23-26] y, además, proporcionar información acerca de la obtención

de mediciones reales como el flujo de agua, las dimensiones de la presa, metros de tubería, entre otras variables, lo que permite otorgar valores de referencia en el modelo matemático realizado en el presente documento.

2 CAPÍTULO 2: COMPONENTES Y VARIABLES DE UNA PCH

2.1 ESTIMACIÓN DE ALTURA MÁXIMA DE LA REPRESA.

El cálculo de la función de transferencia de la turbina se obtiene con base a los datos paramétricos obtenidos de la central hidroeléctrica en Pisba-Boyacá, sin embargo, es necesario dimensionar la relación entre potencia eléctrica (MW/h) y altura (m) de la represa con un caudal constante de 0,6 m^3/s, información obtenida del proyecto de grado de Acevedo Y Martínez [2, pp. 43-44], en relación a la potencia otorgada por el generador seleccionado del fabricante Leroy-Somer [15] que como máximo produce 2,2 MW, por consiguiente, se procede a realizar una estimación de altura acorde al valor de generación eléctrica ; la tabla 2 surge de la necesidad de este requerimiento, por lo tanto:

Tabla 2. Gráfico de potencia contra altura de central hidroeléctrica en Pisba

Altura H (m)	***Potencia (kW)***
25	147
75	294
125	441
175	735
225	1029
275	1617
325	1911
375	2205
400	2352

Tomado de: Adaptación propia, basada en información de MORALES ACEVEDO, C y SAAVEDRA MARTINEZ, F. Diseño de una pequeña central hidroeléctrica para el municipio de Pisba-Boyacá. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (2017, p. 43-44)

Con base en la tabla anterior, se evalúa una altura que proporcione una potencia similar a la que otorga el generador, que en este caso es de 375 metros, con el fin de dimensionar la PCH y obtener una simulación más realista; en adición, la PCH ubicada en Pisba-Boyacá sometida a esta condición, alcanza los 2,205 MW/h con la máxima apertura de válvula. Este valor se toma como la referencia de producción de energía.

Además, es necesario aclarar que el caudal utilizado en la represa de Pisba-Boyacá es de aproximadamente 0,65 m^3/s en promedio, esto con base a un estudio realizado por Acevedo Y Martínez [2, p. 41] en el cual los autores aclaran que fue en alrededor de 1 año, sin embargo, es preciso contemplar que, según Nieves Fernández [16, p. 66], "una abstracción de agua incontrolada, aunque se devuelva al cauce una vez pasada por la turbina, hará que el tramo cortocircuitado quede prácticamente seco, con serio peligro para la supervivencia de la biota acuática", lo anterior hace referencia a la definición de caudal de compensación.

Por ende, según Acevedo Y Martínez [2, p. 41], es necesario reservar cierto caudal ecológico en el tramo de río comprendido entre la toma y la restitución, por lo tanto, se tiene en cuenta el caudal mínimo registrado por el IDEAM que es de 0,002 m^3/s y para este caso se estima un caudal reservado de 0,05 m^3/s, por lo cual el nuevo caudal de trabajo para la PCH es de 0,6 m^3/s.

2.2 MODELADO DE LA TURBINA

Obtener el modelo matemático de la turbina proviene de la necesidad de conocer y analizar el comportamiento de la misma, dadas estas circunstancias se opta por tener como salida del sistema una variable, la cual pueda ser retroalimentada en una aplicación real, tal como la velocidad angular entregada por el generador con el fin de obtener un valor esperado para el óptimo funcionamiento del mismo el cual pueda ser controlado mediante la apertura de una válvula, puesto que con lo anterior mencionado es posible regular el flujo del agua y a su vez la cantidad de potencia mecánica producida al impactar la presión del agua con los alabes de la turbina, además de permitir introducir variables reales en la simulación, con la finalidad de dar un estimado de generación de potencia en condiciones reales.

Datos para el modelo:

V: Velocidad del fluido dentro de la tubería ($\frac{m}{s}$)

P: Potencia de la turbina (kW)

D_T: Diámetro de la tubería (m)

γ: Peso específico del agua ($\frac{N}{m^3}$)

A_T: Área de la tubería (m^2)

n: Eficiencia de la turbina (%)

Q: Caudal de sistema ($\frac{m^3}{s}$)

L: Longitud de la compuerta (m)

K: Constante que parte de la unificación de varias constantes, las cuales son γ, D_T, A_T, n

h: Altura de la cabeza (m)

G: Apertura de la válvula $(\%)$

A y B:Tomando como referencia a los autores Naghizadeh, Jazebi and Vahidi [12, p. 1783], estas son constantes que varían respectivamente a la necesidad de precisión referente a la simulación

Z_p: Impedancia normalizada de la compuerta $(adimencional)$

T_{ep}: Tiempo elástico de la tubería de la compuerta (s)

T_w: Tiempo de turbinamiento(s)

$Subindice_0$: Hace referencia a cualquier valor inicial del modelo matemático

P_m: Potencia mecánica $\frac{J}{s}$

Idealmente el modelo matemático ideal simplificado obtenido de [12, p. 1782], se representa como:

$$\frac{Pm}{G} = \frac{1 - T_w s}{1 + 0{,}5\, T_w s} \qquad (1)$$

Sin embargo, en este documento se profundiza sobre el modelado matemático no ideal, contemplando la mayor parte de variables posibles, que afectan el comportamiento de una PCH y que estén al alcance de cualquier persona interesada.

Ecuaciones Generales:

Una de las ecuaciones generales surge en base al teorema de Torricelli según Mott [3, p. II], como se muestra a continuación.

$$V = \sqrt{2\,g\,h} \qquad (2)$$

Seguidamente, al poner la ecuación 2 en términos de la apertura de válvula se deduce la siguiente ecuación.

$$V = K\ \ G\sqrt{h} \qquad (3)$$

La ecuación (4) es obtenida de potencia hídrica según Mott [3, p. II], la cual representa la ecuación general de la potencia hídrica

$$P = K\,V\,h \qquad (4)$$

Se linealiza la ecuación (3), con el objetivo de obtener una ecuación aproximada en un punto en la cual se pueda reemplazar los valores de la central, por lo tanto, se obtiene la ecuación (5) donde se evidencia incógnitas con subíndice 0, estos hacen referencia a valores conocidos de la central, los cuales serán reemplazados más adelante.

$$\Delta V = \sqrt{h_0}\,\Delta G + \frac{G_0}{2\sqrt{h_0}}\,\Delta h \qquad (5)$$

Según NAGHIZADEH, JAZEBI y VAHIDI [12, p. 1783], se tiene que las siguientes equivalencias son referentes a un modelo no lineal suponiendo que la columna de agua es elástica; la ecuación (6) es la función de transferencia que representa la velocidad de la turbina y el salto neto de la represa

.

$$F(s) = \frac{\Delta V}{\Delta h} \qquad (6)$$

Para la siguiente ecuación se tiene en cuenta el efecto del fenómeno de onda de presión en la que se realiza una aproximación de la función de transferencia anteriormente mencionada sobre la ecuación (7) según NAGHIZADEH, JAZEBI y VAHIDI [12, p. 1785].

$$F(s) = \frac{-B}{Z_p\, T_{ep}\, A\, s} \qquad (7)$$

Reemplazando la ecuación (6) en la (5)

$$\Delta V = \sqrt{h_0}\, \Delta G + \frac{G_0}{2\sqrt{h_0}} \frac{\Delta V}{F(S)} \qquad (8)$$

Posteriormente se despeja la ecuación (8), obteniendo el modelo matemático de una turbina en relación de la velocidad y apertura de válvula.

$$\frac{\Delta V}{\Delta G} = \frac{\sqrt{h_0}}{1 - \frac{G_0}{2\sqrt{h_0}\, F(S)}} \qquad (9)$$

Linealizando la ecuación (4) con el fin de obtener una equivalencia de potencia mecánica y velocidad de la turbina logrando que la función de transferencia esté en los términos esperados.

$$\Delta P = K\, h_0\, \Delta V + K\, V_0\, \Delta h \qquad (10)$$

La variable *K* representa los términos que son constantes de las siguientes ecuaciones, al observar que la potencia hídrica y el caudal en un término extendido, estas son obtenidas de Mott [3, p. II], por consiguiente, se tienen las siguientes expresiones:

$$P = \gamma\, Q\, \Delta h\, n$$

$$Q = \frac{v}{T} = V\ A_T$$

Realizando una igualdad de las ecuaciones anteriores, con el objetivo de suprimir el caudal de la expresión se obtiene que:

$$\mathrm{P} = \gamma\ \mathrm{V}\ A_{\mathrm{T}}\ \Delta\mathrm{h}\ \mathrm{n}$$

Al agrupar los términos constantes de la ecuación anterior, se obtiene la variable *K*, esta se compone de los siguientes términos, peso específico del agua γ [3, p. 15], la eficiencia n [2, p. 89] y área de la tubería A_T este último parámetro de diseño es calculado con base al diámetro de tubería D_T [2, pp. 45,48].

$$\gamma = \text{peso especifico del agua } = 9.81\ \frac{\mathrm{kN}}{\mathrm{m}^3}$$

$$\text{Diámetro de la tuberia } (\mathrm{D_T}) = 0.6\ \mathrm{m}$$

$$\text{Area de la tuberia } (\mathrm{A_T}) = \frac{\pi}{4}\ (0.6\mathrm{m})^2 = \frac{9}{100}\ \pi\ \mathrm{m}^2$$

Q = Caudal= $0.6\ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}}$

$$\mathrm{V} = \frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{A}} = 2.1429\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$$

La eficiencia teórica hidráulica de la turbina según Morales Acevedo y Saavedra Martínez [2, p. 89] para la pequeña central hidroeléctrica en Pisba-Boyacá es la siguiente:

$\mathrm{n} = \text{eficiencia de la turbina}$ = 91.53%

A continuación, se procede con el cálculo de *K* que hace referencia a las variables constantes anteriormente mencionadas, por lo tanto:

$$K = \frac{9}{100}\ \pi\ m^2\ 9.81\frac{kN}{m^3}\ 0.9153 = 2.5388\frac{kN}{m}$$

Reemplazando la ecuación (6) en la (10)

$$\Delta P = K\ h_0\ \Delta V + \ K\ \ V_0\ \frac{\Delta V}{F(S)}$$

$$\Delta P = \Delta V\ \left(K\ h_0 + \frac{K\ V_0}{F(S)}\right)$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{K\ \ h_0\ \ F(S) + \ K\ \ V_0}{F(S)} \qquad (11)$$

Posteriormente, Se tiene que la entrada es la apertura de la válvula y la salida es la Potencia mecánica por consiguiente que según NAGHIZADEH, JAZEBI y VAHIDI [12, p. 1786] se tiene la siguiente expresión.

$$\frac{\Delta P}{\Delta G} = \frac{\Delta V}{\Delta G}\ \frac{\Delta P}{\Delta V} \qquad (12)$$

Se reemplaza en la ecuación (12) las fórmulas (8) y (11)

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{{h_0}^{\frac{3}{2}}\ \ K\ F(S) + \ {h_0}^{\frac{1}{2}}\ \ K\ \ V_0}{F(S)\ - \frac{G_0}{2\sqrt{h_0}}} \qquad (13)$$

Ahora se reemplaza la ecuación (7) en (13)

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{h_0^{\frac{3}{2}}\ K\ \left(\frac{-B}{Z_p\ T_{ep}\ A\ S}\right) +\ h_0^{\frac{1}{2}}\ K\ \ V_0}{\left(\frac{-B}{Z_p\ T_{ep}\ A\ S}\right) - \frac{G_0}{2\sqrt{h_0}}} \qquad (14)$$

Tomando como referencia [12, p. 1785] con un n=0 el cual representa el número de iteraciones sobre un modelo no lineal de una turbina con generador mediante una aproximación tangencial contemplando el fenómeno de onda de presión anteriormente mencionado en la ecuación (7), tenemos que las variables B=1 y A=1 dando como resultado la ecuación (15) que es la ecuación para la simulación de la turbina.

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{\left(-\frac{h_0^{\frac{3}{2}}\ K}{Z_p\ \ T_{ep}\ \ S}\right) +\ h_0^{\frac{1}{2}}\ K\ \ V_0}{\left(\frac{-1}{Z_p\ \ T_{ep}\ \ S}\right) - \frac{G_0}{2\sqrt{h_0}}} \qquad (15)$$

Posteriormente se procede a calcular los Valores de T_{ep} y Z_p.

T_{ep} que se interpreta como el tiempo de viaje de la onda de presión en la tubería de compuerta y se calcula de la siguiente manera

$$T_{ep} = \frac{longitud\ de\ la\ compuerta}{velocidad\ de\ la\ onda\ de\ presion}$$

Los valores típicos de la velocidad de la onda de presión son 1220 m / s para tubos de acero y 1420 m / s para túneles de cemento [12, p. 1786], en este caso la tubería es de acero y la longitud de la compuerta para esta simulación es de (437 m) basándose en los datos de la central de Pisba-Boyacá [2, p. 45], lo anterior contempla las perdidas por accesorios, tales como son los codos de la tubería y la válvula de globo, como indica Morales y Saavedra [2, p. 56] y al reemplazar estos valores sobre la ecuación anterior se obtiene lo siguiente.

$$T_{ep} = 0{,}36\ s$$

Z_p que se interpreta como la Impedancia de sobretensión hidráulica del conducto y se calcula de la siguiente manera.

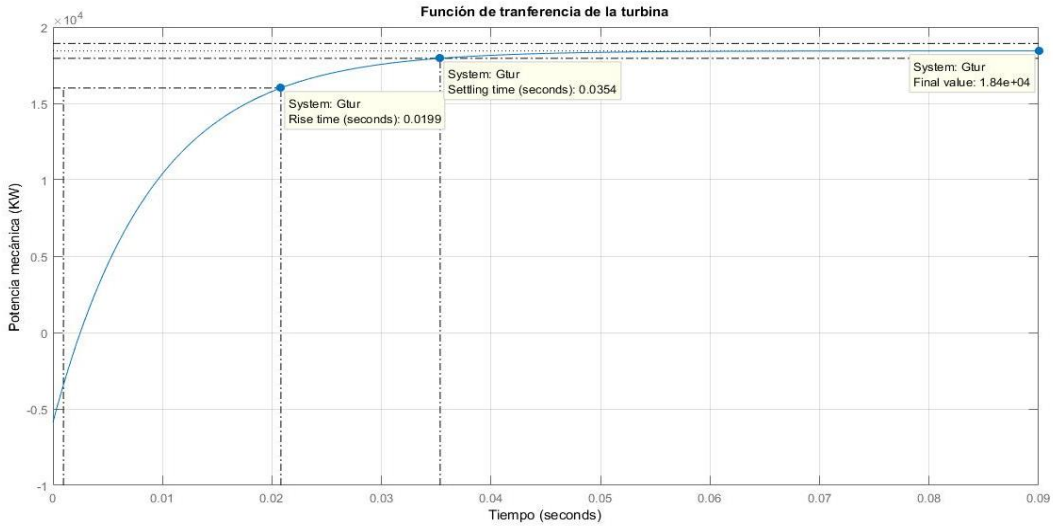
$$Z_p = \frac{T_w}{T_{ep}}$$

T_w corresponde al tiempo de turbamiento y sus valores típicos oscilan en un rango de 0.5 s y 4 s [12, p. 1784].

$$Z_p = 1{,}3966$$

Con los parámetros anteriores claros, se ejecuta el código para la simulación en MATLAB, que se encuentra disponible en Anexo A y se simula la función de transferencia restante al paso, por consiguiente, se tiene como resultado la ilustración 5:

Ilustración 5. Simulación de turbina con entrada al paso



Tomado de: Simulación propia con MATLAB

2.3 MODELO DEL GENERADOR

El modelo matemático del generador tiene como entrada la potencia mecánica entregada por la turbina hidráulica y como salida la velocidad angular este modelo permite controlar el sistema teniendo como referencia la salida del sistema.

Datos para el modelo:

J: Momento de inercia (kg.m²).

S_{base}: Potencia nominal (kW).

W_{base}: Velocidad angular nominal ($\frac{rad}{s}$).

V_{base}: Velocidad nominal (rpm).

F: Frecuencia (Hz).

En relación con este aspecto, Millán explica en primer lugar que un generador síncrono está sometido al torque T_m aportado por la potencia mecánica de la turbina y esta tiende a acelerarse sobre el eje que conecta con el generador, mientras el par electromagnético T_e *producido por el rotor y el estator tienden a frenarlo*. La ecuación que describe este movimiento es:

$$J\frac{d^2\,\emptyset_r}{dt^2} = T_m - T_e \qquad (16)$$

Acota, además, que J es el momento de inercia y $\emptyset_r$ es el ángulo del rotor y también se puede escribir en términos de la velocidad angular de la siguiente forma, con el fin de hacer uso de la velocidad de referencia que proporciona el fabricante mejor detallado en [10, p. 31].

$$J\frac{d^2\,\emptyset_r}{dt^2} = J\frac{dw}{dt} = J\frac{d(w - w_o)}{dt} = J\frac{d\Delta w}{dt} \qquad (17)$$

Determina que w_r corresponde a la velocidad del rotor, w_o es la velocidad de referencia analizando el modelo matemático en un momento puntual por lo cual se puede expresar la ecuación anterior de esta forma, según Millán [10, p. 31].

$$\frac{dw}{dt} = \frac{T_m - T_e}{J} \qquad (18)$$

Posteriormente, afirma, que se toma la potencia base S_{base} que es la potencia nominal de la máquina, junto con la velocidad angular base W_{base}, encontramos que la división de ambas nos da como resultado el torque base del generador T_{base}.

$$T_{base} = \frac{S_{base}}{W_{base}} \tag{19}$$

Al dividir la ecuación (16) sobre W_{base} queda lo siguiente:

$$\frac{\frac{dw}{dt}}{W_{base}} = \frac{\frac{T_m - T_e}{J}}{W_{base}} \tag{20}$$

De la misma manera, expone que la ecuación (19) puede reescribirse de la siguiente manera:

$$W_{base} = \frac{T_{base}\, {W_{base}}^2}{S_{base}} \tag{21}$$

Y que reemplazando la ecuación (21) en (20), teniendo la ecuación (21) primeramente en valores unitarios, según Millán [10, p. 31], da como resultado la siguiente expresión:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{(T_m - T_e)}{J\ \frac{T_{base}\, {W_{base}}^2}{S_{base}}} \tag{22}$$

Manifiesta Millán, que al normalizar W_{base}, se obtiene

$$\frac{(T_m - T_e)}{T_{base}} = (T_{mu} - T_{eu}) \tag{23}$$

Debido a que el sistema siempre inicia con el torque inicial en este estado para posteriormente modificar la ecuación (22)

$$\frac{dw}{dt} = \frac{(T_{mu} - T_{eu})}{J \frac{W_{base}{}^2}{S_{base}}} \qquad (24)$$

De otra parte, para Millán, “H es la constante de inercia, definida como”:

$$H = \frac{1}{2} \frac{J\, W_{base}{}^2}{S_{base}} \qquad (25)$$

Y que, además, reemplazando la formula (25) en (24), cabe recalcar que todos los valores de aquí en adelante se expresan las variables en valores unitarios, por lo tanto, se obtiene lo siguiente

$$\frac{dw}{dt} = \frac{(T_m - T_e)}{2H} \qquad (26)$$

Expresa que en virtud de que el sistema de control regula la potencia eléctrica, el cual es un término más fácil de medir que el par electromagnético, es conveniente expresar la ecuación anterior en términos de potencia, que lo relaciona es *P=wrT*, por tanto, considerando una desviación pequeña a partir de un estado inicial, se puede escribir de la siguiente manera, según Millán [10, p. 31]:

$$P_O + \Delta P = (W_O + \Delta W_r)(T_O + \Delta T) \qquad (27)$$

Seguidamente, afirma que aplicando la transformada de Laplace en (27) se obtiene:

$$\Delta P = W_O\, \Delta T + T_O\, \Delta W_r \qquad (28)$$

Y que luego observando el comportamiento propio del eje del generador se tiene lo siguiente:

$$\Delta P_m - P_e = W_O\, (T_m - \Delta T_e) + \left(T_{m_0} - T_{e_0}\right) \Delta W_O$$

Advierte, que en régimen permanente y normalizado T_{m_0}=T_{e_0} y por unidad se tiene que W_O=*1*, lo anterior se puede profundizar en [10, p. 29], por consiguiente, queda:

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \Delta T_m - \Delta T_e \tag{29}$$

Al reemplazar la ecuación (29) en (26), se puede considerar que el modelo del generador es:

$$\frac{d\Delta w}{dt} = \frac{(\Delta T_m - \Delta T_e)}{2H} = \frac{(\Delta P_m - \Delta P_e)}{2H} \tag{30}$$

Para, finalmente, simplificar la ecuación (30) en la cual, se hace lo siguiente:

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \Delta P$$

Y tener como resultado que se agregue la anterior expresión sobre (30) y posteriormente se aplica la transformada de Laplace sobre esta, por lo que, en definitiva, obtener la siguiente igualdad:

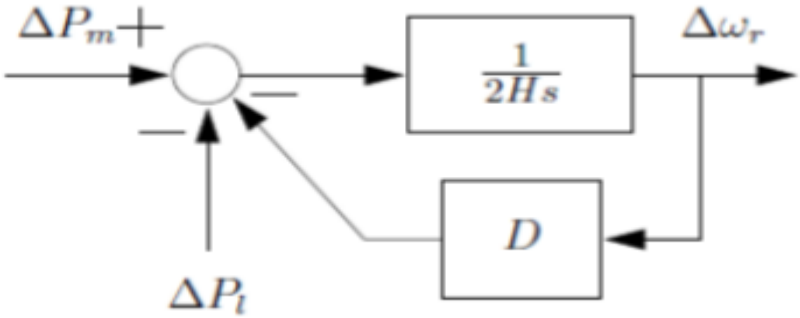
$$\frac{\Delta w(s)}{\Delta P(s)} = \frac{1}{2Hs} \tag{31}$$

La expresión anterior es un sistema ideal, sin embargo, se debe considerar el término de coeficiente de amortiguación con el fin de contemplar otra parte de la dinámica del sistema, puesto que, este representa la relación de la variación de la frecuencia con el incremento de potencia debido a cargas en el sistema y provoca una variación en la potencia eléctrica y se describe con la siguiente ecuación lo anterior según Millán [10, p. 31].

$$\Delta P_e = \Delta P_l + D\ \Delta W_{base}$$

Así mismo, este coeficiente de amortiguamiento se representa mediante el siguiente diagrama de bloques mostrado en la ilustración 6:

Ilustración 6. Efecto de la potencia sobre la frecuencia angular



Tomado de: (MILLÁN, Cristóbal. Modelado en Matlab-Simulink de generadores eléctricos conectados a la red. España: Universidad de Sevilla. 2016. p. 32.)

Basado en la ilustración 7, mediante reducción de bloques, se obtiene que la nueva función de transferencia del generador es:

$$\frac{\Delta w(s)}{\Delta P(s)} = \frac{1}{2Hs + D} \qquad (32)$$

Este coeficiente de amortiguación según Millán afirma que *D* hace referencia a una constante que es la relación entre potencia eléctrica y frecuencia, es decir, son directamente proporcionales [10, p. 32].

Por lo tanto, la ecuación que describe el comportamiento del coeficiente de amortiguamiento es:

$$\mathrm{D} = \frac{Potencia\ del\ generador\ (kW)}{Frecuencia\ del\ generador\ (Hz)} \qquad (33)$$

Luego para calcular debidamente la ecuación del generador (32) nos redimimos a las características propias de un generador que cumpla con las condiciones propias de una PCH, las cuales son proporcionadas por el fabricante.

Por consiguiente, se encuentra un generador del fabricante Leroy-Somer con las debidas especificaciones [15].

Consecuente a esto, se tiene que los parámetros de simulación son:

$$S_{base} = potencia\ base = 2.200\ kW$$

$$W_{base} = velocidad\ angular\ base = 226{,}195\ \frac{rad}{s}$$

$$J = Momento\ de\ inercia = 25{,}67\ kg\ \mathrm{m}^2$$

$$f = frecuencia\ del\ generador = 50\ Hz$$

Se reemplazan los datos proporcionados por el fabricante dentro de la ecuación (25) y (33)

$$H = \frac{1}{2} * \frac{JWbase^2}{Sbase} = 0.5 * \frac{25{,}67\ kg\ m^2\ * \left(226{,}195\ \frac{\mathrm{rad}}{\mathrm{s}}\right)^2}{2.200\ KW} = 0{,}2985$$

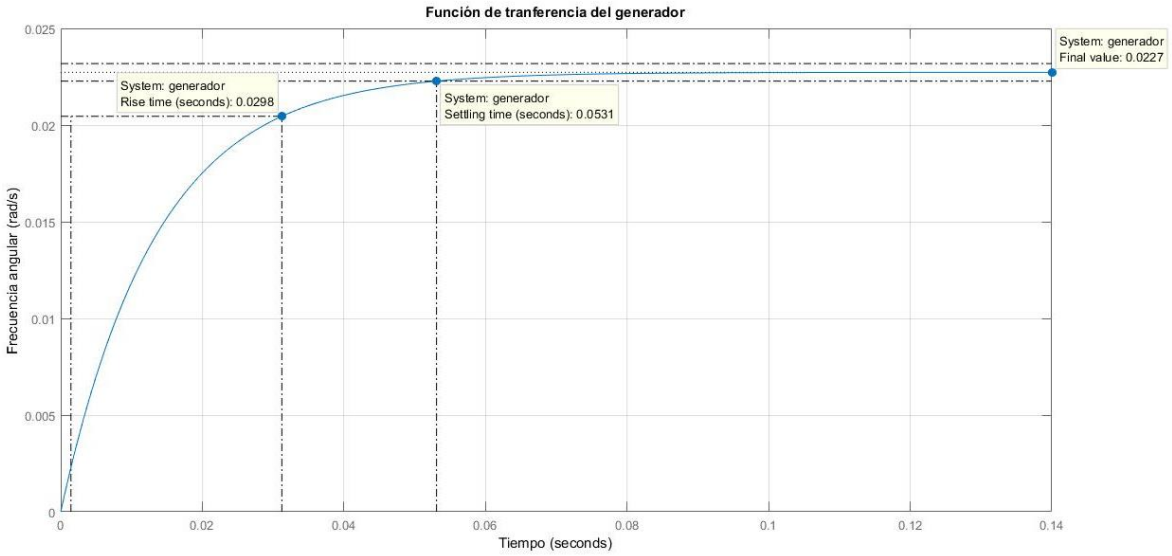
$$\mathrm{D} = \frac{Potencia\ del\ generador\ (kW)}{Frecuencia\ del\ generador\ (Hz)} = \frac{2.200\ kW}{50\ Hz} = 44\ \frac{kW}{Hz}$$

Finalmente, la función de transferencia para el generador es la siguiente:

$$\frac{\Delta w(s)}{\Delta P(s)} = \frac{1}{0{,}597s + 44} \qquad (34)$$

Consecuentemente con ayuda del software MATLAB se ejecuta el código correspondiente a la gráfica del modelo matemático obtenido para el generador eléctrico adjunto en el Anexo B, en conjunto con una simulación al paso de la función de transferencia resultante (34).

Ilustración 7.Simulación del generador con entrada al paso



Tomado de: Simulación propia con MATLAB

3 CAPÍTULO 3: CONTROLADORES Y RESPUESTA DEL SISTEMA

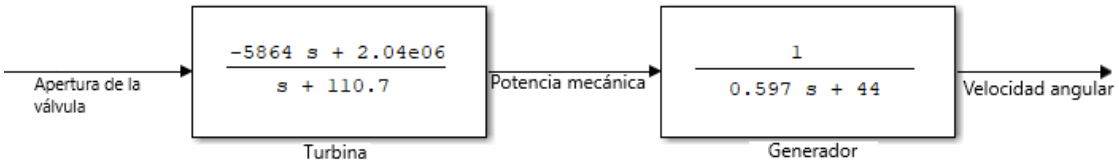
3.1 DIAGRAMAS DE BLOQUES

Diagrama de bloques del sistema

La ilustración 8 representa el diagrama de bloques del modelo matemático para una PCH turbina generador con la finalidad de controlar la velocidad angular mediante la apertura de la válvula.

Así mismo, muestra el modelo matemático independiente tanto de la turbina como el generador con sus respectivas entradas y salidas del sistema.

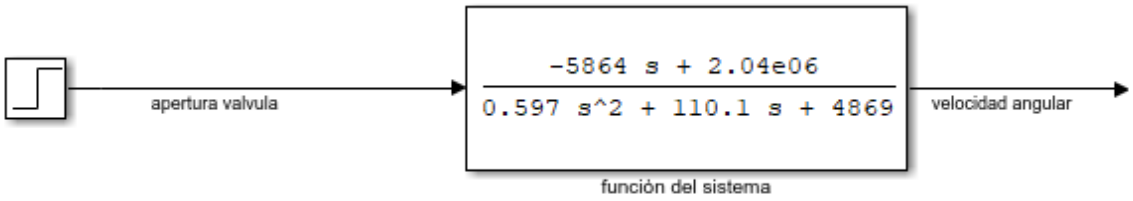
Ilustración 8. Modelo matemático no controlado de la PCH



Tomado de: Diagrama propio realizado en SIMULINK

Posteriormente, se aplica reducción de bloques para con esto se unifican los dos modelos matemáticos en un único bloque, el cual representa el modelo matemático de la PCH.

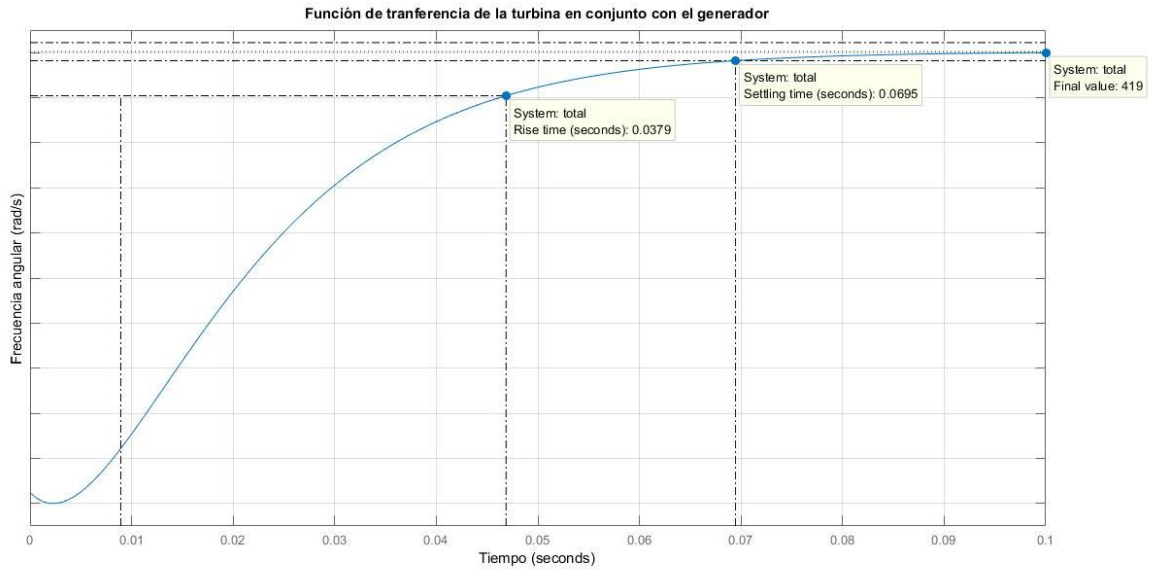
Ilustración 9. Diagrama de bloques en lazo abierto de función de transferencia unificada



Tomado de: Diagrama propio realizado en SIMULINK

A partir de las funciones obtenidas del generador y la turbina, se realiza las respectivas operaciones con el fin de encontrar una única función de transferencia de la planta así mismo se ejecuta el código para la simulación en MATLAB que se encuentra disponible en Anexo C y se simula la función de transferencia general de la planta restante al paso en lazo abierto, por lo que finalmente se obtiene la siguiente gráfica:

Ilustración 10. Respuesta al paso de la planta en lazo abierto



Tomado de: Diagrama propio sacado de MATLAB

Consecuente a lo anterior se implementa el controlador sobre planta como se evidencia en la siguiente ilustración en el diagrama de bloques, se agrega el controlador el cual está en lazo cerrado, esto con el fin de que la velocidad angular retroalimente el sistema con el objeto de alcanzar la velocidad angular esperada.

Ilustración 11. Diagrama de bloques en lazo cerrado de función de transferencia y controlador

Tomado de: Diagrama propio realizado en SIMULINK

3.2 DISEÑO DE CONTROLADORES

3.2.1 Parámetros de diseño

Con el fin de mejorar la respuesta de la planta respecto a cada estrategia de control, es necesario escoger parámetros de diseño, los cuales garantizan mejoran el funcionamiento del sistema, las variables que influyen en el comportamiento de la central hidroeléctrica son:

Primeramente, el sobrepico el cual hace referencia a la velocidad máxima alcanzada por el generador antes de estabilizarse en el valor esperado, así mismo, puede afectar el sistema acortando la vida útil de la PCH si este es alto, por esta razón se asume un valor máximo sobre la velocidad de referencia que como máximo no supere el 15% del esperado.

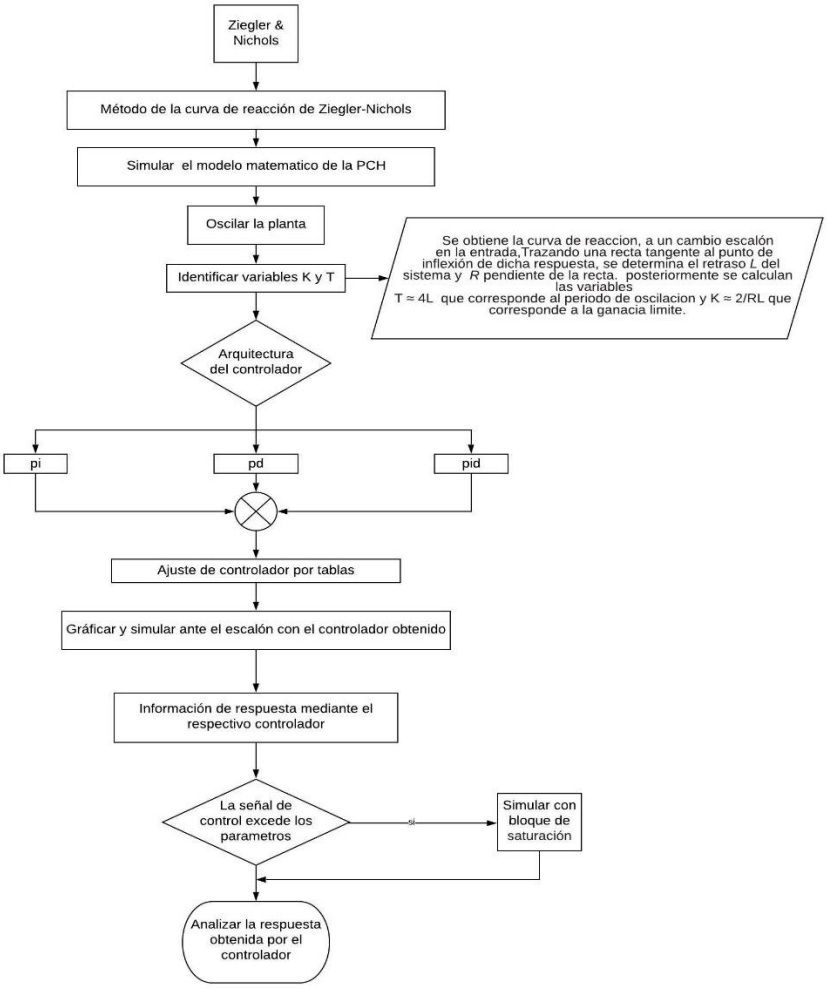
Posteriormente, la señal de control que hace referencia a la apertura necesaria para controlar la velocidad del generador que se supone con un valor máximo de una válvula, en caso de superar esta condición de diseño es necesario hacer uso de un bloque de saturación, este tiene como finalidad restringir los valores máximos y mínimos de la señal de control.

Finalmente, el valor final esperado que se expresa como la velocidad angular alcanzada una vez se estabiliza el sistema.

3.2.2 Método de Ziegler & Nichols

Este método permite ajustar ganancias proporcionales, integrales y derivativas de forma empírica por medio de tablas al identificar variables de la función de transferencia, se detalla este método en el diagrama de flujo siguiente; además, en la siguiente referencia se profundiza a cerca de las variables mencionadas a continuación [17, pp. 43-48].

Ilustración 12. Diagrama de flujo del método Ziegler & Nichols

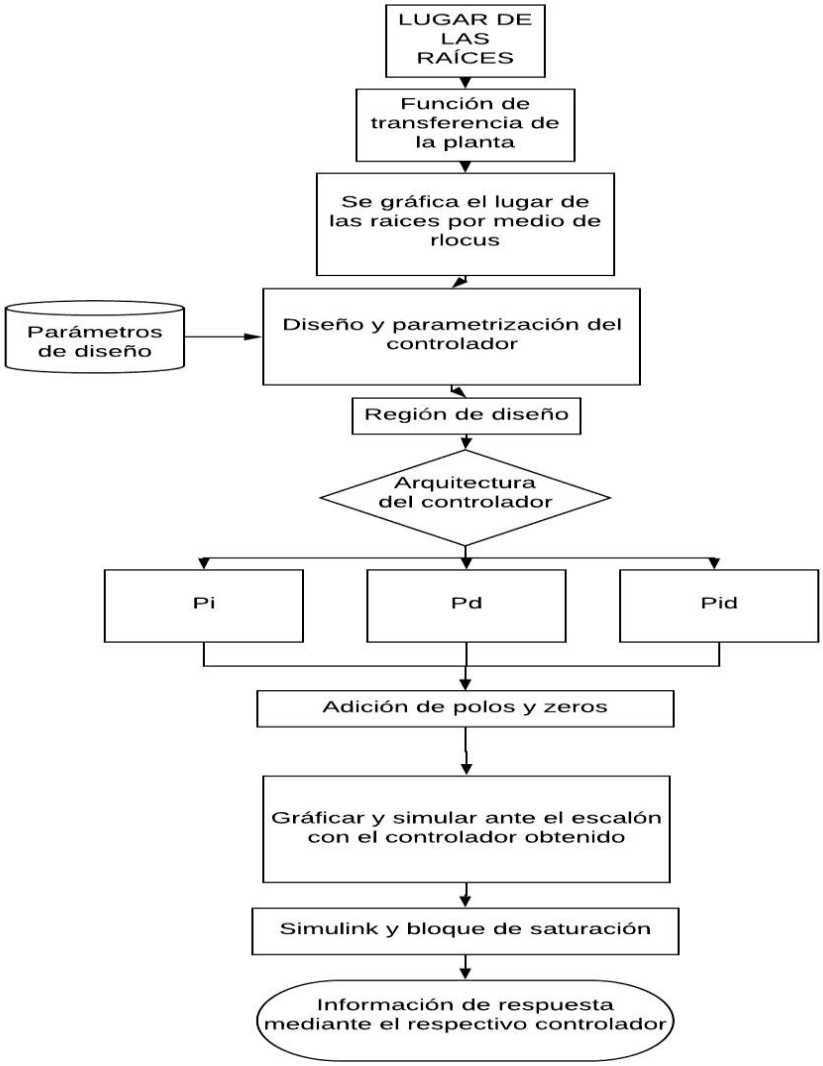


Tomado de: Adaptación propia, basada en información de MAZZONE, Virginia. Controladores PID. Argentina: Universidad Nacional de Quilmes, 2012. p. 14-16.

3.2.3 Descripción del método lugar de las raíces

Este método permite diseñar controladores tradicionales con ganancia proporcional, integral y derivativo mediante fórmulas clásicas del control así mismo como cumplir los parámetros de control anteriormente propuestos con el fin de satisfacer la necesidad y analizar la respuesta de la planta ante los controladores PI, PID, PD este método se describe detalladamente por medio del siguiente diagrama de flujo.

Ilustración 13. Diagrama de flujo del método de lugar de las raíces



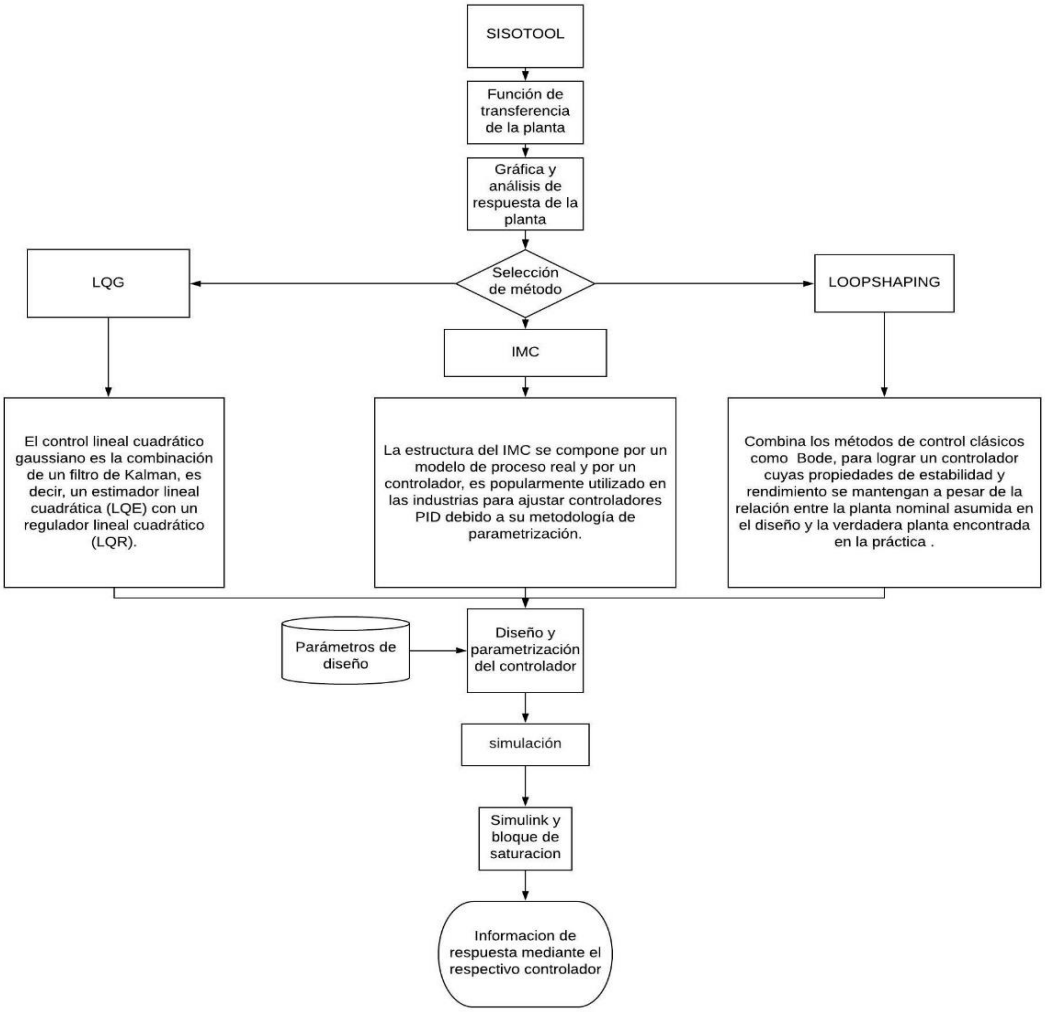
Tomado de: Adaptación propia, basada en información de OGATA, Katsuhiko. Ingeniería de control moderna. España: Pearson, 2010. p.269-303. ISBN: 978-84-8322-660-5.

3.2.4 Descripción de la herramienta sisotool

Con el fin de diseñar controladores los cuales garanticen la velocidad de trabajo ideal para el generador, mediante diferentes métodos de control, se hace uso de la herramienta sisotool propio del software Matlab.

Esta herramienta permite analizar funciones de transferencia en lazo cerrado mediante la función de transferencia de la planta y los parámetros de diseño haciendo uso de los métodos LGQ, LOOP SHAPING Y IMC, los anteriores se detallan más adelante; el uso de la herramienta se detalla en el siguiente diagrama de flujo.

Ilustración 14.Diagrama de flujo del método de sisotool.



Tomado de: Adaptación propia, basada en información de THE MATHWORKS INC. Control system designer [en línea], 2019 [citado 27 de oct,. 2019]. Disponible en Internet:< URL: https://la.mathworks.com/help/control/ref/controlsystemdesigner-app.html>.

3.2.5 Valores esperados del generador

El generador escogido para esta simulación tiene el mayor rendimiento de trabajo al alcanzar la velocidad angular de 226,1947 rad/s se espera controlar la respuesta del sistema mediante la incorporación de un controlador el cual regule su estado final.

3.3 SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL

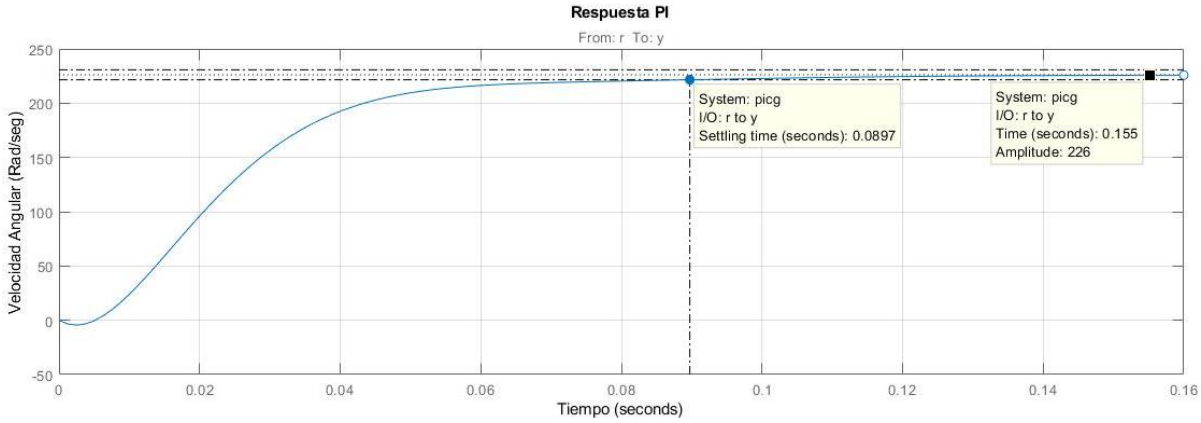
3.3.1 PI con el método lugar de las raíces.

Muchos controladores industriales tienen solo acción PI. Se puede demostrar que un control PI es adecuado para todos los procesos donde la dinámica es esencialmente de primer orden. Lo que puede demostrarse en forma sencilla, por ejemplo, mediante un ensayo al escalón [18, p. 3], el controlador se obtuvo mediante el método lugar de las raíces y es el siguiente:

$$C\ (s) = \frac{0.0016993\ (\mathrm{s} + 52.34)}{s}$$

En la ilustración 15 se puede evidenciar la respuesta de la central hidroeléctrica al ser controlada con el PI, esta gráfica permite observar valores importantes del sistema en condiciones ideales.

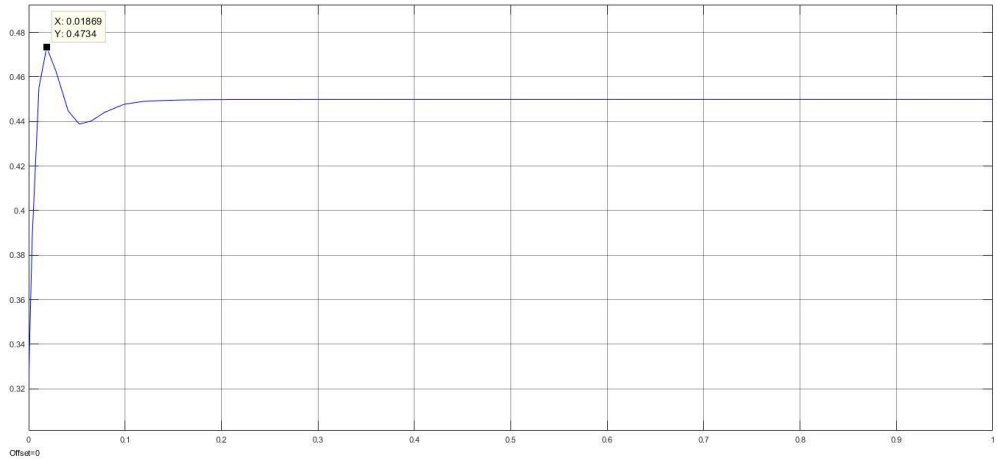
Ilustración 15. Respuesta al paso en lazo cerrado de función de transferencia con controlador PI



Tomado de: Diagrama propio

En la ilustración anterior se puede evidenciar la señal de control necesaria para controlar la central hidroeléctrica mediante la técnica del PI, esta gráfica permite observar el valor máximo de apertura de la válvula en condiciones ideales.

Ilustración 16.Señal de control con controlador PI.



Tomado de: Diagrama propio

En la ilustración 16 se evidencia que la señal de control está dentro de los parámetros de diseño, por consiguiente, no hay necesidad de someter el controlador ante un bloque de saturación.

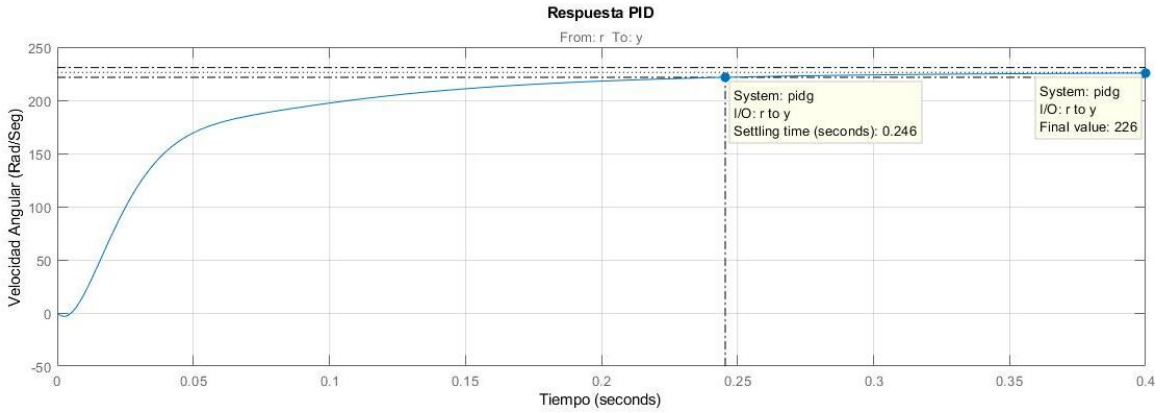
3.3.2 PID con el método lugar de las raíces

Acción de control proporcional-integral-derivativa, esta acción combinada reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales, el controlador se obtuvo mediante el método lugar de las raíces y es el siguiente:

$$C\ (s) = \frac{0.0013166\ (\mathrm{s} + 62.33)\ (\mathrm{s} + 18.96)}{\mathrm{s}\ (\mathrm{s} + 32.08)}$$

En la ilustración 17 se evidencia la respuesta de la planta al ser controlada con un PID, esta gráfica permite observar valores importantes del sistema en condiciones ideales.

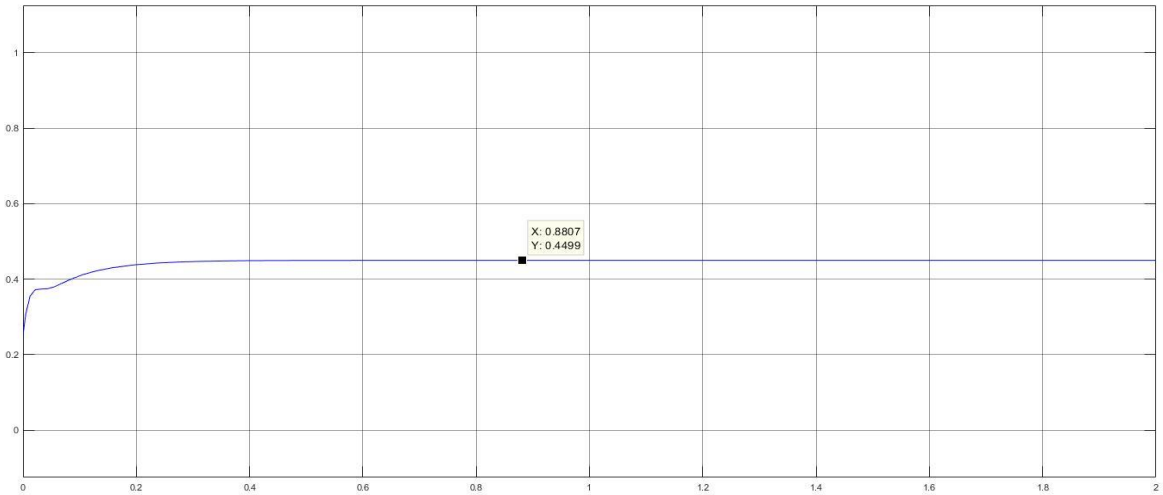
Ilustración 17. Respuesta al paso en lazo cerrado de función de transferencia con controlador PID.



Tomado de: Diagrama propio.

En la ilustración siguiente, se puede evidenciar la señal de control necesaria para controlar la central hidroeléctrica mediante la técnica del PID, esta gráfica permite observar el valor máximo de apertura de la válvula en condiciones ideales.

Ilustración 18.Señal de control con controlador PID.



Tomado de: Diagrama propio

En la ilustración preliminar se evidencia que la señal de control de la planta al ser controlada con el PID se encuentra dentro de los parámetros de diseño que es entre 0 y el 1, por lo tanto, no hay necesidad de implementar el bloque de saturación.

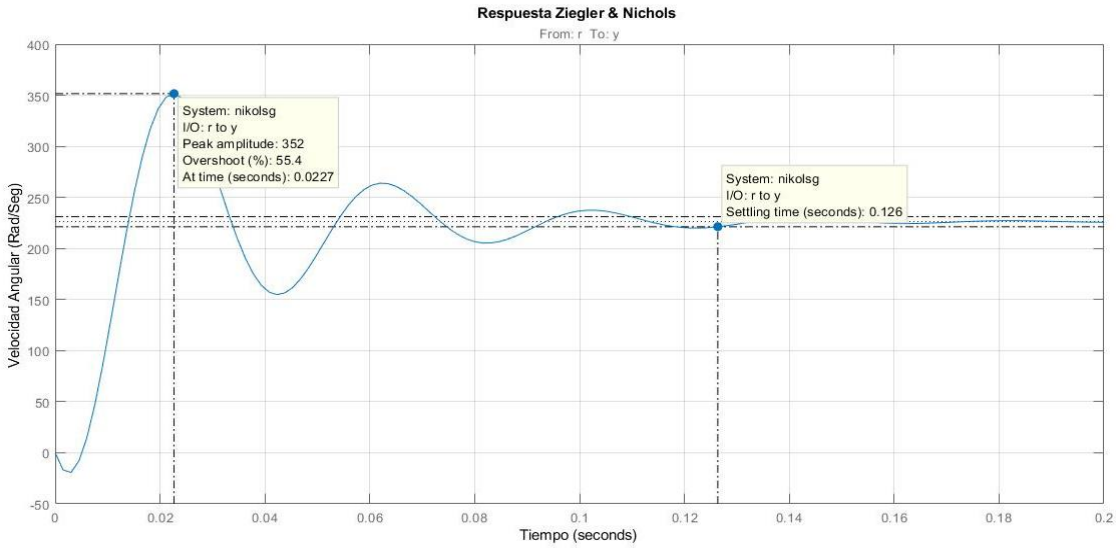
3.3.3 Ziegler & Nichols con el método curva de reacción

El otro método se resume en ensayar al sistema a lazo abierto con un escalón unitario, se calculan algunos parámetros, como la máxima pendiente de la curva y el retardo, y con ellos establecemos las ganancias del controlador PI. Estos métodos fueron propuestos por Ziegler & Nichols (Z-N) en 1942, quienes se basaron en la práctica para desarrollarlos [18, pp. 14-16].

$$C\ (s) = \frac{0.0075078\ (\mathrm{s} + 53.49)}{s}$$

En la ilustración siguiente, se evidencia la respuesta de la planta al ser controlada con Ziegler & Nichols, esta gráfica permite observar valores importantes del sistema en condiciones ideales además de evidenciar que llega al valor esperado.

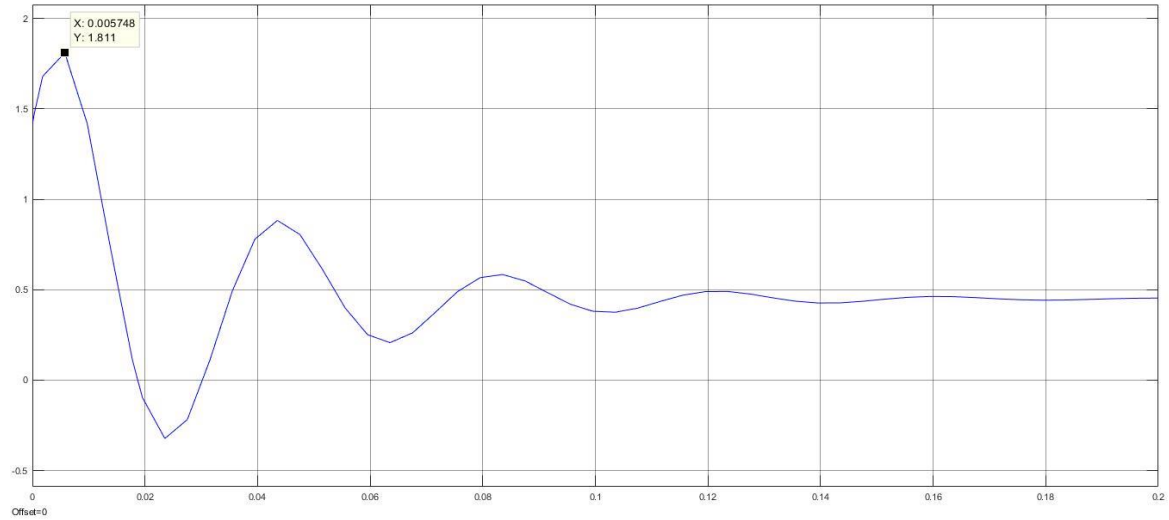
Ilustración 19.Respuesta al paso en lazo cerrado de función de transferencia con controlador Ziegler & Nichols



Tomado de: Diagrama propio.

En la ilustración 20 se evidencia la señal de control necesaria para controlar la planta mediante la técnica del Ziegler & Nichols, esta gráfica permite observar el valor máximo de apertura de la válvula en condiciones ideales, sin embargo, se evidencia que está excede los parámetros de diseño, por lo tanto, es necesario implementar un bloque de saturación.

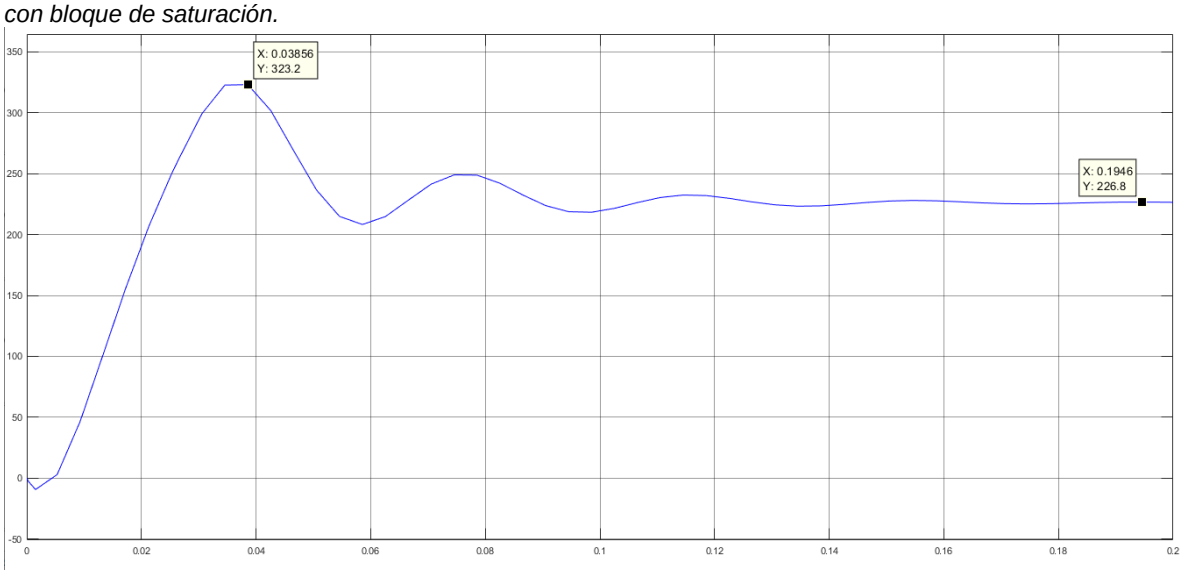
Ilustración 20.Señal de control con controlador Ziegler & Nichols



Tomado de: Diagrama propio.

En la ilustración subsecuente, se puede evidenciar la respuesta de la central hidroeléctrica al ser controlada con el Ziegler & Nichols en contiguo con un bloque de saturación el cual normaliza la señal de control entre 0 y el 1 que a su vez representa la apertura de la válvula, esta gráfica permite observar valores que no se identifican normalmente como la atenuación de la velocidad angular y la modificación de tiempo de estabilización.

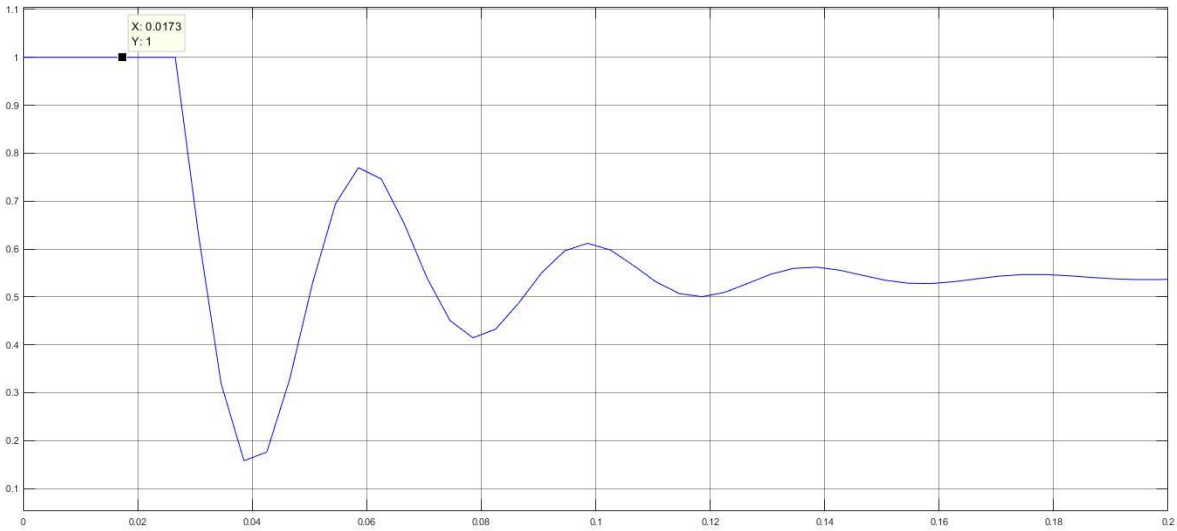
Ilustración 21. Respuesta al paso en lazo cerrado de función de transferencia con controlador Ziegler & Nichols con bloque de saturación.



Tomado de: Diagrama propio.

En la ilustración 22 se puede evidenciar la señal de control necesaria para controlar la planta mediante la técnica de Ziegler & Nichols junto al bloque de saturación.

Ilustración 22. Señal de control con controlador Ziegler & Nichols con bloque de saturación



Tomado de: Diagrama propio

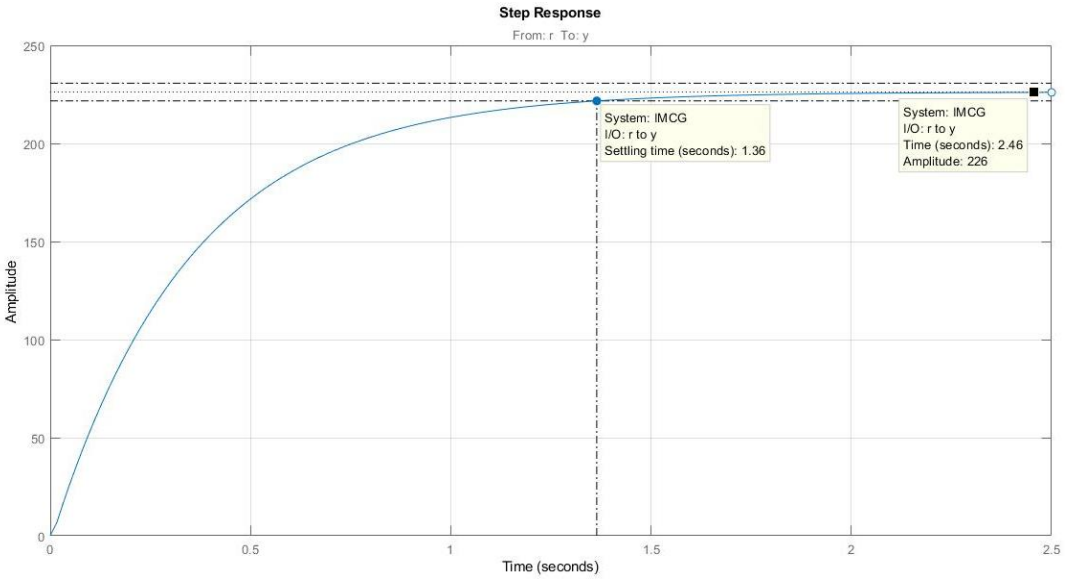
3.3.4 IMC con herramienta de sisotool

El control interno del modelo hace referencia a un procedimiento sistemático basado en el concepto de parametrización. La estructura del IMC se compone por un modelo de proceso real y por un controlador, es popularmente utilizado en las industrias para ajustar controladores PID debido a su metodología de parametrización, este tipo de controlador puede presentar respuestas a una perturbación indeseables sobre todo para procesos con constantes de tiempo muy grandes, lo anterior según Rivera y Flores [19, pp. 2-3]; el controlador obtenido se logra mediante el uso de la herramienta de sisotool y la región de diseño anteriormente propuesta.

$$C\ (s) = \frac{0.00029314\ (\mathrm{s} + 110.7)\ (\mathrm{s} + 73.7)}{\mathrm{s}\ (\mathrm{s} + 353.7)}$$

En la ilustración 23 se puede evidenciar la respuesta de la central hidroeléctrica al ser controlada con el IMC, esta gráfica permite observar valores importantes del sistema en condiciones ideales.

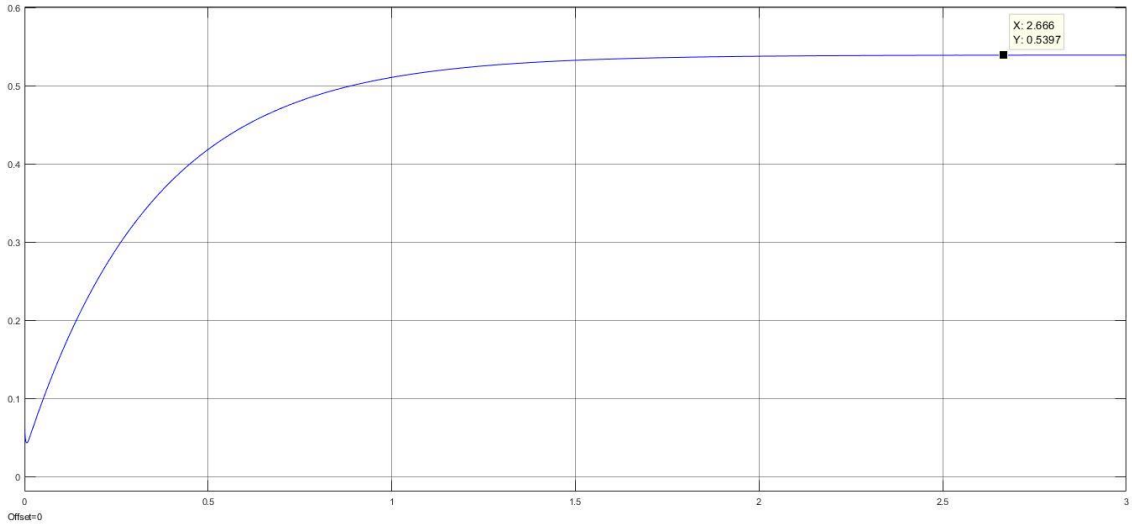
Ilustración 23.Respuesta al paso en lazo cerrado de función de transferencia con controlador IMC



Tomado de: Diagrama propio.

En la ilustración siguiente, se puede evidenciar la señal de control necesaria para controlar la central hidroeléctrica mediante la técnica del IMC, esta gráfica permite observar el valor máximo de apertura de la válvula en condiciones ideales.

Ilustración 24.Señal de control con controlador IMC



Tomado de: Diagrama propio.

En la ilustración anterior se evidencia que la señal de control está dentro de los parámetros de diseño, por consiguiente, no hay necesidad de someter el controlador ante un bloque de saturación.

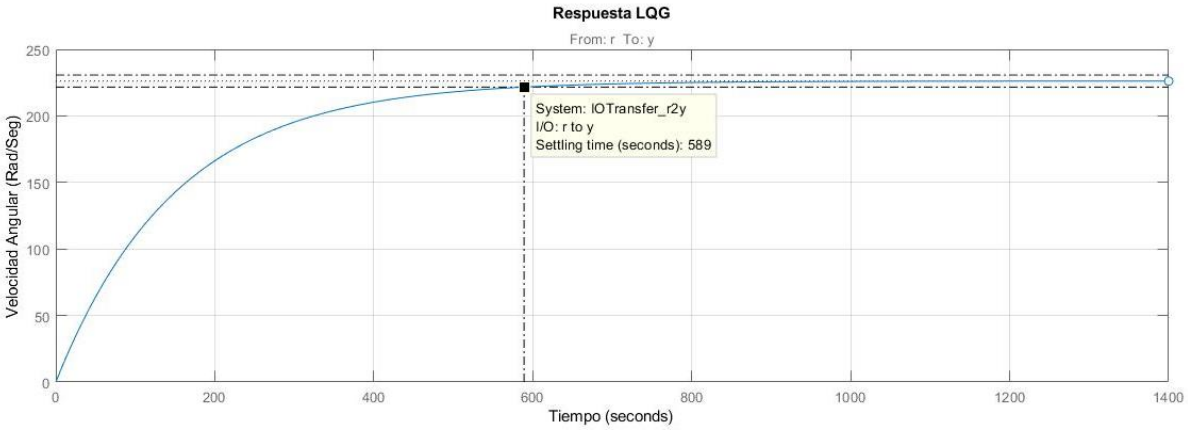
3.3.5 LQG con herramienta de sisotool

El control lineal cuadrático gaussiano es la combinación de un filtro de Kalman, es decir, un estimador lineal cuadrática (LQE) con un regulador lineal cuadrático (LQR) *[20, pp. 2-3]*, el controlador obtenido se logra mediante el uso de la herramienta de sisotool y la región de diseño anteriormente propuesta.

$$C\ (s) = \frac{0.075499\ (\mathrm{s} + 120.3)\ (\mathrm{s} + 59.66)}{\mathrm{s}\ (\mathrm{s} + 347.9)\ (\mathrm{s} + 9.822\mathrm{e}04)}$$

En la posterior ilustración, se puede evidenciar la respuesta de la planta al ser controlada con el LQG, esta gráfica permite observar valores importantes del sistema en condiciones ideales.

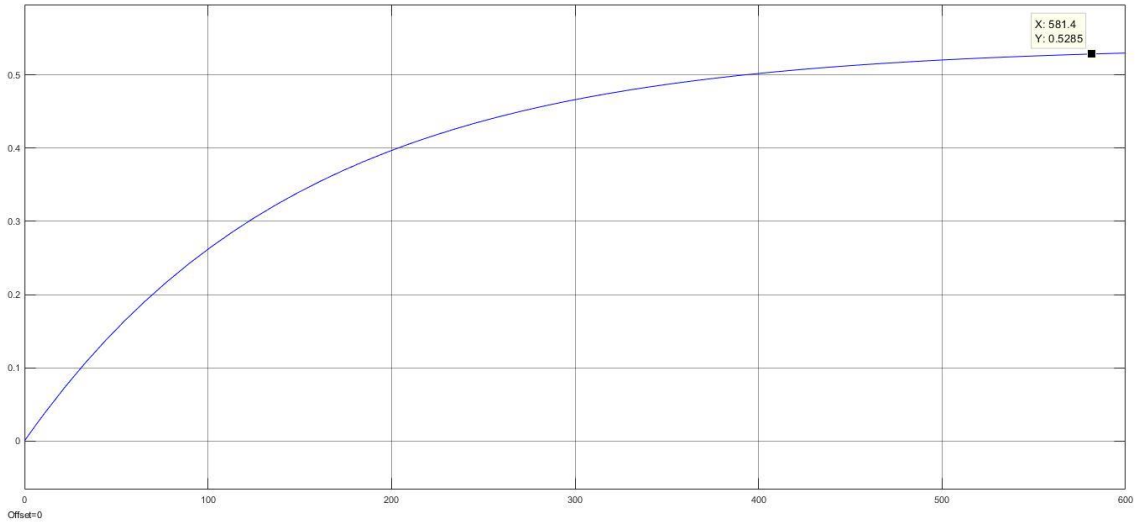
Ilustración 25.Respuesta al paso en lazo cerrado de función de transferencia con controlador LQG



Tomado de: Diagrama propio.

En la ilustración 26 se evidencia la señal de control necesaria para controlar la planta mediante la técnica del LQG, esta gráfica permite observar el valor máximo de apertura de la válvula en condiciones ideales.

Ilustración 26.Señal de control con controlador LQG



Tomado de: Diagrama propio.

En la ilustración preliminar se evidencia que la señal de control de la planta al ser controlada con el PID se encuentra dentro de los parámetros de diseño que es entre 0 y el 1, por lo tanto, no hay necesidad de implementar el bloque de saturación.

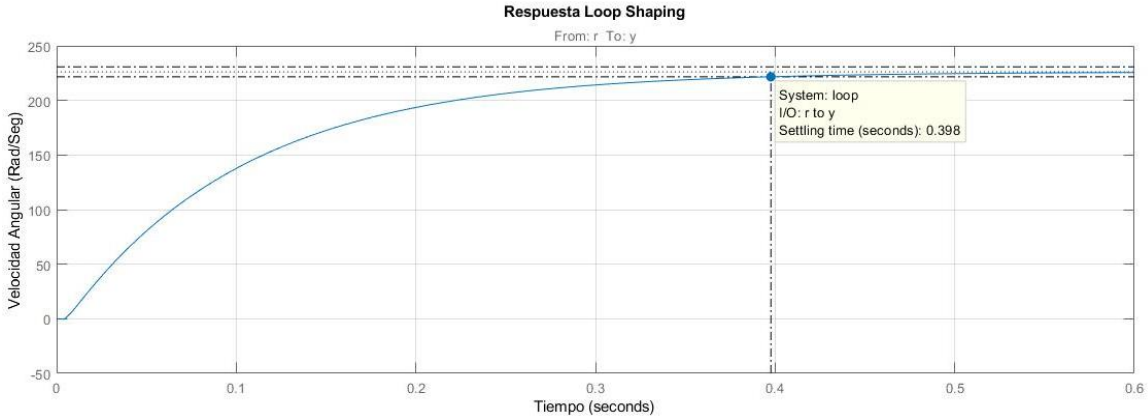
3.3.6 Loop shaping con herramienta sisotool

Combina los métodos de control clásicos como Bode, para lograr un controlador cuyas propiedades de estabilidad y rendimiento se mantengan a pesar de la relación entre la planta nominal asumida en el diseño y la verdadera planta encontrada en la práctica [21, p. 73], el controlador se obtiene mediante la herramienta de sisotool y la región de diseño propuesta anteriormente y es el siguiente:

$$C\ (s)\ =\ \frac{4.0711\ (s+4096)\ (s+320.7)\ (s+110.7)\ (s+73.7)}{s\ (s+4096)\ (s+4074)\ (s+362.6)\ (s+320.7)}$$

Cabe recalcar que el controlador obtenido para este método es de un orden elevado, por lo tanto, esto dificulta la implementación de este, posteriormente en la ilustración siguiente, se puede evidenciar la respuesta de la central hidroeléctrica al ser controlada con Loop shaping, esta gráfica permite observar valores importantes del sistema en condiciones ideales.

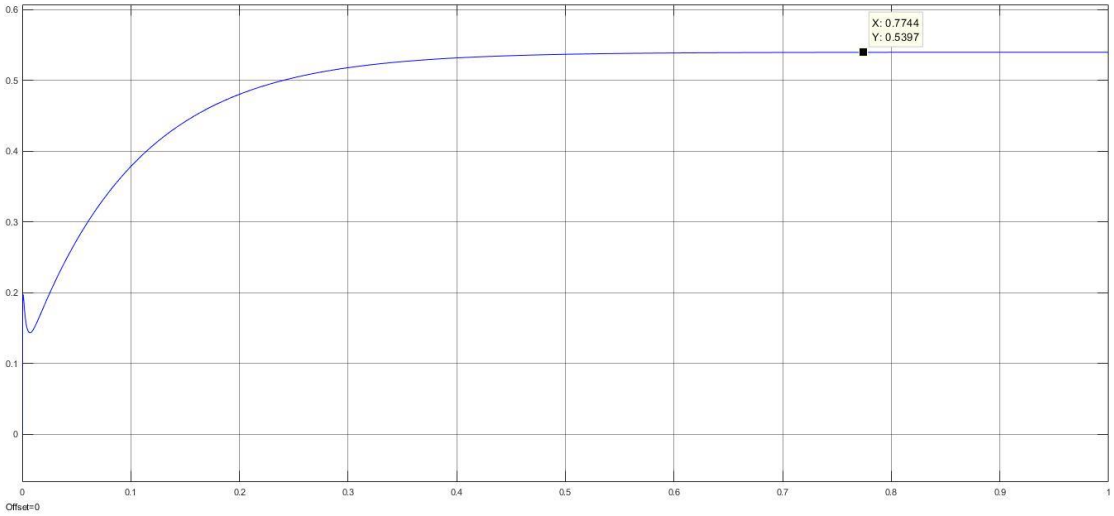
Ilustración 27.Respuesta al paso en lazo cerrado de función de transferencia con controlador Loop shaping



Tomado de: Diagrama propio.

En la ilustración 36, se evidencia la señal de control necesaria para controlar la central hidroeléctrica mediante la técnica del Loop shaping, esta gráfica permite observar el valor máximo de apertura de la válvula en condiciones ideales.

Ilustración 28.Señal de control con controlador Loop shaping



Tomado de: Diagrama propio.

En la ilustración anterior se evidencia que la señal de control está dentro de los parámetros de diseño, por consiguiente, no hay necesidad de someter el controlador ante un bloque de saturación.

4 CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

4.1 TABLA COMPARACIÓN RESPUESTA CONTROLADORES

En las tablas 2 y 3 se evidencian las respuestas del modelo de la PCH respecto a los diferentes controladores diseñados, teniendo en cuenta lo siguiente: la primera, cuenta con los datos principales posteriores a la simulación de cada controlador y no poseen bloque de saturación. Es necesario recordar que dicho bloque tiene como finalidad limitar la señal de control a un valor máximo y a uno mínimo que, en este caso, se encuentra entre uno y cero, a diferencia, del cálculo anterior, la tabla 3 si cuenta con el bloque referido y los datos de las tablas siguientes son indispensables para sacar las respectivas conclusiones, las cuales se tratan en el siguiente subcapítulo; los datos relevantes que se tomarán en cuenta para su elaboración son:

- Porcentaje del sobrepico: se refiere a la comparación en porcentaje de la velocidad angular final, frente al sobrepico.
- Tiempo de establecimiento: lapso en el que se estabiliza el sistema.
- Sobrepico: velocidad máxima que alcanza el generador antes de estabilizarse.
- Señal de control: porcentaje de apertura necesario para controlar el sistema.
- Valor angular final: velocidad angular alcanzada cuando el sistema se encuentra estabilizado.

Tabla 3. Datos relevantes de cada controlador sin filtro de saturación

Controladores	Tiempo de establecimiento (s)	Porcentaje sobrepico (%)	Valor señal máxima de control	Velocidad angular final (rad/s)
PI	0.0897	0	0.4734	226
PID	0.246	0	0.4499	226

ZIEGLER & NIKOLS	0.027	55.4%	1.81	226
IMC	1.36	0	0.5397	226
LQG	589	0	0.528	225
LOOP SHAPING	0.398	0	0.5397	226

Tomado de: Elaboración propia

La tabla 4 indicar los valores relevantes para el controlador que excede las condiciones de diseño, por lo tanto:

Tabla 4. Datos relevantes del controlador que excede la señal de control.

Controladores	**Tiempo de establecimiento (s)**	**Porcentaje sobrepico (%)**	**Valor señal máxima de control**	**Velocidad angular final (rad/s)**
ZIEGLER & NIKOLS	0.027	55.4%	1.81	226

Tomado de: Elaboración propia.

4.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS CONTROLADORES

En la siguiente tabla se muestran las ventajas y desventajas de cada controlador teniendo en cuenta los datos obtenidos mediante las simulaciones de Matlab en el modelo de la PCH.

Tabla 5.Ventajas y desventajas de cada controlador

controlador	**ventajas**	**Desventajas**
PI	• Tiempo de respuesta muy rápido	

	• Valor esperado adecuado	
PID	• Valor esperado adecuado • Tiempo de respuesta rápido • Señal de control baja • Señal de control contemplada dentro de los parámetros de diseño	
ZIEGLER Y NIKOLS	• Tiempo de respuesta muy rápido	• La señal de control excede la apertura de válvula. • Sobre pico grande puede afectar la vida útil del generador.
IMC	• Señal de control dentro de los parámetros. • No tiene sobre pico lo cual garantiza mayor vida útil del generador.	• Tiempo de respuesta lento
LQG	• Sobre pico inferior al 1% garantiza mayor vida útil del generador. • Señal de control contemplada dentro de los parámetros de diseño.	• Tiempo de respuesta muy lento.
LOOP SHAPING	• Tiempo de respuesta rápido.	• El controlador posee un orden elevado.

Tomado de: Elaboración propia.

5 CAPÍTULO 5: EFICIENCIA

5.1 RELACIÓN CANTIDAD DE ENERGÍA GENERADA EN LA PCH CON Y SIN CONTROLADOR

En esta sección, se desarrollan los cálculos pertinentes para los controladores que cumplen con las expectativas de diseño, los cuales son: tiempo de respuesta, señal de control y sobre pico; por consiguiente, los controladores que cumplen con estas perspectivas son:

- Proporcional-integrador-derivativo (PID)
- Proporcional-integrado (PI)
- Control Loop Shaping

En la siguiente tabla se muestra la información correspondiente a la generación de energía para cada uno de los anteriores controladores respectivamente; en conjunto con su apertura de válvula (señal de control), tiempo de respuesta, sobre pico y velocidad angular final.

Tabla 6.Comparación de controlador seleccionados

Controladores	Tiempo de establecimiento (s)	Valor señal máxima de control	Velocidad angular final (rad/s)
PI	0.0897	0.4734	226.2
PID	0.246	0.4499	226.2
LOOP SHAPING	0.398	0.5397	226

Tomado de: Elaboración propia.

El modelamiento matemático obtenido anteriormente se realiza con la información del generador referencia LSA 50.2 VL10, el cual, bajo recomendación propia del fabricante LEROY-SOMER, la generación máxima es de 2.2 MW/h [15]. Además, se realiza una estimación relacionando la cantidad máxima de energía generada con una apertura del 100% de la válvula para cada controlador con respecto a la apertura de ésta en su estado más crítico entregado por la señal de control; a continuación, se muestran los cálculos de eficiencia pertenecientes a los tres referidos anteriormente:

En primer lugar, el controlador PI:

$$\text{APERTURA } 100\% = \frac{1 * 2.2}{0.4734} = 4.65 \text{ Mw/H}$$

$$\text{n} = \frac{4.65}{2.205} * 100\% = 210\%$$

Al usar este controlador con la máxima apertura de válvula, el sistema se encuentra en su punto máximo de generación, sin embargo, el hecho de que la eficiencia sea del 210%, se debe a que la señal de control se encuentra dentro de los parámetros de diseño y al abrir la válvula en su totalidad la cantidad de energía producida por el sistema es mayor en conjunto con el método de control PI, por lo cual la implementación de este controlador en la central hidroeléctrica es viable y eficiente.

En segundo término, el controlador PID:

$$\text{APERTURA } 100\% = \frac{1 * 2.2}{0.4499} = 4.89\text{Mw/H}$$

$$\text{n} = \frac{4.89}{2.205} * 100\% = 221.7\%$$

Usando el controlador anterior en su máxima apertura de válvula, el sistema funcionaria a 221.7% y la cantidad de energía generada con la máxima amplitud de válvula en promedio es de 4.89Mw/H ; este porcentaje se debe a que la señal de control tan solo representa el 44.99% de la apertura total de la válvula y se puede implementar un generador de mayor cantidad de energía producida para una altura

de presa de 375 metros. Además, de ser el controlador que proporciona el mayor porcentaje de eficiencia energética.

Por último, el controlador LOOP SHAPING:

$$APERTURA\ 100\% = \frac{1 * 2.2}{0.5397} = 4.08Mw/H$$

$$n = \frac{4.08}{2.205} = 184.9\%$$

La respuesta de la planta frente al controlador LOOP SHAPING en su máxima apertura de válvula, el sistema funciona a 184.9% y la cantidad de energía generada con la máxima amplitud de válvula en promedio es de $4.08Mw/H$; dicho porcentaje se debe a que la señal de control tan solo representa el 53.97% de la apertura total de la válvula y se puede implementar un generador para una mayor cantidad de energía producida a una altura de presa de 375 metros.

Para concluir, se evidencia que la cantidad máxima de energía eléctrica depende directamente del valor de señal de control, puesto que al tener como restricción de diseño una única válvula y al hacer uso de un menor porcentaje de apertura, esta proporciona la posibilidad de implementar un generador que proporcione una mayor cantidad de energía eléctrica; específicamente en esta sección con las estrategias de control escogidas, el óptimo a implementar es el PID, puesto que este controlador cumple con los requerimientos de diseño; la señal de control necesaria para estabilizar el sistema es inferior a las demás y tiene un tiempo de establecimiento rápido y que además, sin sobre pico , lo anterior certifica la prolongación de la vida útil del generador eléctrico al no exceder su capacidad de generación.

6 CONCLUSIONES

Al implementar las diferentes estrategias de control planteadas en el presente documento del orden de proporcional-integrador (PI); proporcional-integrador-derivativo (PID); Ziegler & Nichols, control de modelo interno (IMC), Control lineal cuadrático gaussiano (LQG) y Loop Shaping en la planta simulada de la PCH, permiten identificar las características relacionadas con el modelo matemático y su respuesta en cuanto al tiempo de establecimiento, valor esperado y sobre picos; todo lo anterior, es indispensable en el momento de decidir el tipo de controlador que otorga una mayor eficiencia en cuanto a la producción energética.

Una de las metas planteadas en este proyecto se refiere a determinar la estructura acorde con la presa, componentes de turbina en conjunto con el generador, parámetros y variables de una PCH para delimitar el modelo a obtener y lograr un modelo matemático del sistema generador turbina en la PCH de Pisba, Boyacá el cual contempla hacer uso de variables no convencionales obtenidas de diferentes documentos, con el fin de realizar un modelo no idealizado más cercano al comportamiento real de una central hidroeléctrica. Sin embargo, fue imposible obtener algunas variables pues no se contaba con los permisos necesarios para acceder a esta información.

Al obtener el modelo matemático no idealizado y realizar su respectiva simulación del sistema no controlado se logra estimar la producción energética en comparación al retroalimentado en lazo cerrado, con la implementación de una de las estrategias de control obtenidas; además, es necesario recalcar que con el fin de que la simulación sea más apegada a la realidad se hace uso de un bloque de saturación, posterior a esto, se realizan los cálculos de eficiencia energética respectiva a las estrategias de control que cumplen con los requerimientos de diseño y se evidencia el aumento de producción energético para cada método.

7 RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En el presente trabajo de tesis se lograron identificar actividades las cuales en trabajos posteriores pueden ser de gran utilidad y beneficio tales como:

- Programar una visita a la central hidroeléctrica modelada, esto con el fin de obtener información crucial para el modelo matemático, debido a que los datos investigados referentes a la central hidroeléctrica escogida en el proyecto no proporcionan suficiente información acerca de los generadores que se usaron en el modelo de la planta, por lo tanto, si se hubiera tenido acceso a esa información la estimación de la función de transferencia hubiese sido más apegada a la realidad.

- Realizar ingeniería inversa de los resultados, para así, determinar una referencia de generador que se acople al estimado de generación eléctrica, además, plantear un rediseño de los controladores, con el fin de garantizar la cantidad de energía producida y a su vez el máximo de apertura de válvula.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CENTRO DE ESTUDIOS EN MEDIO AMBIENTE Y ENERGÍAS RENOVABLES (CEMAER), «https://www.cemaer.org,» [En línea]. Available: https://www.cemaer.org/energia-hidroelectrica-controversial-fuente/. [Último acceso: 02 septiembre 2019].

[2] C. MORALES ACEVEDO y F. SAAVEDRA MARTINEZ, «Diseño de una pequeña central hidroeléctrica para el municipio de Pisba-Boyacá,» Universidad Pedagógica Y Tecnológica De Colombia, Colombia, 2017.

[3] R. L. MOOT, Mecánica de fluidos, 6 ed., México: Pearson educación, 2006.

[4] L. VELAZCO, J. RUIZ, J. LOPEZ y E. CABRERA, «Ingeniería eléctrica,» México, 2017.

[5] MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE, «Aprovechamientos hidroeléctricos,» ESPAÑA, 2002.

[6] R. QUEZADA COBOS, «Área de la energía, las industrias y los recursos no renovables,» Ecuador, 2013.

[7] E. B. ANAYA, J. BELTRÁN y D. I. H. SANTANA, «Optimización de turbinas hidráulicas,» Colombia, 2014.

[8] Y. CASTILLO, M. CASTRILLÓ, M. VANEGAS, G. VALENCIA y E. VILLICAÑA, «Rol de las Fuentes No Convencionales de Energía en el sector eléctrico colombiano,» Colombia, 2015.

[9] M. RODRÍGUEZ POZUETA, «Transformadores,» España, 2012.

[10] C. MILLÁN, «Modelado en Matlab-Simulink de generadores eléctricos conectados a la red,» España, 2016.

[11] THE MATHWORKS INC, «https://la.mathworks.com,» 2019. [En línea]. Available: https://la.mathworks.com/help/control/ref/controlsystemdesigner-app.html. [Último acceso: 27 Octubre 2019].

[12] R. NAGHIZADEH, S. JAZEBI y B. VAHIDI, «Modeling hydro power plants and tuning hydro governors as an educational guideline,» Irán, 2012.

[13] A. MOURA y A. MOURA, «La generación hidroeléctrica y eolioeléctrica,» Brasil, 2019.

[14] I. D. ESTRADA VIANA, J. A. PEÑA PALACIO y C. GUARNIZO LEMUS, «Estimación de modelos lineales para el control predictivo de pequeñas centrales hidroeléctricas,» 2012.

[15] LEROY-SOMER, «https://www.leroy-somer.com,» [En línea]. Available: URL: https://www.leroy-somer.com/documentation_pdf/4098_en.pdf. [Último acceso: 23 Octubre 2019].

[16] S. NIEVES FERNÁNDEZ, «Rehabilitación del molino 'los obesos',» España, 2015.

[17] V. ALFARO, Actualización del método de sintonización de controladores de Ziegler y Nichols, vol. 1, Costa Rica, 2005.

[18] V. MAZZONE, «Controladores PID,» Argentina, 2012.

[19] D. RIVERA y M. FLORES, Internal model control, vol. 2, USA.

[20] H. CORAL, E. ROSERO y D. GOMEZ, «Implementación de un Controlador LQG para la Protección Sísmica de un Modelo Estructural de un Grado de Libertad,» Colombia, 2009.

[21] D. ARENGAS, «Diseño de controlador para cortadora rotativa de cartón corrugado,» Colombia, 2011.

PROYECTO PG-19-1-13

DESARROLLO DE ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA INCREMENTAR LA EFICIENCIA DE UNA PCH

Anexo A. Algoritmo para la simulación de la turbina (MATLAB)

```
%% Parámetros para la simulación de la turbina
h=375;
k=2.5388;
v=2.1557;
tep=0.358;
tw=0.5;
zp=tw/tep;
G=0.7;
%% APERTURA DE LA VALVULA
s=tf('s');
a=-h^(3/2)*k/(zp*tep);
b=h^(1/2)*k*v;
c=-1/(zp*tep);
d=-G/(2*sqrt(h));
numt=a/s+b;
dent=c/s+d;
Gtur=minreal(numt/dent);
step(Gtur)
```

Tomado de: Propia

Anexo B. Algoritmo para la simulación del generador (MATLAB)

```
%% Parámetros para la simulación del generador
Sbase=2200e3;
Wbase=(2*pi*1800)/50;
J=25.67;
H1=(0.5*J*(Wbase^2))/Sbase;
H=2*H1;
Amortiguador=(2200)/50;
%% Simulación del generador
numg = [1];
deng = [(H) (Amortiguador)];
generador = tf(numg,deng)
step(generador)
```

Tomado de: Propia

Anexo C. Algoritmo para la simulación del generador con turbina (MATLAB)

```
%% Simulación Turbina y Generador
total = generador*Gtur;

  %  title('Simulación de una PCH')

  subplot(2,2,1);
```

```
    step(Gtur);
    grid on
    title('Función de tranferencia de la turbina')
    xlabel('Tiempo')
    ylabel('Potencia mecánica (KW)')
        subplot(2,2,2);
        step(generador);
        grid on
        title('Función de tranferencia del generador')
        xlabel('Tiempo')
        ylabel('Frecuencia angular (rad/s)')
            subplot(2,2,[3 4]);
            step(total);
            grid on
            title('Función de tranferencia de la turbina en conjunto con
el generador')
            xlabel('Tiempo')
            ylabel('Frecuencia angular (rad/s)')

%%
```

Tomado de: Propia