

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA**

UNIÓN FENOSA



**Determinación del Lazo de regulación de velocidad de la planta
Hidroeléctrica “La Joya”**

**Informe del Proyecto de Graduación para optar por el título de
Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura**

**David Vaglio Calvo
Carné: 200319098**

12 de Noviembre del 2010



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
TRIBUNAL EVALUADOR

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal

Ing. Marvin Hernández C.

Profesor lector

Ing. Javier Pérez R.

Profesor lector

Ing. Juan Carlos Jiménez R

Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

12 de Noviembre, Cartago, 2010



Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 12 de Noviembre, 2010

David Vaglio Calvo

Céd: 304040125





Resumen

Este proyecto se desarrolló en la planta hidroeléctrica “La Joya”, ubicada en Tucurrique de Jiménez, Cartago; esta es de capital extranjero pero está regulada por la normativa nacional de Costa Rica. En lo que respecta a producción eléctrica, opera desde hace ya cuatro años; la problemática que presenta dicha planta corresponde a variaciones en el lazo de regulación de velocidad de cada una de las tres turbinas que la conforman., Dentro de estas se encuentran: variaciones en la fijación de consignas para la generación eléctrica, dependiendo del modo de operación; además de presentar error en el estado estacionario del sistema y sobre impulso cuando se presenta una variación en el mismo.

El funcionar de la Central de “La Joya” está supeditado a la capacidad de generación de la planta de Cachí, ya que el agua que utiliza esta es la misma que se usa para generar electricidad en la Central de Tucurrique. Debido a la normativa nacional si el agua no es correctamente utilizada, la empresa será multada por las ineficiencias que presente. Actualmente la planta funciona correctamente pero se cree que puede mejorar; si se corrigieran algunos errores que intervienen en su accionar esto contribuiría a reducir las pérdidas que acarrea la empresa por su mal funcionamiento.

Para determinar si es posible corregir los errores que presenta actualmente y mejorar la eficiencia del sistema, se necesita hacer un estudio del funcionamiento del lazo de control de velocidad, para realizarlo es necesario un modelo matemático que permita un análisis a profundidad del mismo. Este proyecto surge con el fin de determinar el funcionamiento actual de la planta y conocer si es posible realizar ajustes que permitan mejorar su funcionamiento.

El desarrollo del proyecto consistió en obtener un modelo matemático que incluyera los principales componentes del lazo de velocidad: tubería de alta presión, turbina, servomotor, generador y red; junto a estos subsistemas se encuentra el gobernador o regulador de velocidad utilizado en esta planta: el NEYRPIC 1000 STD, el cual corresponde a uno de los principales módulos del lazo que tuvo que ser analizado, ya que mediante este es posible realizar ajustes para mejorar la eficiencia del sistema.

Mediante la herramienta computacional MATLAB fue posible representar el modelo matemático implementado y compararlo con el funcionamiento real del sistema a través de simulaciones elaboradas en dicha aplicación. MATLAB también permitió proponer los ajustes necesarios para mejorar el comportamiento de la planta frente a las variaciones que pueda presentar la Central.

Palabras clave: regulador de velocidad, Central hidroeléctrica, NEYRPIC 1000 STD, modelo matemático, gobernador



Abstract

This project was developed in the hydropower plant "La Joya", located in Tucurrique Jimenez, Cartago; this company has a foreign capital but is governed by national laws in Costa Rica. In regard to electricity operates since four years ago, the issues presented by the plant corresponds to variations in the speed control loop of each of the three turbines that form, among these are: variations on settings for power generation and its determination so like mode of operation, in addition to presenting at the steady state error of the system and drive when there is a variation on it.

Work at the Central "La Joya" is subject to Cachi's generation capacity plant, because the water that "La Joya" use at this project is the same that is used to generate electricity on Tucurrique's Central. Due to national legislation if the water is not properly used, the company will be fined by the inefficiencies present. Currently the plant operates properly, but they think is possible to improve it, if they corrected some errors involved in their actions might help reduce the losses that the company brings it to malfunction.

To determine how is possible to correct the errors currently present and improve the efficiency of the system, It need to do a study about the speed control loop, so do we need a mathematical model to an analysis depth. This project results to determine the current operation of the plant and see if you can make adjustments to improve its performance.

Development of the project consisted on to obtain a mathematical model that includes the main components of the speed loop, high pressure piping, blower, servo motor, generator and network, with these subsystems is the governor or speed regulator used in this plant: the NEYRPIC 1000 STD, which corresponds to one of the main modules of the loop had to be analyzed, and that through this you can make adjustments to improve efficiency.

Using MATLAB's software tool was possible to represent the mathematical model implemented and compared with the actual operation of the system through simulations created in that application. MATLAB also allowed proposing the necessary adjustments to improve plant performance to changes that may occur in the Central.

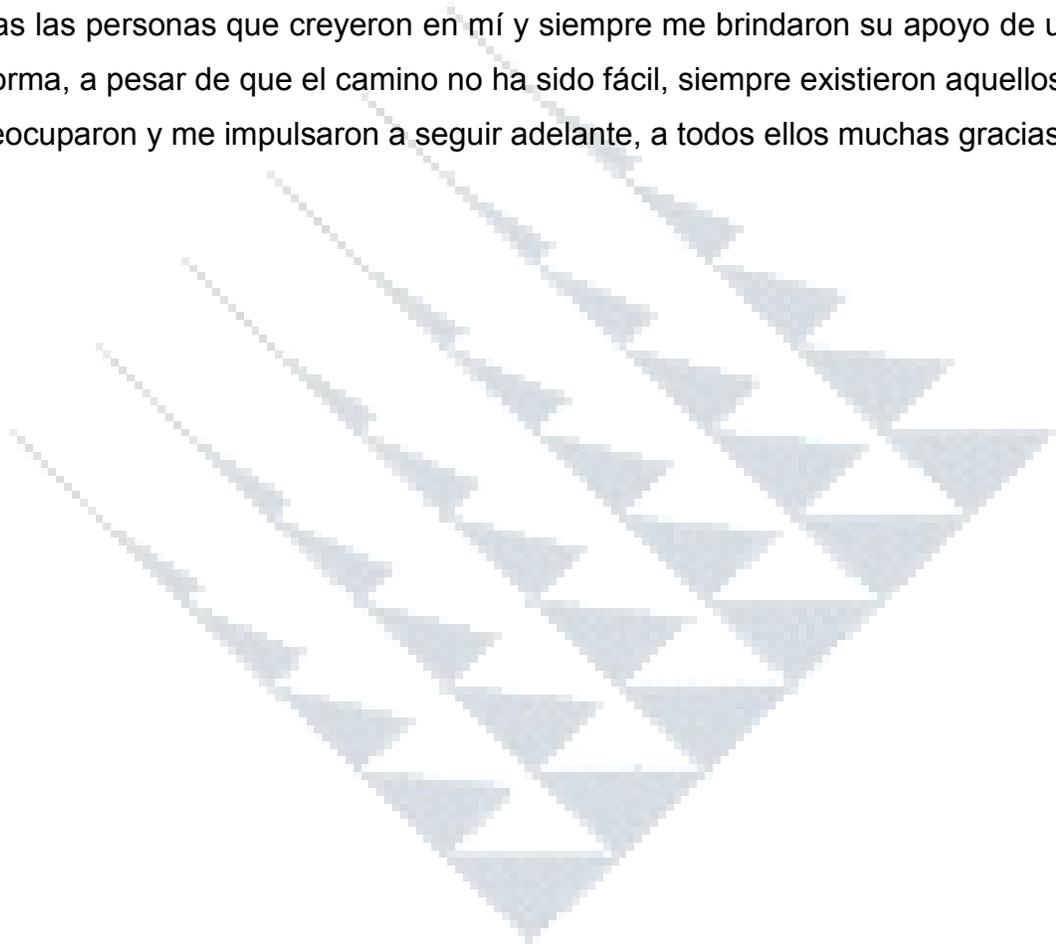
Keywords: cruise control, hydroelectric power, NEYRPIC 1000 STD, mathematical model, Governor



Dedicatoria

A mis padres por darme las herramientas más importantes para vivir: el amor, comprensión y respeto. Gracias a ellos he podido llegar a este momento, donde todos los esfuerzos realizados se ven recompensados con la finalización de mis estudios para ser ingeniero.

A todas las personas que creyeron en mí y siempre me brindaron su apoyo de una u otra forma, a pesar de que el camino no ha sido fácil, siempre existieron aquellos que se preocuparon y me impulsaron a seguir adelante, a todos ellos muchas gracias.





Agradecimientos

Agradezco a Dios y a mis padres, ya que ellos son las principales motivaciones de este trabajo, sin su ayuda hoy no sería nada de lo que soy. También agradezco a toda mi familia y a las diferentes personas que a lo largo de mi carrera me han apoyado.

Agradezco a la empresa OYM ENERGY, especialmente a su división UNION FENOSA en Costa Rica, por permitirme desarrollar mi proyecto de graduación en su empresa. Muy especialmente al Ingeniero Antonio Sánchez, asesor del proyecto y jefe de la planta hidroeléctrica “La Joya”. Junto a él otras personas que fueron parte importante en el proyecto como el ingeniero Washington Lama y don Arturo Porras, sin la ayuda de estas personas no habría sido posible la culminación del presente trabajo.



ÍNDICE GENERAL

Resumen	iii
Abstract	iv
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xi
Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Problema existente e importancia de su solución.....	1
1.2 Solución seleccionada.....	6
Capítulo 2: Meta y Objetivos	14
2.1 Meta.....	14
2.2 Objetivo general.....	14
2.3 Objetivos específicos.....	14
Capítulo 3: Marco teórico	15
3.1 Descripción del sistema en general	15
3.1.1 Embalse.....	16
3.1.2 Obras de conducción.....	17
3.1.3 Tanque de oscilación.....	17
3.1.4 Tubería Forzada.....	18
3.1.5 Casa de máquinas.....	18
3.1.6 Turbina hidráulica.....	18
3.1.7 Distribuidor.....	20
3.1.8 Sistema posicionador.....	20
3.1.9 Gobernador.....	22
3.1.10 Generadores.....	22
3.1.11 Sistemas de excitación.....	23
3.1.12 Sensor de velocidad.....	24
3.1.13 Obras de desfogue.....	25
3.2 Antecedentes Bibliográficos	26
3.3 Descripción de los principios físicos y matemáticos del modelo de la planta	29
3.3.1 Modelado de la turbina y tubería de presión.....	29



3.3.2 Posicionador y servomotor	34
3.3.3 Modelo del generador	35
3.3.4 Modelado de la carga.....	42
3.3.5 Tiempos de integración de consigna.....	44
3.3.6 Cambios Carga-Frecuencia.....	45
3.3.7 Control de Potencia PI.....	45
3.3.8 Control de velocidad PID.....	46
3.3.9 Característica carga-frecuencia negativa	47
Capítulo 4: Procedimiento metodológico.....	49
4.1 Reconocimiento y definición del problema.....	49
4.2 Obtención y análisis de información.....	51
4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución.....	52
4.4 Implementación de la solución	56
4.5 Reevaluación y rediseño.....	60
Capítulo 5: Descripción detallada de la solución.....	61
5.1 Análisis de soluciones y selección final.....	61
5.2 Modelo del lazo de regulación de velocidad	64
5.2.1 Gobernador	64
5.2.2 Posicionador.....	69
5.2.3 Servomotor	70
5.2.4 Turbina	70
5.2.5 Generador y Red	71
5.2.6 Medidor de velocidad	71
5.2.7 Medidor de Potencia (PECA).....	71
5.2.8 Diagrama completo del lazo de velocidad de la planta.	72
5.3 Descripción del software	74
Capítulo 6: Análisis de Resultados	77
6.1 Resultados Experimentales:.....	77
6.1.1 Características principales de la planta.....	77
6.1.2 Parámetros de configuración del NEYR PIC 1000	78
6.1.3 Descripción de los parámetros más importantes:	81
6.1.4 Pruebas de arranque	85
6.1.5 Variaciones de consigna	87
6.1.6 Leyes de interpolación	93
6.1.7 Limitación del distribuidor	96
6.1.8 Respuesta del sistema modelado	96
6.1.9 Pruebas de estabilidad	100



6.2 Análisis de resultados	102
Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones	112
7.1 Conclusiones	112
7.2 Recomendaciones	113
7.2.1 Ajuste de parámetros.....	113
7.2.2 Funcionamiento modo Isla.....	115
Bibliografía	116
Apéndices	118
A. 1 Glosario, abreviaturas y simbología	118
A. 2 Información sobre la empresa	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de bloques del modelo del lazo de regulación de velocidad	3
Figura 2 Estructura funcional del regulador NEYRPIC	4
Figura 3 Interacción del gobernador NEYRPIC con el resto del sistema	5
Figura 4 Principales partes de una central hidroeléctrica	8
Figura 5 Diagrama de bloques interno del Regulador NEYRPIC	10
Figura 6 Variables que intervienen en el sistema de regulación de velocidad	11
Figura 7 Diagrama de una planta Hidroeléctrica	16
Figura 8 Tipos de Turbinas.....	19
Figura 9 Distribuidor y partes que lo conforman	20
Figura 10 Esquema del servomotor controlado con un accionador ED.....	21
Figura 11 Generador síncrono de CA.....	23
Figura 12 Sistemas de excitación básicos.....	24
Figura 13 Rueda dentada y captador magnético.....	25
Figura 14 Gobernador centrífugo. (Ver ref. [16])	26
Figura 15 Diagrama de bloques de sistema copiador	34
Figura 16 Principio de inducción de Faraday	36
Figura 17 Conversión de energía mecánica a energía eléctrica.....	38



Figura 18	Relación entre la potencias mecánica, eléctrica y cambio de velocidad ..	42
Figura 19	Diagrama de bloques del generador y la red	44
Figura 20	Rampa de integración	44
Figura 21	Diagrama de bloques de un regulador primario con estatismo.....	47
Figura 22	Característica de un control primario con estatismo.....	48
Figura 23	Diagrama de bloques del regulador de velocidad según ALSTON	65
Figura 24	Diagrama de Bloques del consignador.....	67
Figura 25	Diagrama de un regulador PID según la norma CEI-61362.....	67
Figura 26	Regulador Carga Frecuencia	68
Figura 27	Regulador de estatismo permanente.....	69
Figura 28	Modelo encontrado para el Posicionador.....	70
Figura 29	Diagrama de bloques del servomotor.....	70
Figura 30	Modelo de turbina implementado	70
Figura 31	Función de transferencia del medidor de velocidad.....	71
Figura 32	Diagrama de bloques del Medidor de potencia (PECA).....	71
Figura 33	Diagrama de bloques del lazo de velocidad de planta	73
Figura 34	Curva de aceleración en tiempo mínimo.....	82
Figura 35	Secuencia de arranque de las 3 unidades de la central “La Joya”.....	86
Figura 36	Respuesta del sistema ante un escalón de 25%, consigna de 10MW	87
Figura 37	Respuesta del sistema ante un escalón de 25%, consigna de 15MW	88
Figura 38	Respuesta del sistema ante un escalón de 25%, consigna de 20MW	88
Figura 39	Respuesta ante un escalón en la consigna de potencia del sistema.....	89
Figura 40	Variación de carga desde potencia mínima a máxima generada	89
Figura 41	Respuesta del sistema ante variaciones en regulación por apertura	90
Figura 42	Parámetros de regulación ante variaciones en la consigna por apertura	90
Figura 43	Curva de linealización del servomotor de la unidad 1.....	94
Figura 44	Curva de linealización del servomotor de la unidad 2.....	94
Figura 45	Curva de linealización del servomotor de la unidad 3.....	95
Figura 46	Linearización de la curva de consigna de apertura	95
Figura 47	Arranque de unidad, regulación PID.....	97
Figura 48	Apertura del distribuidor ante una señal de escalón unitario	97
Figura 49	Variación de velocidad ante un escalón unitario en la secuencia de arranque	98
Figura 50	Potencia generada en el arranque en vacío ante un escalón unitario	98
Figura 51	Variación de consigna con un escalón de 25 %	99
Figura 52	Regulación por apertura, variación del 25% (simulación).....	99



Figura 53	Lugar de las raíces del sistema con el controlador implementado	101
Figura 54	Respuesta del sistema ante impulso con el controlador implementado .	101
Figura 55	Ejemplo de un corrector digital	106
Figura 56	Respuesta al impulso unitario del sistema.....	111
Figura 57	Lugar de las raíces del sistema con el regulador ajustado a nuevos parámetros	113
Figura 58	Criterio de estabilidad de Niquist y respuesta al impulso del regulador ajustado	114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Parámetros de configuración del regulador de velocidad	69
Tabla 2	Datos de Turbina hidráulica.....	77
Tabla 3	Datos eléctricos del generador	77
Tabla 4	Parámetros de configuración de operación de las unidades	79
Tabla 5	Valores regulables por el usuario en el proceso de aceleración.....	82
Tabla 6	Parámetros de la regulación de velocidad (disyuntor abierto)	83
Tabla 7	Valores programados para el arranque.....	87
Tabla 8	Regulación de velocidad por potencia, unidad 2	92
Tabla 9	Regulación de velocidad por apertura, unidad 2	92
Tabla 10	Conjunto de puntos que forman la ley de linealización del servomotor.....	93
Tabla 11	Apertura del distribuidor.....	96



Capítulo 1: Introducción

El presente capítulo da a conocer la situación en que trabaja la planta Hidroeléctrica “La Joya”; los problemas que presenta debido al modo de operación actual y la incapacidad que existe para corregirlos, además se expone una propuesta que ayuda a entender mejor el funcionamiento de la planta, para así corregir en alguna medida los problemas que actualmente se dan..

1.1 Problema existente e importancia de su solución

La planta hidroeléctrica “La Joya” tiene aproximadamente 4 años de generar energía eléctrica para el país, en este período ha sufrido perturbaciones por diversas razones, entre ellas variaciones en el caudal y problemas en la línea. El agua es tomada del río Reventazón, pero el caudal está determinado por la represa hidroeléctrica de Cachí, el agua que llega a esta represa es reutilizada por la Central de “La Joya” por medio de un conducto que la hace llegar directamente a su embalse.

Esta dependencia provoca que en ocasiones se tenga que detener una o varias de las turbinas que están en funcionamiento, debido a que la Central de Cachi disminuye su caudal por motivos propios y en algunas ocasiones ocurre hasta el paro completo de la Central de “La Joya”.

Las perturbaciones ocurridas en la línea son normalmente producto de descargas atmosféricas o fallos en la línea, debido a ramas de árboles que tocan las líneas de transmisión en el tramo que comunica la Central de “La Joya” con la casa de máquinas de Cachí, además de las variaciones propias de la red al estar conectada al sistema nacional de electricidad.

El sistema de control que regula las turbinas de la central hidroeléctrica de “La Joya” en la generación de electricidad se ve afectado por las perturbaciones antes citadas, dicho control también se encarga de mantener los parámetros preestablecidos por los operarios de la planta. En el proceso se debe realizar



ajustes para el correcto funcionamiento de la planta, así como también cumplir con los requerimientos mínimos definidos por el país en el proceso hidroeléctrico.

El gobernador que opera actualmente fue implementado por la empresa francesa ALSTON la cual utilizó los parámetros proporcionados por la planta para así ajustar el controlador, esto se hizo en el proceso de montaje, el cual cabe aclarar fue hecho por una división de la empresa que en ese momento estaba a cargo.

Luego de la puesta en marcha de la planta, otra división de la compañía pasó a tener el cargo de la operación y mantenimiento de la central hidroeléctrica. Si bien el funcionamiento es satisfactorio, se presentan algunas oscilaciones ante perturbaciones, además de sobre-impulso ante variaciones en la consigna o en la carga, también presenta un error en estado estacionario que puede ir desde un 1% hasta un 20% dependiendo del modo de operación (ya sea regulación por apertura o por potencia).

La Central de “La Joya” en este momento no cuenta con un diagrama técnico del regulador NEYRPIC que muestre su funcionamiento para así ajustarlo y corregir algunas de las variaciones que presenta actualmente. “La Joya” como usuario del producto (regulador NEYRPIC) puede tener acceso a cierta parte de configuración de este gobernador, pero los manuales de referencia son muy pobres en información y se encuentran solo en francés. Además como fue otra sección de la empresa la que estuvo durante la puesta en marcha de la planta, no existe ninguna persona capacitada que pueda realizar los ajustes necesarios en el gobernador (NEYRPIC).

Actualmente la planta no cuenta con un modelo matemático que involucre el gobernador (NEYRPIC), el servomotor, la turbina y el generador, que juntos forman el lazo de control del regulador de velocidad; solo existe un diagrama de bloques con cajas negras las cuales únicamente muestran la interrelación entre ellas. No se tiene claro el comportamiento de cada una de las partes que conforman el lazo ante las perturbaciones a la que está expuesta la planta, es

también por esta falta de información que no es posible analizar el comportamiento de la planta y así corregir los errores que presenta. La Figura 1 muestra el diagrama de bloques del lazo de regulación de velocidad de la planta.

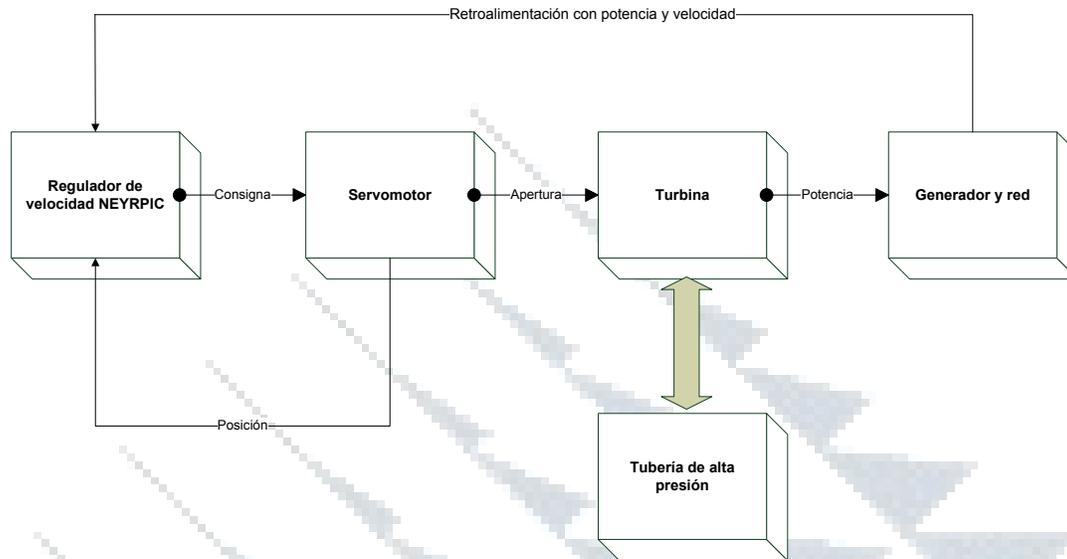


Figura 1 Diagrama de bloques del modelo del lazo de regulación de velocidad

Se sabe que internamente el NEYRPIC posee un controlador PID el cual está encargado de alcanzar la velocidad de sincronismo con la red y mantenerla invariable durante todo momento, además de tener un regulador encargado de mantener la potencia constante a partir de una consigna dada. Cuando el grupo (turbina + generador) está acoplado a la red, también cuenta con un sistema que controla la posición del servomotor. En la Figura 2 se muestra como está estructurado el sistema antes descrito del regulador NEYRPIC.

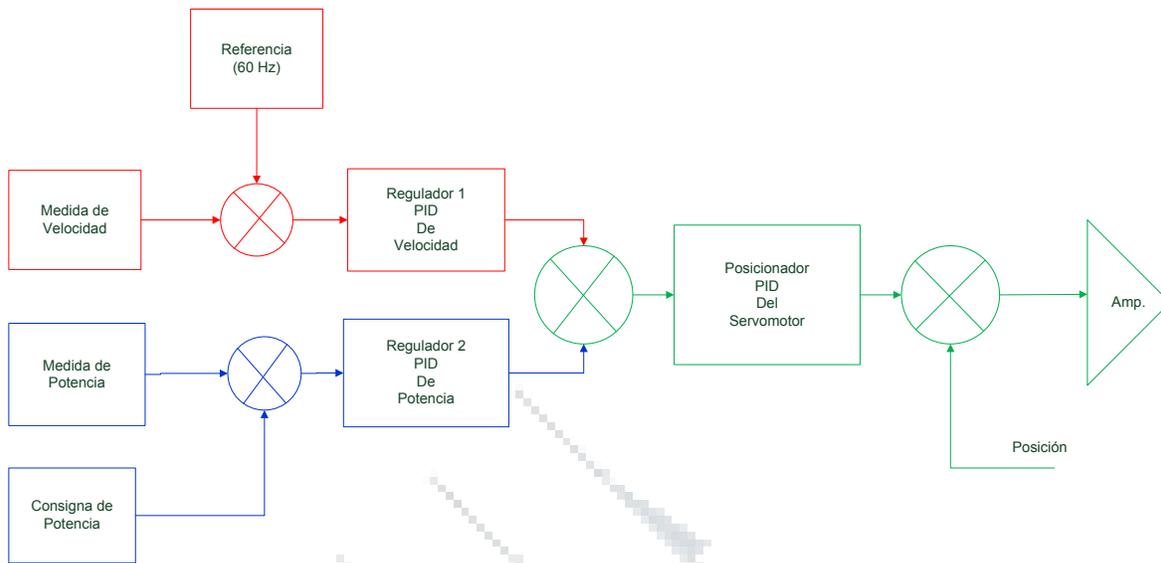


Figura 2 Estructura funcional del regulador NEYRPIC

Fuente: Alston, ver [7]

Los módulos internos antes mencionados del regulador pueden ser ajustados por variables de configuración que son accedidos por el usuario (planta “La Joya”) en la memoria del regulador mediante conexión serial de un computador con un programa que interpreta la información proveniente del NEYRPIC. El software que permite la comunicación con el gobernador se llama STATUS, este también es suministrado por la empresa ALSTON (fabricante del NEYRPIC), permite observar en tiempo real el funcionamiento del regulador y el comportamiento de las principales variables que intervienen en el proceso de regulación, la figura 3 ilustra este proceso.

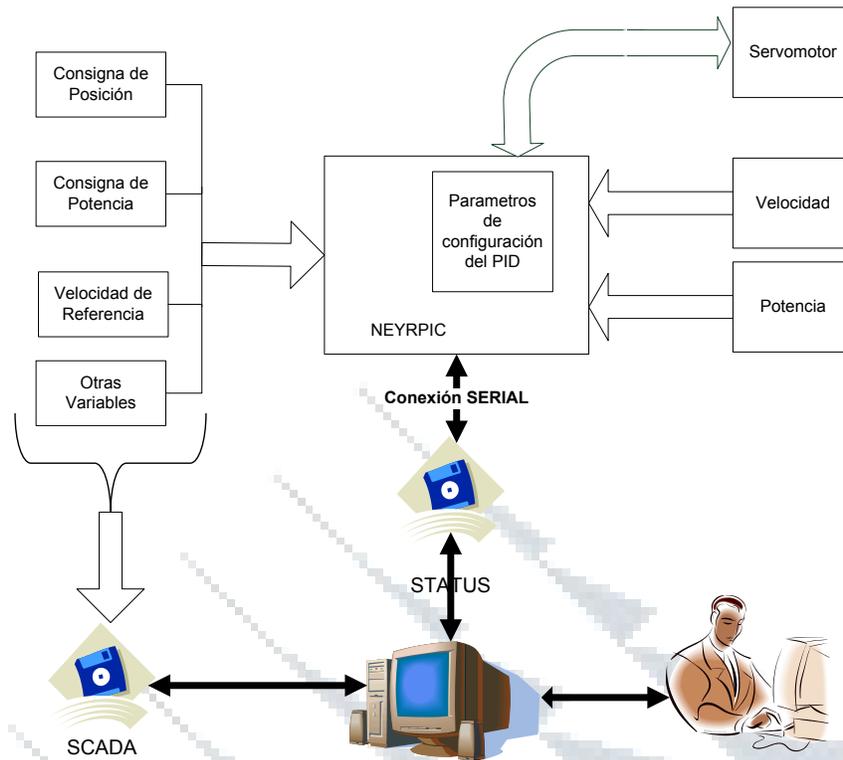


Figura 3 Interacción del gobernador NEYRPIC con el resto del sistema

Mediante el programa STATUS es posible cambiar algunos parámetros que se encuentran programados dentro del regulador, pero la información con la que se cuenta es insuficiente para determinar la función específica de cada uno. Dentro de estos se encuentran las variables de programación de los reguladores PID, de los cuales tampoco se cuenta con el criterio técnico que permita ajustar correctamente los valores.

Como se mencionó anteriormente el funcionamiento completo del lazo de regulación de velocidad no es conocido y no se tiene pleno conocimiento de la respuesta del mismo ante perturbaciones o cambios en la configuración.

Por estos motivos para la planta Hidroeléctrica “La Joya” es difícil ajustar el regulador ya implementado, para mejorar su desempeño, debido a que no cuenta con los criterios necesarios para hacerlo. Al no ajustar correctamente el regulador,



la planta presenta problemas de operación que provocan pérdidas en la generación, y pérdidas económicas debido a multas por el incumplimiento de las reglas de generación que debe cumplir la empresa privada.

Dentro de las multas a las que está expuesta la planta se pueden mencionar los límites máximos y mínimos de generación, estos están supeditados con respecto a lo que está generando la planta de Cachí, donde no debe haber una diferencia mayor a 2 MegaWats con respecto a la planta “La Joya”. Otra multa a la que la planta debe hacerle frente es por pérdidas de caudal, se supone que toda el agua que hace mover las turbinas de la central de Cachi debe ser aprovechada por “La Joya”, de lo contrario también se tendrá que pagar el monto respectivo proveniente a ese desaprovechamiento.

Las multas antes mencionadas hacen que se tenga especial interés en tratar de ajustar el regulador de velocidad para evitar dentro de lo posible pagos innecesarios debido al funcionamiento actual del sistema.

1.2 Solución seleccionada

Los problemas que actualmente presenta la empresa se deben a errores en el proceso de montaje de la planta, que en su momento no fueron considerados como críticos pero que repercuten en el desempeño de la misma, como ya se mencionó en la sección anterior actualmente no se tiene claro el funcionamiento del lazo de regulación de velocidad, donde se incluye el regulador o Gobernador NEYRPIC, es por esto que para corregir algunos de los errores que actualmente tiene la planta es necesario obtener un modelo matemático que ayude a explicar mejor el funcionamiento del lazo de regulación de velocidad y a la vez que este proporcione las herramientas necesarias que permitan ajustarlo.

La empresa Unión Fenosa ha planteado la necesidad de obtener el modelo matemático de la planta hidroeléctrica “La Joya” para que a través del mismo se suministre mayor información del funcionamiento actual de la planta y en la



medida de lo posible brindar recomendaciones que contribuyan a mejorar el desempeño de la central.

Para llevar a cabo la obtención del modelo matemático de la planta se requiere conocer los parámetros físicos propios del sistema, entre ellos el salto o altura de la caída final, el caudal, el diámetro de la tubería, entre otras; además se debe tener noción básica de la forma del mismo para así aproximar el implementado teóricamente con la respuesta real del sistema, mediante la comparación de las gráficas de respuesta del sistema.

En el caso de una central hidroeléctrica se deben tomar en cuenta tanto las características dinámicas como las hidráulicas que intervienen en el sistema, además de las propiedades físicas que caracterizan cada una de las plantas y que intervienen de forma directa en el funcionamiento de la misma [3]. Por este motivo primero se recopilará toda la información que se encuentre disponible en la planta con respecto a sus parámetros físicos reales y comprobar en la medida de lo posible estos valores, para aproximar de la mejor manera posible el modelo a implementar.

Dentro de las partes más importantes a tomar en cuenta para realizar el modelado de la planta están:

- Regulador NEYRPIC.
- Servomotor.
- Turbina y Tubería de alta presión.
- Generador y red.

La Figura 4 muestra el diagrama de cómo se encuentra estructurada una planta en sus partes principales.

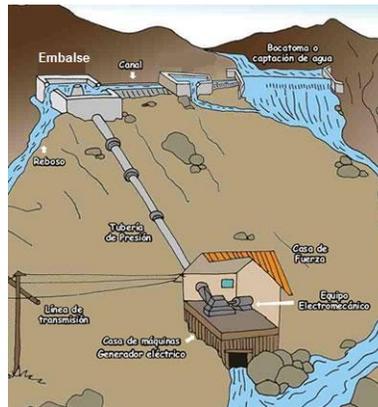


Figura 4 Principales partes de una central hidroeléctrica

Fuente: Mora, José E, “Aplicación de los sistemas de control en plantas hidroeléctricas”, página 5.

Como se mencionó en secciones anteriores el gobernador o regulador NEYRPIG es la parte más importante en el proceso de regulación de velocidad y generación; hasta el momento es una caja negra de la cual no se tiene información sobre su funcionamiento interno (por las razones expuestas en la sección de la definición del problema), solo presenta un diagrama de bloques de cómo está estructurado internamente, es por esto que para obtener la respuesta completa del regulador es necesario obtener el comportamiento de cada sub-bloque.

Para determinar la respuesta de los bloques internos del regulador y de los demás bloques que conforman el lazo de regulación de velocidad se realizarán pequeños experimentos, estos se harán de dos maneras: de forma real y simulada.

Los experimentos reales corresponden a variaciones que se pueden realizar en tiempo de operación, es decir cuando el regulador se encuentra funcionando físicamente en la planta; las variaciones que se pueden hacer corresponden al cambio de parámetros en cuanto a consignas de operación (apertura/potencia) de cada una de las turbinas. La forma en la que se puede observar la respuesta de este proceso es mediante el programa STATUS mencionado anteriormente, es a través de él que es posible obtener la entrada y salida de los bloques internos del



regulador, esto se puede hacer en tiempo real y la información recopilada dentro de la prueba puede ser almacenada en un computador para posteriormente ser analizada en detalle.

La otra forma en que se realizarán experimentos es mediante un módulo de repuesto del gobernador (NEYRPIC), con el cual se simularán pruebas extremas que no se puedan hacer con los que se encuentran en funcionamiento real, las señales serán simuladas por módulos externos que se encargarán de generar las señales necesarias. Al igual que con los experimentos reales, el NEYRPIC permite la conexión serial con un computador y mediante el programa STATUS es posible observar en tiempo real las variaciones que presenten los bloques internos del mismo. La Figura 5 muestra el diagrama interno proporcionado por la empresa ALSTON del regulador NEYRPIC 1000.



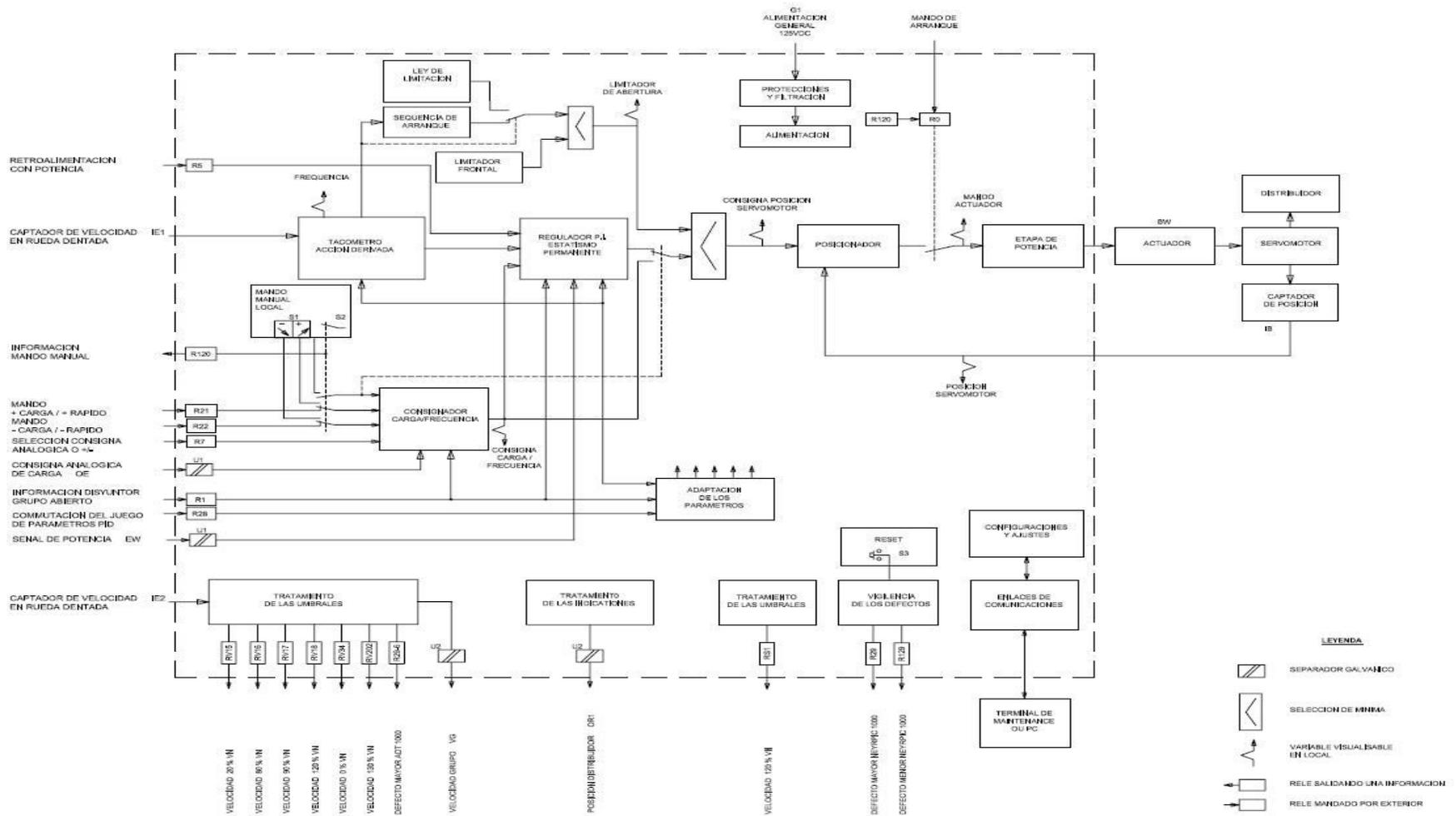


Figura 5 Diagrama de bloques interno del Regulador NEYRPIC

Fuente: ALSTON, Ver [7]

La turbina como una de las partes más importantes en el proceso de generación de electricidad debe ser modelada como parte del lazo, esto para entender parte del funcionamiento del regulador y la acción del mismo sobre la turbina y el sistema en general; aunado a ella está la tubería de alta presión, la cual interviene directamente en el funcionamiento directo de la turbina, por lo que la tubería también debe ser considerada en el modelo.

El sistema de control es lo que se desea mejorar, pero parte importante del mismo es la acción que se ejerce sobre la turbina, esto lo hace de forma indirecta por medio del servomotor, que presenta un determinado tiempo de respuesta y una respuesta propia con respecto a las variaciones de posición, las cuales debe seguir a partir de las ordenes del gobernador.

Para corregir el funcionamiento del lazo de regulación de velocidad es fundamental determinar los factores y variables que intervienen en el mismo, estos son: potencia, caudal, presión, apertura del distribuidor y la velocidad. Es a través de las variables de entrada y del control de las mismas, que el sistema se mantiene relativamente estable, por lo anterior se debe tomar especial atención en esta parte del modelo a crear. Para su elaboración se utilizarán un conjunto de ecuaciones estáticas [5] que relacionan las variables antes citadas. La figura 6 muestra la interacción de este proceso.

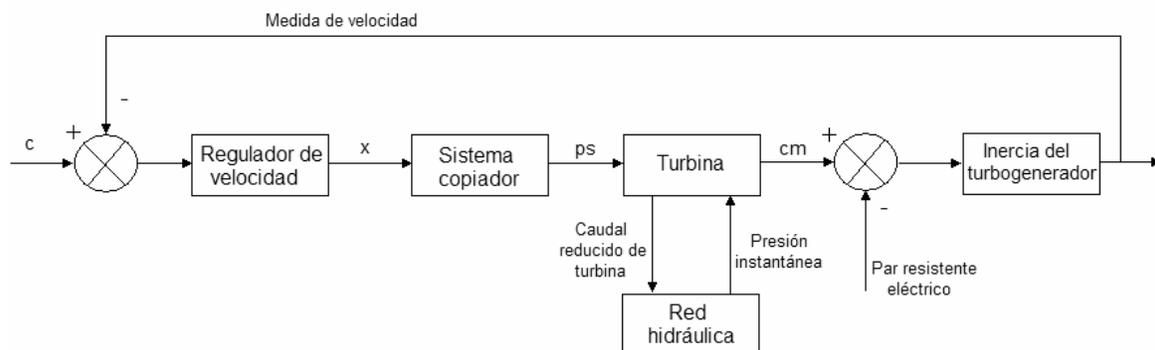


Figura 6 Principales variables que intervienen en el sistema de regulación de velocidad

Fuente: Ledesma, ver [4]



Donde:

C: corresponde a la consigna de velocidad.

X: corresponde a la consigna de posición.

ps: corresponde a la medida de posición.

cm: corresponde al Par Hidráulico.

Con respecto al modelado de la turbina se tienen dos métodos: el ideal y el no ideal [2]; el primero se basa en aplicaciones básicas de la mecánica de fluidos pero no considera las pérdidas que esta pueda tener, sin embargo refleja muy bien la característica no lineal de la turbina; el modelado no ideal es el que se realiza a partir del ajuste de las curvas obtenidas en ensayos realizados en la misma. Al utilizar estos dos procedimientos para el análisis, se obtendrá un modelado más exacto.

Dentro del proceso de modelado se tienen características no lineales, las cuales hacen más difícil el análisis, es por esto que se procederá a su linealización a través de ajustes en las ecuaciones teóricas y utilizando métodos numéricos para su aproximación.

Otro punto importante en el análisis del modelado matemático es el regulador utilizado en la turbina, esto la convierte en un sistema retroalimentando, por lo que es importante determinar cómo influye su accionar en el funcionamiento correcto de la planta, cómo afectan las variables que este mide y que a partir de las mismas se genera una respuesta que actuará sobre el sistema, esta es la base principal del proyecto a realizar.

Para llevar a cabo este trabajo se utilizará una herramienta especializada en el análisis numérico y de sistemas, este es el software llamado MATLAB, el cual cuenta con librerías especializadas en el modelado de diferentes tipos de plantas y de métodos de aproximación de las mismas, además de contar con programas de



simulación donde se analiza la respuesta de sistemas a diferentes tipos de entrada y de perturbaciones; también en esta herramienta es posible diseñar los compensadores y reguladores que ayudan a la planta a mantenerse estable.

A partir de lo anterior se representa el regulador que actualmente tiene implementado la planta, el sistema completo considerará un modelo matemático donde se incluya el regulador y sea posible analizar la respuesta del sistema actual, para posteriormente brindar sugerencias y recomendaciones que contribuyan a ajustar el controlador ya implementado.

Como parte de las herramientas que se utilizarán para llevar a cabo el modelado completo del lazo de regulación, se encuentra el software STATUS mencionado anteriormente, es a través de este programa que se obtendrá la respuesta en tiempo real de algunas de las variables que interviene en el lazo de regulación (velocidad, apertura del servomotor, valores de consigna, potencia), las cuales pueden almacenarse para ser estudiadas en detalle.

El proyecto a desarrollar consiste en determinar la respuesta del lazo de regulación de velocidad ante variaciones con respecto a la potencia, por lo que se pretende obtener un modelo que relacione todas las partes: gobernador (regulador NEYRPIC), servomotor, turbina y tubería de alta presión, además de su relación con el generador y la red. El desarrollo de cada uno de los bloques contribuirá a determinar el accionar del regulador de velocidad y que a partir de esto se pueda ajustar para contribuir a un mejor desempeño en la planta y evitar multas económicas innecesarias que se dan debido a que actualmente la planta no funciona de la mejor manera.



Capítulo 2: Meta y Objetivos

2.1 Meta

Brindar recomendaciones que contribuyan a mejorar el funcionamiento de la planta hidroeléctrica “La Joya” ante perturbaciones o cambios en su modo de operación.

2.2 Objetivo general

Realizar ajustes en el regulador de velocidad (NEYRPIC) de la planta para mejorar su funcionamiento, esto a partir de su estudio y el comportamiento actual del sistema.

2.3 Objetivos específicos

- a. Determinar la respuesta del gobernador NEYRPIC ante variaciones y su interacción con el resto de componentes del lazo de regulación de velocidad.
- b. Determinar el comportamiento de los subsistemas que conforman el lazo de regulación de velocidad de la planta hidroeléctrica “La Joya”.
- c. Integrar los bloques funcionales principales: gobernador, servomotor, turbina y generador para obtener la respuesta total del lazo de regulación de velocidad.
- d. Evaluar el comportamiento actual del sistema para así mejorar el funcionamiento del mismo.



Capítulo 3: Marco teórico

3.1 Descripción del sistema en general

La energía hidráulica “es aquella que se obtiene del aprovechamiento de las energías cinética y potencial de la corriente de los ríos, saltos de agua o mareas”¹. Desde la antigüedad el hombre utilizó este tipo de energía para la agricultura, minas, industria textil, en madera y en el transporte. La primera turbina hidráulica fue construida por el ingeniero Claude Burdin y la primera planta hidroeléctrica con producción a gran escala empezó en 1895 cuando se construyó la represa de 3.75 MW (megawatts) en las cataratas del Niágara.

Las centrales hidroeléctricas transforman la energía hidráulica de una masa de agua, situada a cierta altura, en energía eléctrica.

Dentro de las principales ventajas de las plantas hidroeléctricas esta su alta eficiencia (entre el 80% y 90%) y que constituyen una fuente de energía renovable. Como desventajas están la acumulación de sedimentos en el fondo de la represa y la escasez de lugares donde pueden ser construidas. Una central hidroeléctrica está constituida básicamente por un embalse, obras de conducción, tanques de oscilación, tuberías de alta presión, la casa de máquinas, turbinas, tuberías de desfogue, centro de control, controladores, etc. La Figura 7 muestra el diagrama de las principales partes de la planta, seguidamente se procederá a explicar con más detalle cada una de ellas.

¹ Definición tomada de Wikipedia, ver ref.[1]

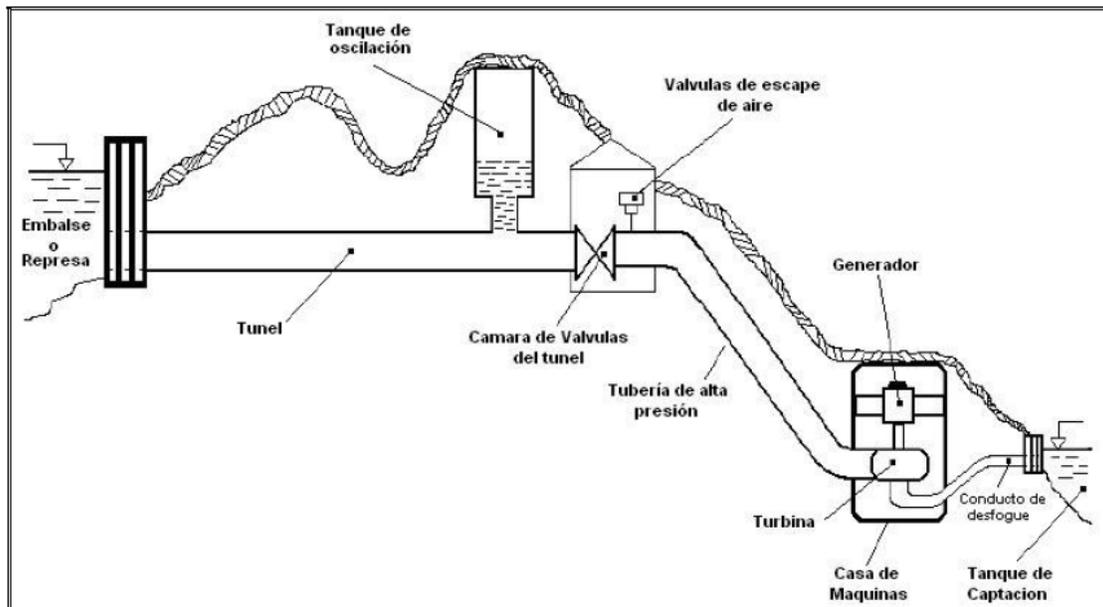


Figura 7 Diagrama de una planta Hidroeléctrica

Fuente: Mora, Ver ref. [8]

3.1.1 Embalse

El curso y caudal de los ríos resultan frecuentemente irregulares, es por esto que el agua de los mismos se acumula de forma artificial en una determinada zona, la cual es llamada embalse o represa, es muy utilizado para épocas de escasas lluvias (a estas centrales se denomina de regulación).

Todo embalse consta de las siguientes estructuras básicas: la presa, el aliviadero² y las obras de toma. La presa, dique o represa, es la estructura de retención de las aguas y resiste un empuje. Debe ser por lo tanto, impermeable y estable, conjuntamente con su fundación y sus estribos.

El aliviadero descarga los excedentes que llegan al embalse una vez que este esté lleno. Por tanto, debe ser capaz de evacuar con facilidad las máximas

² Desagüe de aguas sobrantes de un embalse, canal o depósito, que evita su desbordamiento.



crecientes que llegan al vaso de almacenamiento ya que su insuficiencia provocaría el desborde del agua por encima de la cresta de la presa.

Las obras de toma son un conjunto de estructuras formado por una estructura de entrada o toma, un túnel o conducto a través de un estribo o de la presa y una estructura de salida. Este conjunto permite tomar las aguas del embalse y pasarlas al canal principal. Debe tener suficiente capacidad para descargar las aguas, abastecer a la zona de riego con el gasto necesario, de acuerdo a los requerimientos de los suelos para niveles mínimos del embalse.

En el caso de la central “La Joya”, esta no cuenta con un embalse o represa, el agua es tomada de la casa de máquinas de la central de Cachí y es llevada hasta el tanque de oscilación mediante un túnel subterráneo.

3.1.2 Obras de conducción

Cuando la casa de máquinas está lejos del embalse es necesario llevar el agua hasta allí mediante un canal que puede ser abierto o por conducto cerrado. Los canales abiertos se emplean para largas distancias por su bajo costo y los cerrados se utilizan en trayectos cortos por su alto costo económico.

Como se mencionó anteriormente el agua que alimenta a la planta de “La Joya” es traída por un túnel subterráneo que atraviesa la comunidad de Tucurrique, este túnel tiene una longitud de 8km que se extienden desde la casa de máquinas de Cachí al Tanque de Oscilación de la planta de “La Joya”.

3.1.3 Tanque de oscilación

Permite absorber las sobrepresiones provocadas durante los transitorios producidos por variaciones de caudal en la tubería de equilibrio, provocadas normalmente por cambios bruscos en la carga o cierre de válvulas o compuertas.

En “La Joya”, el tanque de carga ejerce las funciones de tanque de oscilación, y al mismo tiempo constituye un elemento intermedio de almacenamiento que



garantiza el funcionamiento de la planta durante cierto tiempo en ausencia de aportes externos.

3.1.4 Tubería Forzada

Las tuberías que conducen el agua hacia las turbinas incrementando la altura de presión de la misma, están diseñadas para soportar las altas presiones que pueden originarse durante los fenómenos transitorios.

3.1.5 Casa de máquinas

Es el lugar donde se encuentran los principales equipos de la planta, es en este lugar donde la energía cinética del agua es transformada en energía mecánica y luego en eléctrica; mediante las turbinas, los generadores y los dispositivos de control.

3.1.6 Turbina hidráulica

Es una turbo máquina que aprovecha la energía de un fluido (agua en este caso) que pasa a través de ella para producir un movimiento de rotación transferido mediante un eje, mueve directamente un generador que transforma la energía mecánica en eléctrica, es el órgano fundamental de una Central hidroeléctrica[15].

Las turbinas, como cualquier turbo máquina hidráulica, pueden clasificarse según su grado de reacción, el cual nos indica el porcentaje de altura total absorbida por el rodete, que corresponde a la altura de presión. En función de lo anterior, pueden clasificarse en dos tipos principales:

a) De acción:

El distribuidor transforma toda la energía de presión en energía cinética. El rodete trabaja a presión constante convirtiendo la energía cinética del chorro en energía mecánica. No cuentan con tubo de aspiración. Un ejemplo de este tipo de turbina es la Pelton que se utiliza para saltos elevados y pequeño caudal.

b) De reacción:

En las turbinas de reacción el distribuidor transforma solo una parte de la energía de presión en energía cinética, el resto es transformado en el rodete. La presión a la entrada del rodete es por tanto superior que la presión a la salida, además cuenta con un cono de aspiración que permite disminuir la presión de salida por debajo de la presión atmosférica y por tanto incrementar el salto.

Las formas o diseños son muy diferentes de acuerdo al tipo, la Figura 8 muestra los ejemplos más comunes de turbinas.

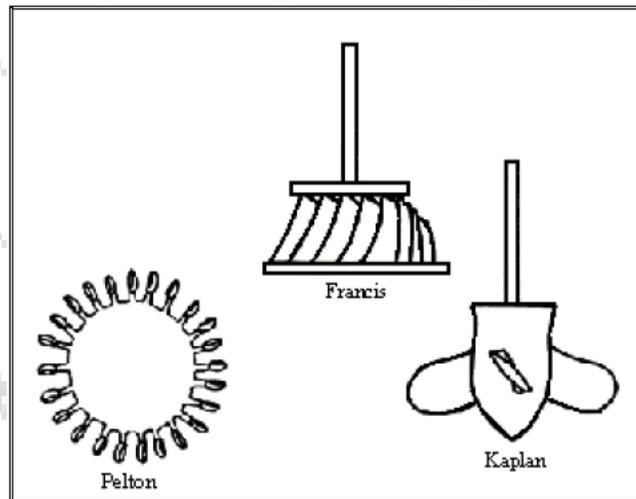


Figura 8 Tipos de Turbinas

Fuente: Zamora, ver ref. [12]

Las más utilizadas son las turbinas tipo Francis y la Kaplan; las Francis son aprovechadas en saltos medios y tienen gran eficiencia; las tipo Kaplan tienen la particularidad de poder variar el ángulo de sus aspas durante su funcionamiento y están diseñadas para saltos pequeños de agua [15].

La regulación de la carga en las turbinas se consigue variando el caudal (energía cinética). En las turbinas Francis y Kaplan el dispositivo encargado de la regulación es el distribuidor.

3.1.7 Distribuidor

En una turbina tipo Francis el distribuidor está formado por un determinado número de alabes o palas móviles, cuyo conjunto constituye un anillo concéntrico a la turbina, todos los alabes se hacen girar al mismo tiempo en sentido de apertura o cierre por medio de una estructura en forma de anillo, el cual es movido por un servomotor, la Figura 9 muestra este anillo y las diferentes posiciones de los alabes.

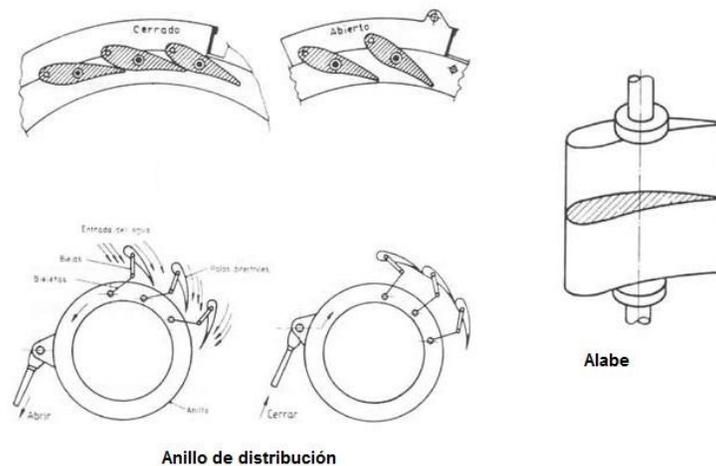


Figura 9 Distribuidor y partes que lo conforman

Fuente: Zenteno, ver ref. [13]

3.1.8 Sistema posicionador

Está formado por un servomotor con retroalimentación de posición controlado por una o dos válvulas de regulación. El servomotor es un actuador mecánico que tiene la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación, y de mantenerse estable en dicha posición.

Un sistema posicionador es también llamado “sistema copiador”, ya que su finalidad es la de obedecer a una consigna de posición externa. Tal sistema tiene un comportamiento no lineal, no obstante si los movimientos son pequeños alrededor de una posición de equilibrio, el caudal enviado al servomotor varía de modo bastante lineal con la posición de las correderas de distribución.

El servomotor debe ser controlado por un accionador, este puede ser del tipo ED o del tipo TR. El utilizado en el sistema de la planta de “La Joya” es del tipo ED. El esquema que se presenta en la Figura 10 representa a un servomotor controlado por un accionador tipo ED.

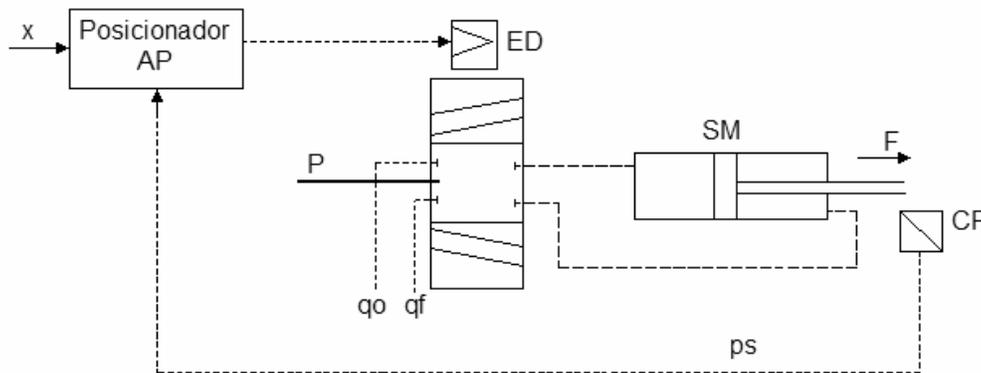


Figura 10 Esquema del servomotor controlado con un accionador ED

Donde:

- ED: Accionador.
- SM: Servomotor.
- CP: Captador de posición.
- F: Sentido de cierre.
- P: Presión de trabajo.
- q_o : Flujo de apertura.
- q_f : Flujo de cierre.
- ps : Medida de posición del servomotor.
- x : Consigna de posición.



3.1.9 Gobernador

La función del gobernador es medir continuamente la velocidad turbina-generador y controlar las válvulas reguladoras que ajustan el flujo de agua en una central hidroeléctrica, en respuesta a los cambios de carga del sistema. Con el fin de permitir la operación en paralelo de las unidades generadoras, la característica que gobierna la velocidad en función de la potencia de salida de cada unidad tiene una pendiente decreciente que implica que un incremento en la carga viene acompañado de un decremento en la velocidad, esto se explica mejor en la sección 3.3.9 donde se habla de la característica frecuencia-potencia negativa.

3.1.10 Generadores

Son también llamados alternadores, son los encargados de convertir la energía hidráulica en energía eléctrica, por lo general se utilizan generadores síncronos, sin embargo puede darse el caso del uso de máquinas asíncronas.

Existen dos tipos de generadores: de corriente continua y corriente alterna, en la actualidad en las centrales hidroeléctricas se utilizan generadores trifásicos de corriente alterna, los cuales están formados por un circuito magnético, un devanado de campo de CD y un devanado de armadura de CA y una estructura mecánica, además incluye sistemas de enfriamiento y lubricación.

El principio de funcionamiento de los alternadores consiste en la rotación de un campo magnético, generado a partir de una corriente continua denominada corriente de excitación. Los devanados de campo y de circuito magnético están dispuestos de forma tal que al girar el eje de la máquina el flujo magnético cambia de modo cíclico y por lo tanto induce un voltaje alterno en el devanado de armadura.

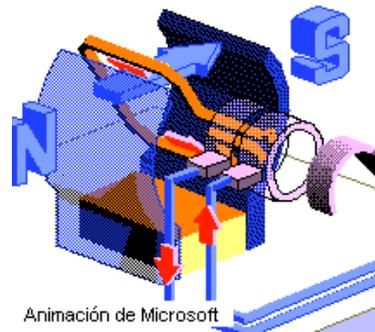


Figura 11 Generador síncrono de CA

Fuente: Rivera, ver ref. [9]

3.1.11 Sistemas de excitación

Su función principal es proveer de corriente continua al devanado de campo, además tiene otras funciones de control y protección que repercuten en el comportamiento dinámico del sistema eléctrico. Dentro de las funciones de control están el de la potencia reactiva y el de tensión, además de mejorar la estabilidad del sistema eléctrico.

Existen dos tipos de excitación: estática y rotativa; la rotativa tiene como inconveniente que la alimentación de la electrónica de potencia no es tomada directamente del generador sino de un sistema auxiliar, mientras que la estática utiliza la proveniente del mismo generador, lo que la hace más atractiva en las centrales hidroeléctricas al no tener que requerir sistemas de alimentación externos, la Figura 12 muestra estos dos tipos de sistemas de excitación.

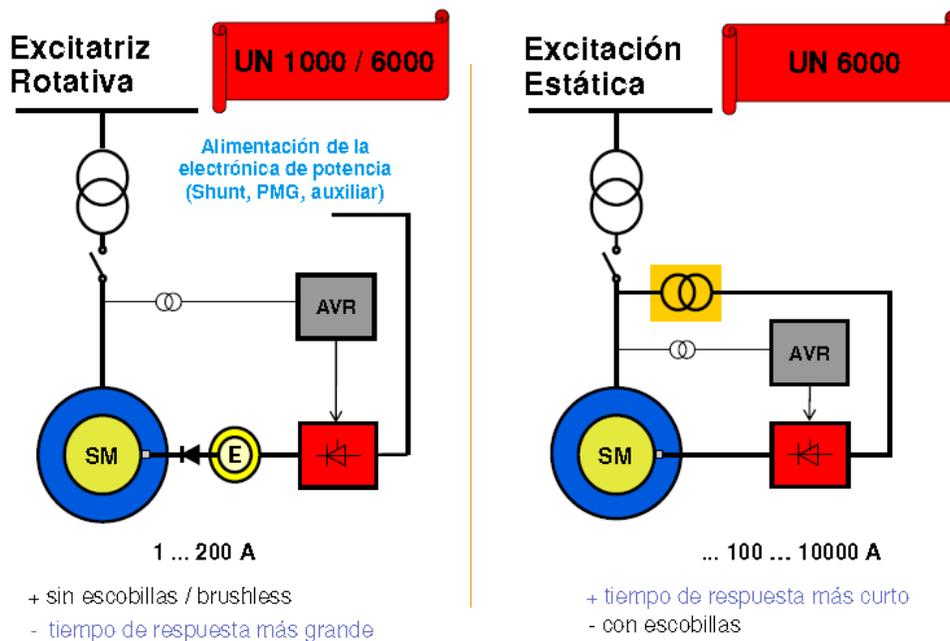


Figura 12 Sistemas de excitación básicos

Fuente: Rivera, ver ref. [9]

3.1.12 Sensor de velocidad

Para medir la velocidad a la que giran las turbinas se utiliza una rueda dentada solidaria al eje de la turbina formada por ocho dientes, al pasar estos dientes por delante del sensor magnético se crea un tren de pulsos que pasa a un contador digital que se encarga de determinar la velocidad de giro de la máquina, como se observa en la Figura 13, se generan dos señales de frecuencia, dependiendo de la posición del captador.

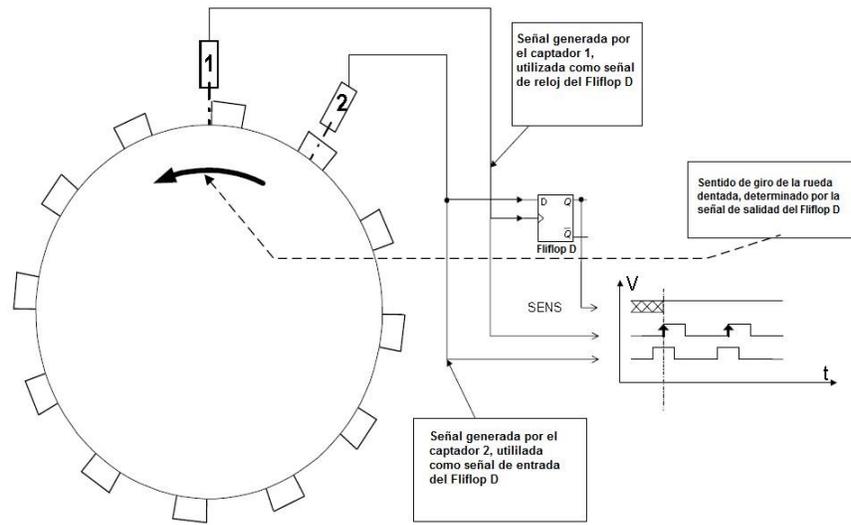


Figura 13 Rueda dentada y captador magnético

3.1.13 Obras de desfogue

Están constituidas por los conductos que llevan el agua desde las turbinas hacia el exterior; por lo general estos conductos terminan en una zona que forma un estanque de captación, y luego continúan su cauce normal aguas abajo.

3.2 Antecedentes Bibliográficos

Para el correcto funcionamiento y operación de una central hidroeléctrica se cuentan con distintos dispositivos mecánicos, eléctricos y electrónicos, los cuales a través de la intervención humana o por medio del control automático llevan a cabo su función de regulación; en el desarrollo de este trabajo se investigó mucho sobre los dispositivos de regulación de velocidad.

Los primeros reguladores de velocidad eran implementados mecánicamente a partir de dos esferas que se separaban en función de la velocidad de rotación (fuerza centrífuga debida a la rotación), ver Figura 14. Estos dispositivos eran muy eficientes en cuanto a la regulación de velocidad, sin embargo no permitían un control muy exacto de la velocidad, por lo que siempre existían oscilaciones y sobresaltos en el sistema.

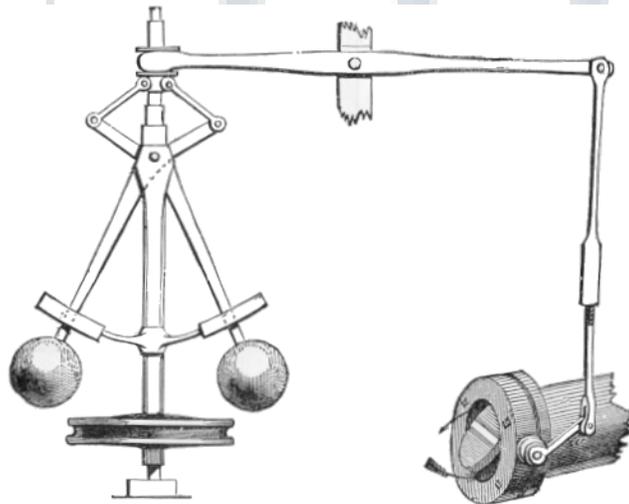


Figura 14 Gobernador centrífugo. (Ver ref. [16])

La implementación de centrales hidroeléctricas tiene un gran desarrollo en todo el mundo y no es un tema nuevo en la actualidad, la generación hidroeléctrica ha tenido grandes avances desde que se creó la primera planta a gran escala en 1895 (Ver referencia [9])



A partir de entonces los estudios de la producción hidroeléctrica se intensificaron y se han creado formas más eficientes para la obtención de electricidad a partir del agua de los ríos, esto se observa en los diferentes tipos de turbina utilizados para la generación, los cuales son seleccionados a partir de las características propias de cada planta, así como también los reguladores utilizados para su correcto funcionamiento.

Al realizar una búsqueda exhaustiva con respecto a centrales hidroeléctricas y el sistema de regulación que utilizan, se obtuvo gran cantidad de información, que incluye un número considerable de documentación sobre los reguladores utilizados en las plantas. Se detallan y diferencian claramente dos de ellos: el control de regulación de velocidad o frecuencia y el regulador de voltaje; este proyecto centró su investigación en los reguladores de velocidad, ya que es la parte más importante a desarrollar en el mismo.

Dentro de la bibliografía recabada se encontraron distintas formas en la que se puede modelar una planta hidroeléctrica (ver ref. [9]), se toman en cuenta aspectos como el tanque de oscilación, linealidad de las ecuaciones y del sistema, elasticidad o no del sistema, entre otros.

Los reguladores de velocidad han ido cambiando con los años, así también la documentación que se encuentra de ellos; en la actualidad fue posible encontrar suficiente información de los reguladores de velocidad implementados para una planta hidroeléctrica, está corresponde a trabajos de investigación realizados por ingenieros en su labor de investigación o trabajos meramente académicos.

Se encontraron algunos trabajos nacionales de este tipo, sin embargo son pocos y no brindan información valiosa para recabar; en lo que respecta al ámbito internacional se encontraron gran cantidad de *papers* y otros documentos que contribuyeron mucho en el desarrollo del presente trabajo y le dieron un buen norte al mismo.



Con respecto al regulador de velocidad y potencia se investigó en Internet, ya que como se había mencionado, el gobernador con el cual cuenta esta planta es de la empresa ALSTON la cual brindó un manual de usuario, que brinda muy poca información con respecto al regulador de velocidad; tras realizar la búsqueda se encontraron algunos documentos que hablan un poco de los reguladores de velocidad utilizados por esta empresa, estos están mencionados en la bibliografía de este documento y son referenciados en cada momento que fueron utilizados para la realización del presente trabajo.



3.3 Descripción de los principios físicos y matemáticos del modelo de la planta

Si se quiere comprender el comportamiento de un regulador es necesario conocer los procesos que controla. Conocer los procesos es entonces un fundamento que no se puede ignorar, puesto que el propio regulador es una parte integrada en los mismos.

A continuación se desarrollan los modelos matemáticos que explican el comportamiento de los diferentes componentes del proceso. Las ecuaciones que resultan de este modelo se linealizan para obtener las correspondientes funciones de transferencia.

La representación del proceso completo se hace por bloques que simbolizan a un componente o conjunto de componentes. Matemáticamente, cada bloque se identifica por su función de transferencia que representa la ganancia del bloque, de forma que la salida es igual a la entrada multiplicada por la ganancia del bloque.

Con las funciones de transferencia es posible explicar todo el proceso en un bloque general y la función de transferencia que resulta es el punto de partida para estudiar la estabilidad, rapidez de respuesta y otras especificaciones que podrán ser exigidas.

El modelado del sistema para los fines requeridos permite realizar numerosas simplificaciones que no afectan a los resultados de la simulación.

3.3.1 Modelado de la turbina y tubería de presión

El trabajo realizado por una masa de agua que se encuentra a una altura H y se deja caer, es igual a la energía potencial de la misma $W=mgH$.

La potencia correspondiente sería por tanto:



$$P = \frac{W}{t} = \frac{m * g * H}{t} = \frac{\rho * V * g * H}{t}$$

Donde un volumen por unidad de tiempo se define como caudal (Q), por lo que la expresión de potencia se puede reagrupar como:

$$P = \rho * g * Q * H \quad (1)$$

El caudal también se define como la velocidad del fluido y el área por el que atraviesa, de esta forma la ecuación anterior se puede reescribir como:

$$P = \rho * g * (U * A) * H \quad (2)$$

Donde se pueden agrupar varias constantes lo que simplifica la expresión como:

$$P = K_2 UH$$

Para la tubería a alta presión se tiene que el conducto es corto, el agua es considerada como incompresible por sus características propias y se considera inelástico ya que se hace pasar por la tubería forzada, las pérdidas se consideran despreciables, a partir de esto la ecuación de flujo en la tubería de alta presión (velocidad del agua) es:

$$\Delta \bar{U} = \frac{\partial \bar{U}}{\partial \bar{H}} \cdot \Delta \bar{H} + \frac{\partial \bar{U}}{\partial \bar{G}} \cdot \Delta \bar{G} = a_{11} \cdot \Delta \bar{H} + a_{12} \cdot \Delta \bar{G} \quad (3)$$

Donde \bar{U} es la velocidad o flujo del agua, \bar{H} es el salto y \bar{G} es la apertura en el distribuidor.

Las derivadas parciales a_{11} , a_{12} , dependen de la clase de turbina y del punto de operación, en el caso de la central de “La Joya” es una turbina tipo Francis y el punto de operación que se utiliza para linealizar la ecuación de flujo de la tubería es:

$$U_0 = kG_0 \sqrt{H_0}$$

Por lo que:



$$a_{11} = \frac{1}{2} \frac{kG_0}{\sqrt{H_0}}$$

$$a_{12} = k\sqrt{H_0}$$

Simplificando la ecuación de flujo de velocidad en el punto de operación se obtiene:

$$\frac{\Delta U}{U_0} = \frac{\Delta G}{G_0} + \frac{1}{2} \frac{\Delta H}{H_0} \quad (4)$$

Utilizando la ecuación de aceleración de la columna de agua se tiene:

$$F = m * a$$

$$m = \rho l A$$

$$a = \frac{d(\Delta U)}{dt}$$

Utilizando la ecuación 2 y teniendo en cuenta la definición de potencia:

$$P = F * V$$

$$F = \frac{P}{U} = \rho * g * A * H$$

Se supone un aumento de presión hidráulica, es por esto que se utilizan las variaciones o Δ , a partir de esto se tiene:

$$\rho l A \frac{d(\Delta U)}{dt} = -A \rho g \Delta H \quad (5)$$

Dividiendo ambos lados de la ecuación anterior entre $A \rho g H_0 U_0$ se obtiene:

$$\frac{l}{g H_0 U_0} \frac{d(\Delta U)}{dt} = - \frac{\Delta H}{H_0 U_0}$$

Reagrupando términos:



$$\frac{U_0}{gH_0} \frac{d\left(\frac{\Delta U}{U_0}\right)}{dt} = -\frac{\Delta H}{H_0} \quad (6)$$

Donde se puede considerar:

$$T_w = \frac{U_0}{gH_0} \quad (7)$$

Esta constante equivale al tiempo recorrido para acelerar el agua del conducto forzado hasta una velocidad U_0 , luego de esto se pasa al plano s la ecuación 6 y se obtiene:

$$T_w s \left(\frac{\Delta U}{U_0}\right) = -\left(\frac{\Delta H}{H_0}\right) \quad (8)$$

Sustituyendo la ecuación 8 en la ecuación 4 y reagrupando se obtiene:

$$-T_w s \left(\frac{\Delta U}{U_0}\right) = 2 * \left(\frac{\Delta U}{U_0} - \left(\frac{\Delta G}{G_0}\right)\right)$$

$$\Delta G/G_0 = \Delta U/U_0 \left(1 + \frac{T_w s}{2}\right) \quad (9)$$

Para el caso de la energía mecánica se tiene:

$$\Delta \bar{P}_m = \frac{\partial \bar{P}_m}{\partial \bar{H}} \cdot \Delta \bar{H} + \frac{\partial \bar{P}_m}{\partial \bar{U}} \cdot \Delta \bar{U} = a_{21} \cdot \Delta \bar{H} + a_{22} \cdot \Delta \bar{U} \quad (10)$$

Donde a_{21} y a_{22} son el resultado de evaluar la derivada en el punto de operación para linealizar el sistema.

$$P_0 = \rho * g * Q_0 * H_0 = \rho * g * H_0 * A * U_0$$

$$a_{21} = \rho * g * A * U_0$$

$$a_{22} = \rho * g * A * H_0$$

Dividiendo a ambos lados de la ecuación entre el cambio de potencia mecánica y el punto de operación de potencia P_0 se obtiene:



$$\frac{\Delta \overline{P}_m}{P_0} = \frac{\Delta H}{H_0} + \frac{\Delta U}{U_0}$$

Sustituyendo la ecuación 8 en la expresión anterior y simplificando:

$$\frac{\Delta \overline{P}_m}{P_0} = \left(\frac{\Delta U}{U_0} \right) (1 - T_w s) \quad (11)$$

Dividiendo las ecuaciones 9 y 11 se obtiene la relación entre la potencia y la apertura del distribuidor:

$$\frac{\frac{\Delta \overline{P}_m}{P_0}}{\frac{\Delta \overline{G}}{G_0}} = \frac{(1 - T_w s)}{\left(1 + \frac{T_w s}{2} \right)} \quad (12)$$

Momentos transitorios en la turbina

Como se mostró con las aproximaciones anteriores, la potencia es función de la velocidad del agua y de la apertura del distribuidor al considerar el salto constante, cuando se varia la apertura, existe un transitorio en el que la potencia disminuye o aumentan durante unos instantes contrariamente a la relación lineal potencia-apertura; esto se debe a que en el instante en que se cierra o abre el distribuidor, el área por el que se hace pasar el agua disminuye, pero en el instante junto donde ocurre, el caudal se mantiene constante, la velocidad aun no cambia, por lo que la relación potencia apertura debe mantenerse hasta que la velocidad del agua comience a cambiar; esto se puede observar en la demostración, de donde se obtiene que una disminución instantánea en la apertura provocaría un aumento instantáneo en la potencia, ocurrirá lo mismo en el caso contrario donde un aumento instantáneo en la apertura provocará una disminución en la potencia de forma momentánea.

Demostración:

$$P = \rho * g * H * Q = \rho * g * H * A * V$$

Sustituyendo el caudal en términos de su definición y agrupando:

$$P = A * \overbrace{\rho * g * H}^V$$

Las variables agrupadas son tomadas como una sola constante, ya que la velocidad en el instante de la variación se mantiene, por lo que:

$$\frac{P}{A} = cte$$

3.3.2 Posicionador y servomotor

Ambos módulos forman el sistema copiadore, si consideramos al sistema lineal ya que no se hacen movimientos bruscos en el servomotor, este puede modelarse como un sistema pasa – bajo de primer o segundo orden, ya sea que el servomotor este controlado directamente por el accionador o a través de una válvula de amplificación controlada hidráulicamente.

El siguiente diagrama de bloques representa el modelo matemático del sistema copiadore

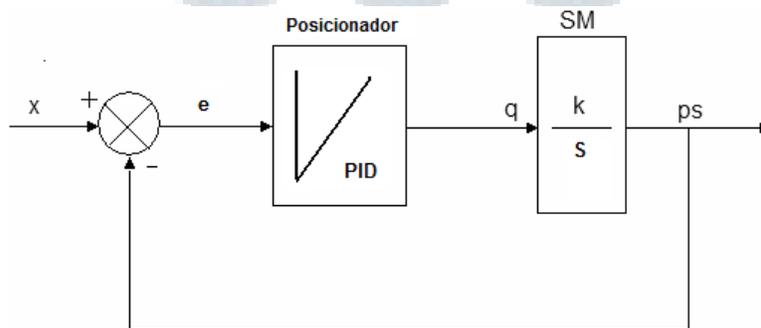


Figura 15 Diagrama de bloques de sistema copiadore



Donde:

- Posicionador: Controlador Proporcional integral derivativo (PID).
- K: Sección reducida del servomotor.
- S: Variable de Laplace.
- q: Flujo reducido de aceite.
- e: Error de posición.

3.3.3 Modelo del generador

Para describir el funcionamiento de un generador es necesario tomar en cuenta dos principios físicos, estos son: la Ley de inducción de Faraday y la Ley de Lenz. La primera expresa:

“el voltaje inducido en un circuito cerrado es directamente proporcional a la rapidez con que cambia en el tiempo el flujo magnético que atraviesa una superficie cualquiera con el circuito como borde”

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

Donde \vec{E} es el campo eléctrico, $d\vec{l}$ es el elemento infinitesimal del contorno C, \vec{B} es la densidad de campo magnético y S es una superficie arbitraria, cuyo borde es C. Las direcciones del contorno C y de $d\vec{A}$ están dadas por la regla de la mano izquierda. La Figura 16 muestra esta relación.

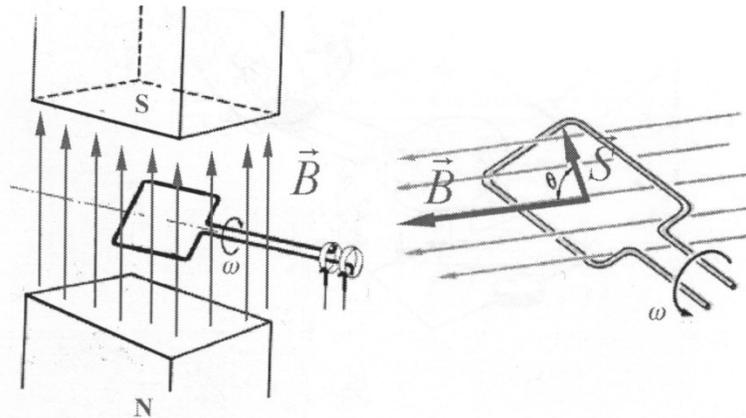


Figura 16 Principio de inducción de Faraday

La permutación de la integral de superficie y la derivada temporal se pueden hacer siempre y cuando la superficie de integración no cambie con el tiempo.

Por medio del teorema de Stokes puede obtenerse una forma diferencial de esta ley:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

En el caso de un inductor, la fórmula anterior se transforma en:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Donde ε es la fuerza electromotriz inducida y $d\Phi/dt$ es la tasa de variación temporal del flujo magnético Φ . La dirección de la fuerza electromotriz (el signo negativo en la fórmula) se debe a la ley de Lenz, esta establece:

“Las corrientes inducidas serán de un sentido tal que se opongan a la variación del flujo magnético que las produjo”



Esta ley es una consecuencia del principio de conservación de la energía. Si el flujo cambia a rapidez constante, el voltaje inducido es numéricamente igual al aumento o disminución en webers en 1 segundo.

Como los generadores son máquinas eléctricas producen un momento de torsión por la interacción sobre el espacio relativo de rotación o giro, este está definido como:

$$T = 2\pi R^2 l \sigma$$

En el cual R es el radio interior del estator, l es la longitud activa y σ es el valor promedio del esfuerzo relativo cortante del entrehierro de giro. Este esfuerzo cortante es aproximadamente:

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}} B_1 K_z$$

En donde B_1 es el valor pico de la intensidad fundamental de flujo magnético y K_z es el valor rms de la densidad de flujo eficaz de corriente de reacción de armadura.

La aceleración angular del generador será la consecuencia del desequilibrio entre los dos pares o torques que actúan sobre el generador: El torque mecánico producido por el motor primario, en este caso la turbina y el torque eléctrico consecuencia del par inducido en el generador.

El par inducido en el generador es producido por los campos magnéticos de rotor y estator. La Figura 17 muestra esta conversión.

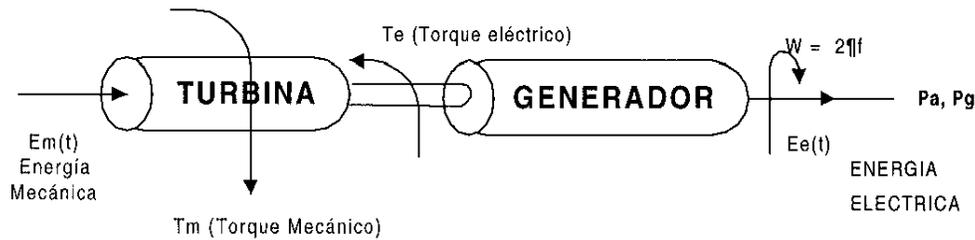


Figura 17. Conversión de energía mecánica a energía eléctrica.

Las variaciones en la carga eléctrica producen variaciones de velocidad al variar el torque eléctrico, a continuación se muestran las tres posibilidades.

Aumento de velocidad:

Ocurre cuando la carga eléctrica disminuye, provocando que el torque mecánico sea mayor al torque eléctrico.

$$T_{e(t)} < T_{m(t)}$$

Disminución en la velocidad:

Esta situación ocurre cuando la carga aumenta, el torque eléctrico aumenta y comienza a vencer el torque mecánico provocando la disminución de velocidad.

$$T_{e(t)} > T_{m(t)}$$

Velocidad constante:

Es la condición ideal del sistema, la carga eléctrica se mantiene constante, por lo que no hay variaciones de velocidad.

$$T_{e(t)} = T_{m(t)}$$

Las variaciones en el torque producto de las variaciones en las cargas, se pueden controlar utilizando un sistema de control de velocidad, de esta forma se puede mantener el sistema estable.



El torque se puede definir como el momento de inercia de la máquina por la aceleración que experimenta:

$$T_{net} = I\alpha \quad (13)$$

Donde I es el momento de inercia de la máquina y α es la aceleración rotacional que presenta.

Todo cuerpo presenta una masa y si esta experimenta una velocidad se dice que está experimentando un momento; este es el producto vectorial del momento lineal por el vector de posición, como la velocidad y el desplazamiento son perpendiculares para el caso del movimiento angular, la expresión se simplifica y es llamado momento angular.

$$M = \omega I \quad (14)$$

Donde M es el momento angular, ω es la velocidad angular e I ya había sido definido como el momento de inercia (Lineal).

La potencia está relacionada con la velocidad y el torque que experimenta, a partir de esto se obtiene:

$$P_{ne(t)} = \omega T_{ne(t)} = \omega (I \alpha) = M\alpha \quad (15)$$

Donde $P_{ne(t)}$ se define como la potencia acelerante neto de la máquina y $T_{ne(t)}$ es la misma definición solo que para el caso del torque, este último es el resultado de la diferencia del torque mecánico y el eléctrico.

$$T_{ne(t)} = T_m - T_e \quad (16)$$

Se asume que en condiciones iniciales la máquina presenta una velocidad y un ángulo inicial, la velocidad en cualquier instante se puede definir como:

$$\omega = \omega_0 + \alpha t \quad (17)$$

Las variaciones en el ángulo de fase de la máquina se define como la diferencia entre el ángulo absoluto y el ángulo de referencia o inicial.



$$\Delta\delta = \int (\omega_0 + \alpha t) dt - \int (\omega_0) dt \quad (18)$$

Donde se obtiene como resultado:

$$\Delta\delta = \frac{1}{2\alpha} t^2$$

Las variaciones en la velocidad se definen como:

$$\Delta\omega = \alpha t = \frac{d(\Delta\delta)}{dt}$$

El torque neto se puede relacionar con la variación entre el torque eléctrico y mecánico, esto incluye variaciones de velocidad y de ángulo de fase, las cuales se pueden relacionar de la siguiente manera:

$$T_{ne(t)} = I\alpha = I \frac{d(\Delta\omega)}{dt} = I \frac{d^2(\Delta\delta)}{dt^2} \quad (19)$$

La potencia definida en función de las condiciones iniciales se puede expresar:

$$P_{ne(t)} = P_{ne0} + \Delta P_{ne(t)} \quad (20)$$

Donde:

$$P_{ne0} = P_{m0} - P_{e0}$$

$$\Delta P_{ne(t)} = \Delta P_{m(t)} - \Delta P_{e(t)}$$

$$P_{ne(t)} = (P_{m0} - P_{e0}) + (\Delta P_{m(t)} - \Delta P_{e(t)}) \quad (21)$$

Lo mismo ocurre con los torques:

$$T_{ne(t)} = (T_{m0} - T_{e0}) + (\Delta T_{m(t)} - \Delta T_{e(t)}) \quad (22)$$

Utilizando la ecuación 3

$$P_{ne(t)} = P_{ne0} + \Delta P_{ne(t)} = (\omega_0 + \Delta\omega)(T_{ne0} - \Delta T_{ne})$$



Utilizando las ecuaciones 9 y 10 se obtiene:

$$(P_{m0} - P_{e0}) + (\Delta P_{m(t)} - \Delta P_{e(t)}) = (\omega_0 + \Delta\omega)[(T_{m0} - T_{e0}) + (\Delta T_{m(t)} - \Delta T_{e(t)})] \quad (23)$$

Asumiendo que para condiciones iniciales:

$$P_{m0} = P_{e0}$$

$$T_{m0} = T_{e0}$$

La expresión en 11 se simplifica como:

$$(\Delta P_{m(t)} - \Delta P_{e(t)}) = \omega_0(\Delta T_m - \Delta T_e) \quad (24)$$

De la ecuación 7 se tiene:

$$(T_{m0} - T_{e0}) + (\Delta T_{m(t)} - \Delta T_{e(t)}) = I \frac{d(\Delta w)}{dt} \quad (25)$$

Puesto que el $T_m = T_e$ se pueden combinar las ecuaciones 12 y 13 y obtener:

$$(\Delta P_{m(t)} - \Delta P_{e(t)}) = \omega_0 I \frac{d(\Delta w)}{dt} = M \frac{d(\Delta w)}{dt} \quad (26)$$

Utilizando la transformada de Laplace se puede observar en el dominio de la frecuencia que:

$$(\Delta P_{m(s)} - \Delta P_{e(s)}) = M s \Delta\omega(s)$$

Por tanto la función de transferencia del generador sería la siguiente:

$$\Delta\omega(s) = \frac{1}{M s} (\Delta P_{m(s)} - \Delta P_{e(s)}) \quad (27)$$

Utilizando diagramas de bloques la ecuación anterior se puede representar como se muestra en la Figura 18.

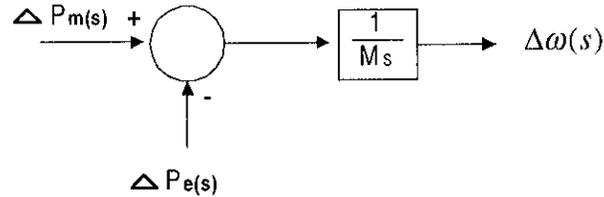


Figura 18. Relación entre las potencias mecánica, eléctrica y el cambio de velocidad

3.3.4 Modelado de la carga

En los sistemas de potencia la carga eléctrica está relacionada con la demanda de los equipos eléctricos, esta no se mantiene constante durante el tiempo, pues la conexión y desconexión de cargas de tipo industrial, residencial y comercial son diversas, esto puede ocasionar variaciones de frecuencia en el sistema, que pueden dañar los equipos y la producción misma.

El comportamiento dinámico de un sistema eléctrico frente a pequeñas perturbaciones puede ser descrito utilizando un parámetro llamado “Coeficiente de amortiguamiento del sistema”, el cual relaciona el cambio porcentual de la carga sobre el cambio porcentual de la frecuencia del sistema.

$$\Delta P_L(\text{frec}) = D \Delta \omega \quad (28)$$

$$D = \frac{\Delta P_L(\text{frec})}{\Delta \omega}$$

El cambio neto en la potencia eléctrica P_e está definido como:

$$\Delta P_e = \Delta P_L + D \Delta \omega \quad (29)$$

El momento angular de la máquina puede ser expresado en términos de la energía cinética y la potencia a velocidad nominal, esta es llamada como la constante de inercia H .

$$H = \frac{\varepsilon_c(\omega = \omega_0)}{S(\omega = \omega_0)} \quad (30)$$



ε_c se define como la energía cinética que se obtiene a la velocidad nominal, lo mismo para S, la cual es la potencia aparente que se obtiene a velocidad nominal.

La energía cinética está en función del momento de inercia y la velocidad:

$$\varepsilon_c = \frac{1}{2} I \omega_0^2 = \frac{1}{2} M \omega_0$$

Sustituyendo la expresión de la energía cinética en la ecuación 18 es posible expresar el momento angular en función de la constante de inercia:

$$H = \frac{\frac{1}{2} M \omega_0}{S_n}$$

$$M = 2H \frac{S_n}{\omega_0} \quad (31)$$

Sustituyendo M en la ecuación 14 y reagrupando se tiene que:

$$2H \frac{S_n}{\omega_0} \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta P_m - \Delta P_e$$

$$2H \frac{d\left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)}{dt} = \frac{\Delta P_m - \Delta P_e}{P_0}$$

Lo anterior para considerar las variaciones a partir del punto de operación a velocidad nominal, después sustituyendo la ecuación 17 en la expresión anterior:

$$2H \frac{d\left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)}{dt} = \frac{\Delta P_m}{P_0} - \frac{\Delta P_L + D\Delta\omega}{P_0}$$

Al pasar al plano s y despejar el cambio de frecuencia se obtiene:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{1}{(2Hs + D)} \left[\frac{\Delta P_{m(s)}}{P_0} - \frac{\Delta P_{L(s)}}{P_0} \right] \quad (32)$$

El diagrama de bloques que representa la función de transferencia del generador y la red se muestra en la Figura 19.

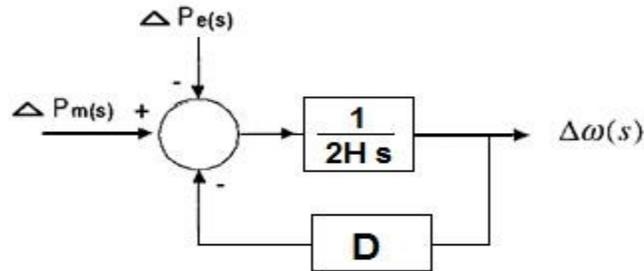


Figura 19 Diagrama de bloques del generador y la red

3.3.5 Tiempos de integración de consigna.

Estos corresponden al tiempo necesario para el cambio en las consignas de: potencia, velocidad y apertura del distribuidor; posee un gradiente y el rango varía dependiendo del porcentaje de variación.

$$\frac{\Delta P}{\Delta \omega} = \frac{1}{R_s} \quad (33)$$

Donde m representa la pendiente de la rampa de integración y TCF equivale al tiempo necesaria para alcanzar el valor unitario de la señal a integrar. La Figura 20, muestra esta relación.

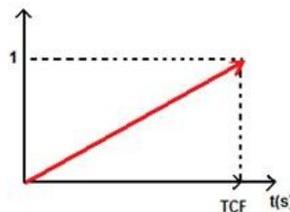


Figura 20 Rampa de integración



3.3.6 Cambios Carga-Frecuencia

Conforme la potencia que tomamos de la turbina se incrementa, la velocidad a la que gira disminuye. La siguiente ecuación define la caída de velocidad en una turbina en función de la carga. $\Delta P = \frac{1}{R_s} \Delta w$

A partir de lo anterior se obtiene la función de transferencia de la caída de velocidad en una turbina:

$$\frac{\Delta P}{\Delta w} = \frac{1}{R_s} \quad (34)$$

3.3.7 Control de Potencia PI

Para mantener la potencia en el valor deseado se tiene un controlador proporcional integral para eliminar el error en estado estacionario, la ecuación que relaciona la entrada y la salida de este controlador es:

$$y(t) = k_p * x(t) + \frac{k_p}{T_d} * \int_0^t x(t) dt \quad (35)$$

Donde k_p representa la constante de proporcionalidad y T_d es la constante de tiempo de integración. Derivando a ambos lados de la ecuación y pasando al dominio de la frecuencia:

$$s y(s) = k_p * x(s) + \frac{k_p}{sT_d} * x(s)$$

A partir de lo anterior se obtiene la función de transferencia para el controlador PI

$$\frac{y(s)}{x(s)} = k_p * \left(1 + \frac{1}{sT_d} \right)$$

El inverso de k_p representa el estatismo transitorio (b_t), para el caso de variaciones de potencia, reagrupando la ecuación se obtiene:



$$b_t = \frac{1}{k_p}$$

$$\frac{y(s)}{x(s)} = \frac{1 + sT_d}{sT_d b_t} \quad (36)$$

3.3.8 Control de velocidad PID

Este control tiene en cuenta la corrección del error en estado estacionario (acción proporcional integral) y los sobre-impulsos (acción derivativa)

$$y(t) = k_p * x(t) + \frac{k_p}{T_d} * \int_0^t x(t) dt + k_p * T_v * \frac{d(x(t))}{dt} \quad (37)$$

Derivando a ambos las de la ecuación:

$$\dot{y}(t) = k_p * \dot{x}(t) + \frac{k_p}{T_d} * x(t) + k_p * T_v * \ddot{x}(t)$$

Pasando al plazo s se tiene:

$$sY(s) - y(0) = k_p * (s * X(s) - x(0)) + \frac{k_p}{T_d} * X(s) + k_p * T_v * [s^2 X(s) - s * x(0) - \dot{x}(0)]$$

Reordenando el lado derecho de la ecuación y asumiendo condiciones iniciales iguales a cero (sin considerar el estatismo permanente) e idealizando el elemento derivativo, se puede obtener una ecuación cuadrática que es la función de transferencia del controlador de velocidad:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{s^2 * ((k_p * T_v)) + s * (k_p) + \left(\frac{k_p}{T_d}\right)}{s} = \frac{1 + T_d s + T_d * T_v * s^2}{s * T_d * 1/k_p} \quad (38)$$



Donde $1/k_p$ representa el estatismo transitorio b_t , además se puede considerar a la constante de derivación como el producto de una ganancia por un tiempo de retardo derivativo.

$$T_v = K_v * T_{1v}$$

Si se toma en cuenta el estatismo permanente y la derivada de primer orden, la función de transferencia que se obtiene es:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1 + s \left(T_d + b_p * \frac{K_v * T_{1v}}{1 + T_{1v} s} \right) + s^2 * \left((b_p + b_t) * T_d * \frac{K_v * T_{1v}}{1 + T_{1v} s} \right)}{b_p + s * (b_p + b_t) T_d} \quad (39)$$

3.3.9 Característica carga-frecuencia negativa

Para permitir que varios generadores participen en el control primario de frecuencia dentro de un mismo sistema, se aplica en cada uno de ellos una característica frecuencia-potencia en régimen permanente negativa, mediante la introducción del lazo de control adicional representado en la Figura 21.

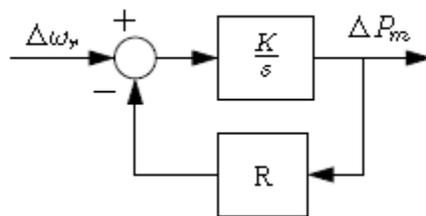


Figura 21 Diagrama de bloques de un regulador primario con estatismo.

La constante R es la que determina la característica del regulador en régimen permanente, en el modelo del regulador PID implementado y que a su vez se divide en el control de velocidad y el regulador de estatismo permanente, es en

este último donde se aprecia la característica carga-frecuencia negativa que presenta el regulador (BP).

La variable mencionada anteriormente se define como:

$$BP = \frac{\Delta \dot{u}}{\Delta P_m} = \frac{\dot{u}_v - \dot{u}_{pc}}{\dot{u}_0}$$

Donde \dot{u}_v es la frecuencia en régimen permanente sin carga (en vacío), \dot{u}_{pc} es la frecuencia en régimen permanente a plena carga, y \dot{u}_0 es la frecuencia nominal. En la Figura 22 se representa la ecuación anterior de forma gráfica, el estatismo es la pendiente de la característica frecuencia/potencia cambiada de signo.

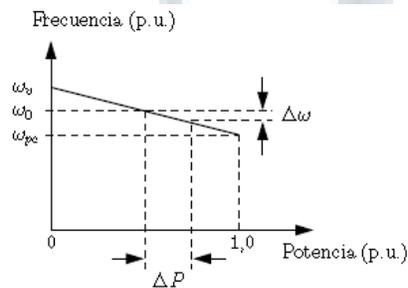


Figura 22 Característica de un control primario con estatismo.



Capítulo 4: Procedimiento metodológico

El presente capítulo muestra las etapas del desarrollo del proyecto, desde la etapa de identificación del problema y sus consecuencias; pasando a la etapa de recolección de información y datos, que una vez analizados y evaluados conllevan a formular soluciones y recomendaciones con respecto al funcionamiento actual de la planta hidroeléctrica “La Joya”.

4.1 Reconocimiento y definición del problema

La planta hidroeléctrica de “La Joya” ubicada en Tucurrique opera desde hace ya 4 años, en este lapso de tiempo ha contribuido a la generación eléctrica para la zona con un aporte de 50MW a capacidad plena; como ya se mencionó en el capítulo 1, esta planta está supeditada al funcionamiento de la planta de Cachí, la cual posee una capacidad máxima de 100MW, el agua turbinada por Cachí es utilizada por la planta de “La Joya”, por lo que las variaciones que presente, también se ven reflejadas en la planta de Tucurrique.

En los años de operación de la planta, se han hecho notar algunas variaciones y sobre-impulsos en el control del lazo de regulación de velocidad del sistema, estas han sido detectadas cuando se realizan los ajustes en el control de regulación del sistema o cuando se varía su modo de operación o regulación. Una de las finalidades principales del actual proyecto es determinar los errores y las posibles causas que los provocan, para que a través de su estudio puedan ser corregidos.

Por medio de los sistemas de recolección de datos que muestran el funcionamiento de la planta fue posible realizar experimentos o pruebas en las cuales se detecta el estado actual de la misma y las variaciones que presenta cuando se realizan las pruebas experimentales, estos datos son recuperados por el mismo sistema gobernador como ya se ha mencionado anteriormente, los resultados obtenidos son mostrados en la sección de resultados experimentales.

Es a partir de estos resultados que surge la idea de ajustar el regulador de velocidad para corregir los errores y variaciones que tiene actualmente, sin



embargo se presenta la necesidad de comprender el funcionamiento interno del regulador de velocidad o gobernador suministrado por la empresa ALSTON, ya que dicha empresa no suministró la información suficiente que permita ajustar el regulador de una forma correcta.

Para ajustar el gobernador NEYRPIC, no basta con saber su funcionamiento interno y la forma de cómo ajustarlo, se debe tener el criterio necesario para hacerlo; es por esto que también se requiere pleno conocimiento de toda la planta o por lo menos las partes más importantes que intervienen en el lazo de regulación de velocidad de la central hidroeléctrica “La Joya”, ya que de ella depende el actuar del regulador de velocidad.

Actualmente la planta no cuenta con un modelo que permita representar todo el sistema del lazo de regulación de velocidad de la Central Hidroeléctrica, por lo que no es posible ajustar el regulador de velocidad de la forma correcta, es por esto que también fue necesario desarrollar un modelo de la planta el cual contribuya al correcto ajuste del gobernador NEYRPIC.

Con respecto a la planta y al lazo de regulación de velocidad se sabe que las partes que componen principalmente el modelo de una central hidroeléctrica en el lazo de regulación de velocidad son los ya citados en el capítulo 1:

- Servomotor y distribuidor.
- Turbina y tubería de alta presión.
- Generador y red.

Para cada uno de ellos fue necesario obtener un modelo que sea capaz de representar de forma matemática su funcionamiento para así tener un panorama completo del lazo de regulación de velocidad. Una vez obtenido se realizaron simulaciones que representan el comportamiento actual de la planta y a través del mismo se llevaron a cabo los ajustes necesarios en el regulador para corregir o disminuir las fallas que posee la planta en cuanto a su funcionamiento, mediante el modelo matemático encontrado.



4.2 Obtención y análisis de información

EL lazo de control de regulación de velocidad de una planta es un tema muy estudiado por expertos en el área, para llevar a cabo este proyecto se realizó una búsqueda muy intensa, la bibliografía existente del tema es vasta, como ya ha sido mencionado; el estudio de las plantas hidroeléctricas y su sistema de control está ya bien desarrollado, no obstante las variaciones en cuanto a los tipos o formas de generación hacen que se diversifiquen un poco, más cuando se habla del tipo de gobernador utilizado.

La planta hidroeléctrica “La Joya” tiene una biblioteca, un poco reducida en cuanto a volumen, que cuenta con gran cantidad de información respecto a plantas hidroeléctricas y su funcionamiento, en ella se obtuvo el manual del gobernador instalado en dicha central, el cual no brinda mayor información. También se obtuvo material valioso donde se describen los principales parámetros de funcionamiento que intervienen en el lazo de regulación de velocidad de dicha planta, los cuales son necesarios para la implementación del modelado del sistema.

Aunada a la información recabada en la biblioteca de la planta también se realizó una recopilación en Internet sobre el tema, es en esta donde se obtienen trabajos con un entorno similar, donde se habla de los modelos matemáticos que han sido implementados para representar una planta hidroeléctrica. A través de estos trabajos se traza un rumbo en cuanto al desarrollo del modelo a implementar.

Para llevar a cabo esta investigación fue necesario definir como tema central el funcionamiento de una central hidroeléctrica, a partir de esto y conforme se va adquiriendo más conocimiento sobre el desarrollo y funcionamiento de una planta hidroeléctrica es que se puede especificar aun más la búsqueda, pasando del funcionamiento general al comportamiento específico del lazo de control de velocidad, donde se determinan los principales actores que conforman ese lazo, una vez determinados se prosigue a una investigación más a fondo de estos componentes y su funcionamiento.



Dentro de la bibliografía recabada se encontraron modelos similares que representan la planta en estudio, aunado a esto se tiene el modelo del lazo de una planta en Ecuador, este fue suministrado por un colega del ingeniero en jefe de la Central “La Joya”. Es por sugerencia del ingeniero en jefe que el modelo a implementar se desarrollará a partir del suministrado por su colega, ya que corresponde a una planta de la misma empresa, la cual presenta características similares a la planta “La Joya”

Con respecto al regulador o gobernador NEYRPIC no fue posible obtener mayor información por parte de la empresa ALSTON, se trato de hacer contacto con ella pero no fue posible, se realizaron búsquedas en Internet que ayudarán a comprender el funcionamiento de este regulador; pero para el modelo instalado en planta no se obtuvo mayor información, no obstante se recopilaron 2 trabajos que tratan el tema y utilizan un regulador de la empresa ALSTON, el cual es muy similar al que se quiere estudiar.

Durante el desarrollo del trabajo también se tuvieron que considerar las restricciones propias que presenta la generación hidroeléctrica en el país y para con la empresa privada. “La Joya” fue construida con capital extranjero y estuvo en arrendamiento durante 20 años, luego pasó a manos del ICE, durante este periodo la planta tiene que cumplir con todos los estándares de regulación y generación eléctrica, dentro de estos existen parámetros que intervienen directamente en el lazo de regulación de velocidad de las plantas y que se tienen que tomar en cuenta para el desarrollo del trabajo.

4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución

A partir de la información bibliográfica recopilada se formuló un primer esquema del procedimiento a seguir para implementar el modelo matemático de la planta, sin embargo para obtener un primer modelo fue necesario establecer criterios de diseño que determinarían el desarrollo del mismo.



En primera instancia se determinó que el estudio solo abarcaría lo que respecta al lazo de control de velocidad, ya que en todos los análisis de la bibliografía encontrada, este estaba claramente separado del control de regulación de tensión, lo que permitía hacer más específico el análisis de la planta. Se encontró que las ecuaciones capaces de representar el funcionamiento de cada uno de los actores que conforman el lazo en estudio presentan un alto nivel de complejidad, es en este punto donde se toman las primeras decisiones en lo que respecta al desarrollo del modelo.

Los modelos encontrados se pueden dividir en dos grandes clases: los lineales y los no lineales, a su vez estos se pueden subdividir en otras clases. Los modelos no lineales son útiles en el diseño de controladores del mismo tipo, ya que permiten representar grandes variaciones de potencia en una planta; su contraparte, los modelos lineales, permiten hacer más fácil los estudios de estabilidad y de respuesta en frecuencia (Ver referencia [9], pág. 12).

A partir de lo anterior se determinó seguir el camino de un modelo lineal, ya que hace más fácil el estudio de la planta debido a la simplicidad de las ecuaciones y que permite una mejor representación de la respuesta en frecuencia del sistema, la cual es la principal razón del proyecto a desarrollar.

Si bien los modelos lineales son más fáciles de analizar, algunos de los procesos a representar no son capaces de ser mostrados por medio de ecuaciones lineales, sin embargo estas se pueden hacer lineales mediante criterios de linealización, los cuales luego fueron comprobados. Estos criterios fueron encontrados en la literatura y por medio de las recomendaciones del asesor en la empresa, inicialmente algunos fueron establecidos como supuestos, luego con la implementación del modelo fueron comprobados.

Los dos grupos en los que se pueden clasificar los modelos de una planta hidroeléctrica también pueden ser subdivididos en otras dos subcategorías: los que contemplan el tanque de oscilación y los que no, cada una presenta sus



propias variaciones en lo que respecta al modelo lineal o no; en el caso de la Central “La Joya”, esta no posee tanque de oscilación, posee un pequeño embalse que se encuentra justo antes de la tubería de alta presión, cuya función es amortiguar el golpe de ariete del sistema y servir como reserva en el caso de que la planta de Cachí se dispare; es capaz de mantener a “La Joya” operando a capacidad plena por lo menos por 30 min antes de que entre aire en la tubería de presión. A partir de las recomendaciones del asesor, quien es el jefe la planta, se determinó que para el modelo a desarrollar no se tomara en cuenta el tanque de oscilación.

Los modelos encontrados en la literatura suministrada no son nuevos, son el resultado de muchos años de investigación en las centrales hidroeléctricas, si bien varían entre ellos por las características propias de cada planta, permiten su adaptación mediante la modificación de los parámetros característicos que determinan su funcionamiento, en el caso de la central “La Joya”, algunos habían sido documentados y otros fueron determinados a partir de las pruebas experimentales realizadas.

Una vez que se obtuviera un primer modelo de la planta en estudio era necesario poder validarlo de alguna forma, para llevar a cabo el estudio del sistema se utilizó una herramienta matemática computacional que permite analizar de una manera más rápida, eficiente y representativa el sistema y la respuesta del mismo ante variaciones o perturbaciones a las que puede ser sometido. Como criterio propio se decidió utilizar el paquete de software llamado MATLAB ya que este desde el punto de vista académico es muy utilizado para el desarrollo y análisis de diversos tipos de plantas, así como también para estudiar su comportamiento y respuesta cuando son ajustados los controladores implementados en las mismas; mediante algunas de sus herramientas fue posible obtener el comportamiento actual del sistema y a la vez ajustar de forma teórica el comportamiento de la planta frente a sobre impulsos u oscilaciones que pueda tener el sistema.



Para corroborar que el modelo implementado coincida de la mejor manera posible con el comportamiento real de la planta, se compararon los resultados obtenidos del simulador implementado en MATLAB con los resultados experimentales que se hicieron de forma real en una de las turbinas de la planta, los mismos fueron recopilados por el gobernador, el cual como ya se ha mencionado tiene la capacidad de almacenar información correspondiente a todo el lazo de regulación, la cual es recopilada en tiempo real. Es a través de este proceso de comparación y ajuste del modelo matemático que se obtiene una representación muy semejante al sistema en la realidad.

A partir del modelo implementado se proponen soluciones y recomendaciones para corregir el comportamiento actual del sistema, inicialmente se realizaron pruebas con el simulador implementado a partir del modelo, luego estas fueron llevadas al campo mediante uno de los gobernadores de repuesto que tiene la planta, con él fue posible simular el comportamiento del sistema y observar la forma en que actúa de manera real el NEIRPIC (gobernador) ante las variaciones que no es posible realizar de forma real en las turbinas en funcionamiento. Es a partir de estas pruebas que se obtuvo el comportamiento interno del regulador y la respuesta del mismo para con el sistema.

Una vez que se tiene todas las partes que conforman el lazo de regulación de velocidad es posible determinar si se puede ajustar el regulador para aumentar el desempeño de la Central Hidroeléctrica “La Joya”, estos ajustes se llevan a cabo en el regulador del modelo implementado y posteriormente fue simulado en MATLAB para observar el comportamiento del sistema con los cambios hechos, es a partir de estos que se determinan las sugerencias y recomendaciones que pueden realizarse en el sistema.



4.4 Implementación de la solución

La finalidad principal es obtener un modelo matemático capaz de representar el comportamiento actual del sistema y a partir del mismo encontrar posibles ajustes que se puedan realizar en el controlador de velocidad para aumentar el desempeño de la planta.

Inicialmente se investigaron los distintos tipos de plantas hidroeléctricas y sus principales características, con el fin de recopilar toda la información necesaria que se consideró se debe dominar para llevar a cabo este proyecto, además de adquirir los conocimientos necesarios en los ámbitos donde aún no se había incursionado, pero que fueron requeridos en la elaboración del mismo.

Junto a la investigación de plantas hidroeléctricas se decidió recabar documentación de los modelos matemáticos más representativos que se han hecho de las centrales, esto para determinar el horizonte a seguir en la realización del modelado, ya que si bien existen diferentes propuestas para cada sistema, existe una que es la que mejor se adapta, es por ello que se requirió contar con un horizonte amplio que permitiera elegir el mejor camino.

La información sobre el proceso de diseño de la planta hidroeléctrica de “La Joya” fue necesario para conocer qué era lo que se quería y que se obtuvo cuando se terminó de construir esta planta, esto ayudó a guiar al modelado. Esta información fue suministrada por la empresa, mediante su biblioteca, donde está documentado todo el proceso de montaje y puesta en marcha de la planta.

El regulador de velocidad instalado en la planta corresponde al NEYRPI 1000STD, este cumple la función de gobernador y controla el lazo de regulación de velocidad, al determinar la cantidad de agua que entra en la turbina mediante el accionamiento del servomotor que mueve el distribuidor, el estudio detallado de este componente es importante para determinar el comportamiento del sistema, por lo que se trató de recopilar toda la información disponible del mismo, a través



de distintos medios: Casa Madre de fabricación, internet, documentación encontrada en bibliotecas, etc.

Tras la investigación del gobernador NEYRPIC no se obtuvieron mayores datos, esta fue vaga y poco precisa en cuanto al tema que se requiere, sin embargo se encontró un documento que habla de un regulador de la misma empresa, el cual es similar al colocado en la planta de “La Joya”, este describe su funcionamiento y presenta con mayor detalle las partes que lo componen.

Con el documento citado anteriormente y bibliografía adicional fue posible implementar un primer modelado del controlador, ajustado mediante la comparación de la respuesta obtenida del mismo y las pruebas hechas con el gobernador de reserva con el que cuenta la planta, se realizaron simulaciones tanto a nivel de software de simulación del modelo y pruebas reales experimentales que se hicieron al simular entradas y perturbaciones en el gobernador de reserva, estas fueron comparadas y mediante pequeños ajustes se obtuvo un modelo similar al comportamiento real del regulador de velocidad.

Durante el proceso de investigación se determinaron las principales fuentes de perturbación que sufre una planta en lo que al lazo de velocidad se refiere; estas básicamente son las mismas para todas las centrales y es el tratamiento de ellas el que determina su correcto modo de operación. La recopilación de las variables que afectan al sistema es parte importante en el desarrollo del modelado, ya que permite una representación más descriptiva del sistema.

Como parte importante en el modelado del lazo de regulación de velocidad es necesario conocer cuál es la respuesta del sistema ante las perturbaciones y recabar la información necesaria que permita documentar estas situaciones para que puedan ser analizadas y posteriormente brindar soluciones o recomendaciones.

Las variables que toma en cuenta el regulador que controla las turbinas debieron ser determinadas para realizar un análisis del regulador, es necesario conocer



todas las entradas que este tiene y a partir de las cuales él mismo genera una respuesta, esto facilitó el análisis del gobernador.

Un primer modelo del regulador de velocidad fue implementado, junto a él se desarrolló un esquema del modelo completo de la planta, simulado y comparado con la respuesta actual del sistema ante una variación en su consigna. Se notaron diferencias que hicieron pensar que el modelo implementado debía ser mejorado y para ello se tenía que prestar mayor atención en las partes que conforman el lazo de regulación de velocidad.

La confiabilidad del modelo implementado corresponde a que tanto se pueda acercar el comportamiento del sistema simulado al real, es mediante la realización de pruebas simuladas y pruebas experimentales que se puede ajustar el modelo lo más posible al comportamiento real.

Como parte del primer modelo del regulador NEYRPIC se consideran algunas de las piezas más importantes de los bloques internos del gobernador, para ser analizadas y convalidadas en procedimientos posteriores, estas son analizadas cada una por separado y corresponden al modo de operación del regulador. Es a través de las pruebas y simulaciones que es posible determinar el correcto comportamiento de cada una y la forma en que fue modelada.

El comportamiento de la turbina es un punto importante en el desarrollo del modelado, se debe determinar su respuesta ante las diferentes variables de entrada que esta experimenta, a través de ensayos controlados realizados a la turbina se obtuvo la información necesaria que permitió conocer la forma de operación de la turbina y su forma de respuesta ante determinados estímulos.

Como aspecto importante en el modelado, fue diseñada una primera versión de la turbina como un módulo que responde ante una entrada, este fue implementado a partir de todo un análisis matemático de lo que respecta a la turbina y la tubería de alta presión, mediante simulaciones este modelo es ajustado para representar de mejor forma el comportamiento real de la turbina.



Se realizaron pruebas para obtener medidas de respuesta de la turbina, consistió en la confrontación del modelado matemático inicial y el comportamiento real de las turbinas. A partir de las pruebas realizadas y de las respuestas que estas ofrecen a los ensayos se reestructuró el modelo inicial y fue posible aproximarlos más al sistema real.

Una vez analizada la turbina también es necesaria la estimación de los parámetros de regulación del sistema hidráulico, turbina, generador y red, esto a partir de información disponible recopilada y mediante las pruebas experimentales que se puedan realizar para recabarlas.

Es primordial conocer todos aquellos datos con los que cuenta la planta necesarios para llevar a cabo el diseño del modelado, estos conformarán la primera aproximación del modelo. Para corroborar los parámetros con los que cuenta la planta se debió proceder a su medición y cuando esta no pudo hacerse de forma directa, se diseñaron pruebas que permitieron tener una aproximación del parámetro.

El funcionamiento del sistema copiador (posicionador y servomotor) y del comportamiento del mismo ante las variaciones que presenta es otra de las partes principales del lazo de regulación de velocidad, la recolección de información de este subsistema es un procedimiento simple pero muy necesario, el cual lleva tiempo y cuidado, a partir de él se puede comenzar a elaborar un modelado empírico del sistema copiador. Se realizaron pruebas de apertura y cierre del distribuidor para obtener la respuesta del mismo ante las diferentes consignas ajustadas.

Una vez que se tiene un equivalente del sistema copiador es necesario integrarlo con los otros subsistemas: la turbina, el gobernador o regulador de velocidad, generador y la red. Esta parte del proyecto es de suma importancia, constituye una de las partes finales, donde se trata de analizar el sistema como un todo. Este depende de la correcta realización de todos los pasos anteriores.



El proceso de conversión de energía mecánica en energía eléctrica por medio del generador y las variables que lo afectan es el otro subsistema a modelar; para esto hay que considerar la red a la cual está conectado, para ello se realizaron pruebas experimentales con el fin de determinar el comportamiento del generador y la red. A través de variaciones en el regulador es posible variar la potencia obtenida del generador y a la vez observar el comportamiento en la frecuencia de operación.

A través de pruebas exhaustivas se pudo determinar el grado de aproximación del modelo, este paso es un proceso cíclico que junto a la reevaluación del modelo y el respectivo ajuste de parámetros, permitió obtener un modelo adecuado de todo el sistema. Esto se lleva a cabo mediante un proceso de comparación de los resultados obtenidos de forma real y lo obtenido a través de un simulador, el cual se ocupa de evaluar el correcto funcionamiento del modelo.

4.5 Reevaluación y rediseño

Una forma de mejorar el modelo final obtenido es analizar las ecuaciones que determinan todo el proceso de generación como un sistema no lineal, esto hará del modelo una representación más exacta la cual no fue contemplada en el presente trabajo por cuestiones de tiempo, ya que el análisis de la planta por este método es más exhaustivo y escapa de las posibilidades del proyecto.

Otra forma de reevaluar el diseño implementado es considerando aspectos omitidos en el diseño actual, los cuales fueron omitidos debido a recomendaciones del asesor de la empresa, entre estos el golpe de ariete, tanque de oscilación y el considerar la tubería como un sistema inelástico.

Al considerar todos los aspectos antes mencionados es posible crear un modelo más representativo de todo el sistema, sin embargo más complejo, que contribuiría a representar mucho mejor el comportamiento del sistema actual de la planta.



Capítulo 5: Descripción detallada de la solución

5.1 Análisis de soluciones y selección final

La solución para mejorar la operación del lazo de regulación de velocidad de la planta hidroeléctrica “La Joya” es hacer un ajuste en el regulador de velocidad que posee la planta para cada una de las tres turbinas que se encuentran en funcionamiento en la central. Sin embargo para hacer dicho ajuste es necesario conocer el funcionamiento del mismo y como realizar dichos ajustes, pero como ya se ha mencionado, la planta no cuenta con un manual de usuario lo suficientemente completo para manipular el regulador NEYRPIC 1000 STD y hacer los ajustes necesarios para aumentar la eficiencia del mismo.

Además de no conocer el accionar del gobernador, tampoco se tiene una herramienta que permita describir el comportamiento de la planta para realizar los ajustes necesarios, esto llevó a la conclusión que para aumentar la eficiencia en el lazo de regulación de velocidad era necesario representar el sistema como tal, de forma que este pudiera ser analizado para determinar los aspectos a corregir del mismo y a la vez brindar una noción de cómo se comportaría con los cambios sugeridos.

Para representar la planta o sistema en estudio fue necesario dividir el lazo de velocidad en varios subsistemas, cada uno por su cuenta puede presentar realimentaciones y en un caso hasta su propio regulador, este corresponde al modelo del servomotor y su sistema copiador. Cada uno es un subsistema que presenta un modelo matemático el cual debe ser adaptado a los parámetros que presentó la planta y ajustado a partir del comportamiento real en la Central de “La Joya”.

Uno de los subsistemas es el regulador de velocidad mismo, este corresponde al gobernador NEYRPIC 1000 STD proporcionado por la empresa ALSTON, es un módulo que presenta varios subsistemas debido a las funciones que desempeña en la planta. Para llevar a cabo su análisis ha sido importante basarse en la



información proporcionada por los fabricantes, quienes los describen como cajas negras que poseen funciones específicas, estas fueron corroboradas por pruebas realizadas en sistema de forma real, junto a estas se presentan otras realizadas de forma experimental en uno de los gobernadores de repuesto que presenta la planta, para cuando uno de los que se encuentran actualmente en funcionamiento fallen. Estas pruebas se llevan a cabo proporcionando al mismo aparato las señales que simulan el comportamiento del lazo de regulación de velocidad.

Para los otros subsistemas que presenta la planta se desarrollaron modelos matemáticos a partir de los ya implementados teóricamente en la bibliografía, estos fueron ajustados para la planta de “La Joya”, además se confrontaron con el comportamiento real de la Central, ya que, el NEYRPIC tiene la capacidad de mostrar y almacenar el comportamiento de algunas de las variables que intervienen en el funcionamiento de la planta hidroeléctrica.

Las primeras versiones de los modelos de los subsistemas correspondían a algo meramente teórico, al comparar las gráficas del modelo obtenidas en una simulación con las obtenidas del NEYRPIC del comportamiento real, fue posible observar cierto grado de variación, esto llevó a reevaluar el modelo implementado y a ser ajustado experimentalmente para obtener un sistema que represente de forma matemática y de una manera más confiable el funcionamiento de la planta hidroeléctrica “La Joya”.

El NEYRPIC 1000STD posee una característica muy importante que determinó el rumbo del proyecto, ya que este permitió observar y almacenar información sobre el funcionamiento en tiempo real de la planta, al obtener gráficas de las principales características de operación como lo son: consignas de apertura y potencia, respuestas del gobernador ante las mismas y el comportamiento del sistema ante las variaciones en los diferentes sub-módulos. Es a partir de esta información mostrada mediante gráficas normalizadas que se comienza a tener una idea del comportamiento de la planta para comenzar a modelarla.



Con respecto al servomotor y el sistema copiador se realizaron pruebas para determinar la respuesta del mismo y de su sistema de realimentación, el cual se encarga de regular la apertura del distribuidor, se obtuvo que este como tal, estaba linealizado y funciona eficientemente con respecto a los cambios en la apertura. Por lo que la implementación de su modelo matemático no presentó mayores complicaciones.

La tubería de alta presión en un inicio fue implementada como un modulo independiente que tenía interacción con el sistema, pero afectó el análisis del modelado, no permitió interactuar de forma correcta y eficiente con los otros sub-modelos de la planta, por lo que se decidió realizar un modelo equivalente que representara la tubería de alta presión y la turbina, esto fue llevado a cabo por recomendación del asesor de la empresa, quien es un experto en lo que respecta a plantas hidroeléctricas. Junto a esta recomendación se llevaron a cabo otras simplificaciones del modelo, esto para hacer el análisis más simple, pero de forma eficiente, dentro de las recomendaciones se tienen: eliminar el efecto del golpe de ariete, considerar el sistema de forma inelástica, el considerar el efecto de un tanque de oscilación, ya que inicialmente se trata de contemplar este efecto, pero para no complicar el desarrollo del trabajo y simplificar el análisis es eliminado del modelado.

El generador es la parte del modelo donde la energía mecánica producto del torque ejercido por el agua es convertido en energía eléctrica, en su modelado interviene un lazo de realimentación donde interactúa el sistema al cual se le suministra la energía, en este caso el barraje nacional; este también dicta la capacidad de respuesta del mismo ante una variación, en el desarrollo del subsistema se tuvo que considerar una característica importante con respecto a las variaciones en la carga, esta corresponde al coeficiente de amortiguamiento, determina que tan rápido responde frente a una variación fuerte en la carga.



Una vez desarrollados todos los sub módulos del lazo de velocidad se procede a realizar el acople o interacción entre ellos y los ajustes necesarios para el correcto funcionamiento del mismo.

5.2 Modelo del lazo de regulación de velocidad

El lazo completo de la regulación de velocidad está constituido por los siguientes bloques:

- El gobernador.
- Servomotor.
- Turbina y tubería forzada.
- Generador y Red.
- Medidor de potencia y de velocidad.

A continuación se procederá a mostrar el modelado matemático de cada uno a partir de la información suministrada en el marco teórico y los principios físicos y matemáticos que explican su comportamiento.

5.2.1 Gobernador

Como se mencionó anteriormente el gobernador utilizado en la central de “La Joya” es el módulo NEYRPIC 1000STD, fabricado por ALSTOM. El diagrama de bloques incluido en los manuales del fabricante es el siguiente:

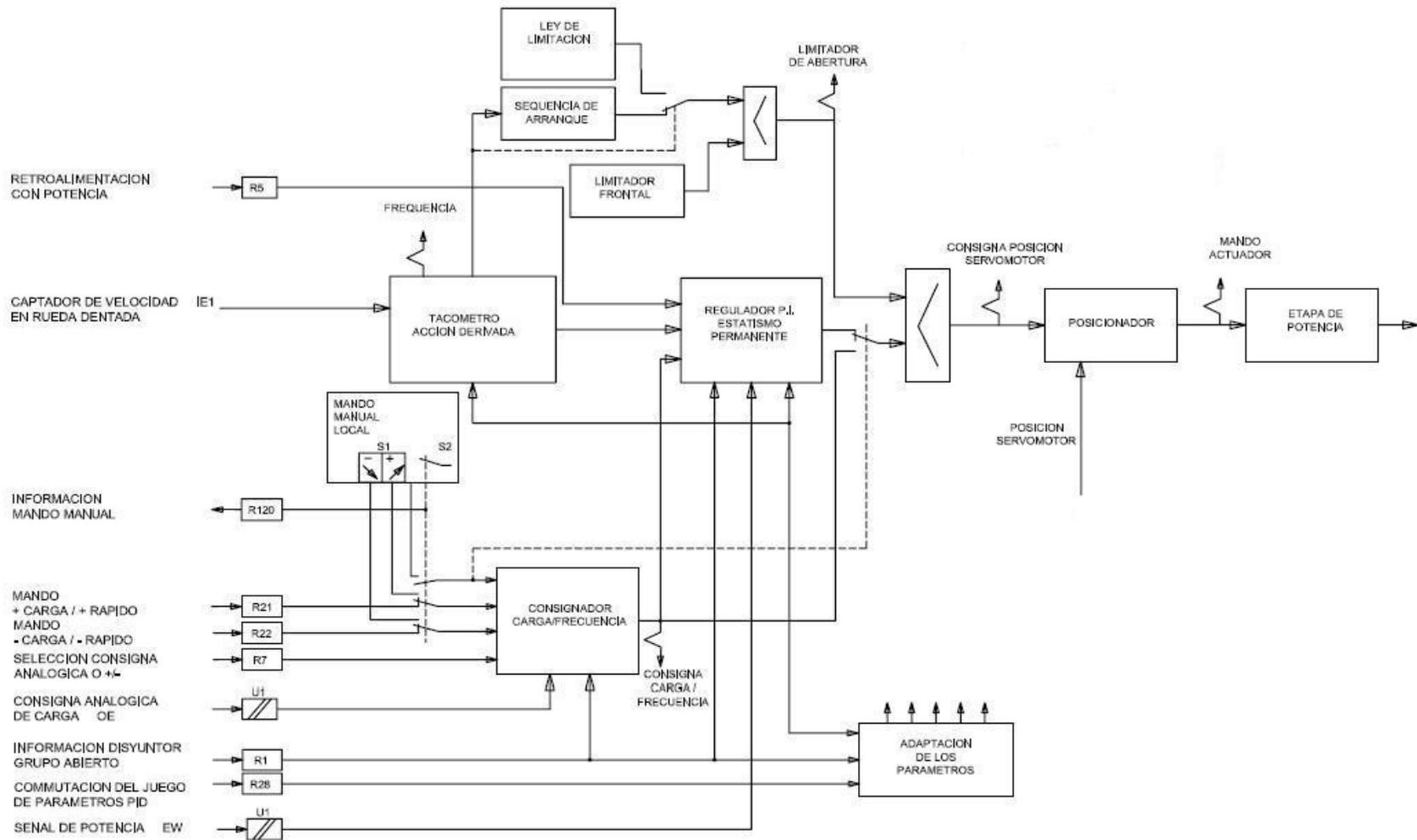


Figura 23 Diagrama de bloques del regulador de velocidad según ALSTON

Fuente: Alston, ver ref. [2]



Como uno de los objetivos del proyecto es poder determinar el funcionamiento de este regulador, se tuvo que describir cada uno de los bloques internos que lo conforman y explicar su funcionamiento físico y encontrar un modelo matemático que lo pueda representar. A continuación se procede a explicar los bloques más importantes que lo conforman y el modelo encontrado.

a) Consignador

El consignador elabora una señal utilizada como consigna de velocidad si el disyuntor del grupo está abierto, o como consigna de posición si el disyuntor del grupo está cerrado, tiene como entradas las señales ETOR 4 y ETOR 5, las cuales corresponden a pulsos digitales que pueden ser dados en el modo mando manual o externamente (señales +/- Carga/rápido). Estos pulsos pueden ser ordenados desde el tablero de control de grupo, ya sea manualmente o directamente desde el sincronizador antes de acoplar, y una vez acoplado el grupo, son el resultado de la consigna deseada.

Para que los impulsos generados tengan acción en la rampa generada, estos deben de tener como mínimo una duración de 10ms, dicha rampa tiene 3 pendientes de evolución, según la modalidad de funcionamiento, estas son determinadas por las variables de configuración TCF que se pueden programar en el regulador, pueden variar de 0.05s a 1000s. La Figura 24, muestra el diagrama interno de bloques del consignador.

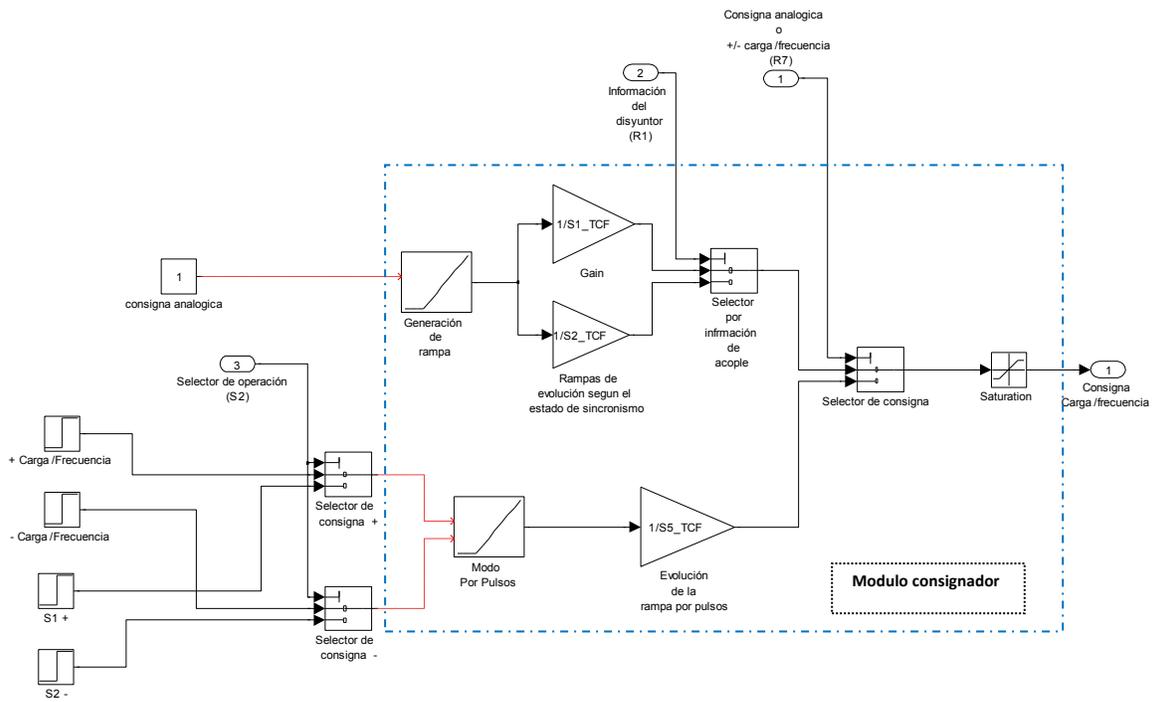


Figura 24 Diagrama de Bloques del consignador

b) Regulador Frecuencia-Potencia

De acuerdo a la CEI-61362, el diagrama de bloques de un regulador de velocidad PID es el mostrado en la Figura 25, a partir de esta norma se procede a explicar el modelo del regulador frecuencia-potencia del NEYRPI 1000STD.

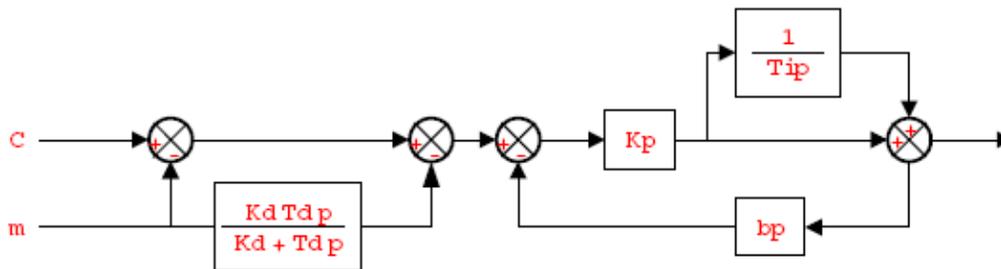


Figura 25 Diagrama de un regulador PID según la norma CEI-61362.

El regulador de velocidad (Frecuencia-Potencia) tiene dos modos de regulación: regulación dinámica y regulación estática, está formado por dos módulos claramente definidos: un sistema que se encarga del control de velocidad, el cual acelera la turbina para mantener la velocidad constante, este consiste en un bloque proporcional derivativo; el otro módulo lo constituye un regulador de estatismo permanente, que constituye un bloque proporcional integral cuando opera en vacío, la unión de estos dos módulos conforman un regulador PID. La Figura 26 muestra los dos módulos que conforman el regulador Carga-Frecuencia, la regulación dinámica consiste en la unión de estos dos módulos cuando el sistema se encuentra operando en vacío.

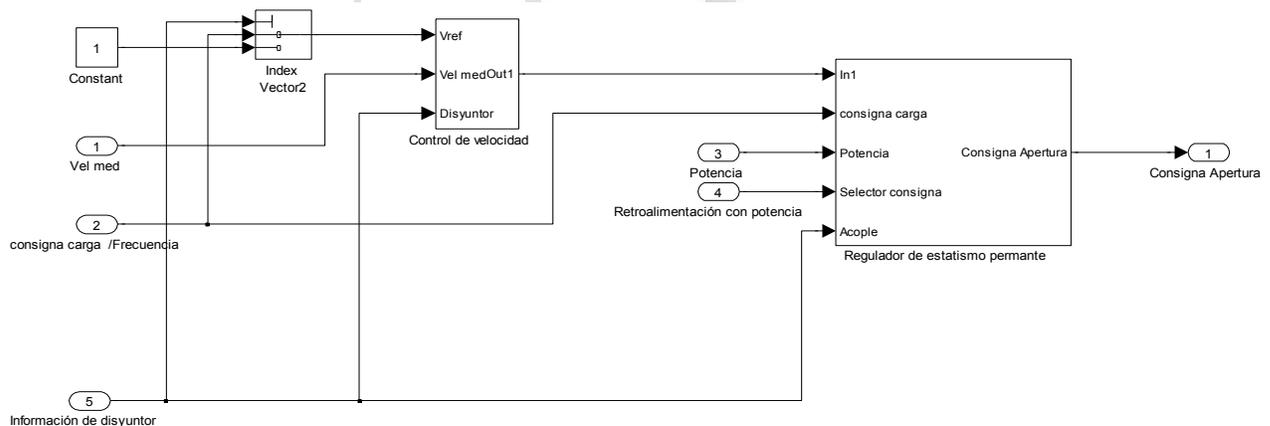


Figura 26 Regulador Carga Frecuencia

En marcha en vacío, el regulador de estatismo permanente forma parte del control de velocidad que permite la sincronización de la unidad. Una vez acoplada a la red comienza la regulación estática; el regulador de estatismo permanente ayuda a mantener la frecuencia de la red variando la potencia entregada si aparece un error de frecuencia en la misma, a esta función se la denomina “regulación primaria”, es en esta parte donde la constante de estatismo permanente (b_p) entra en operación ya que dependiendo de su valor la unidad responderá con mayor o menor fuerza a las desviaciones de frecuencia, en la etapa de arranque y sincronización esta variable tiene como valor cero, lo que significa que el regulador

responde fuertemente a las variaciones de frecuencia, la Figura 27 muestra la estructura interna del regulador de estatismo permanente:

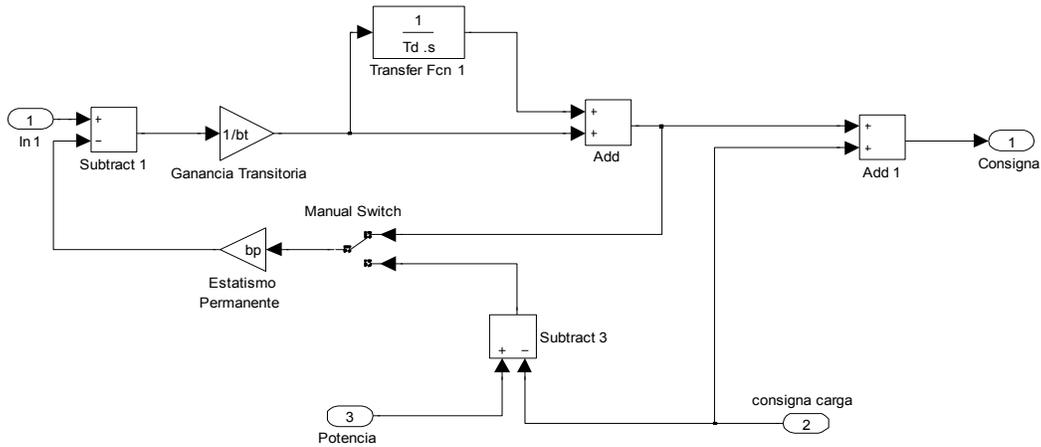


Figura 27 Regulador de estatismo permanente

5.2.2 Posicionador

El posicionador es un regulador PID, forma parte de uno de los dos bucles de regulación del NEYRPIC 1000STD, este bucle de regulación está conformado por el posicionador, el servomotor y la retroalimentación con la posición del servomotor.

Los parámetros con los cuales está configurado este PID no son accesibles al usuario, pueden ser observados, pero no modificados. La Tabla 1 muestra los parámetros con que está programado este regulador

Tabla 1 Parámetros de configuración del regulador de velocidad

Nombre	Definición	Unidades
PN_TD	Tiempo de integración	Segundo
PN_TN	Constante de tiempo del derivador	Segundo
PN_N	Ganancia acción derivativa	Sin unidad
PN_G	Ganancia proporcional	Segundo

La Figura 28 muestra el bloque equivalente del módulo posicionador con respecto a los valores programador en todas las unidades, ya que los parámetros de configuración de estas variables son los mismos para las 3 unidades

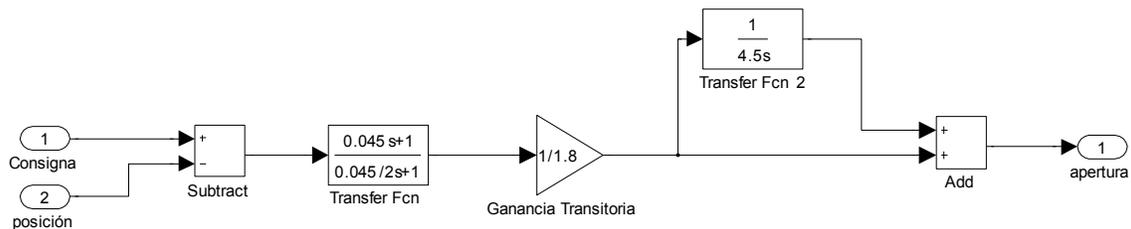


Figura 28 Modelo encontrado para el Posicionador

5.2.3 Servomotor

Se modela como una ganancia con dos retardos, debido a que existe un retardo con respecto a la señal digital y otro debido al sistema mecánico.

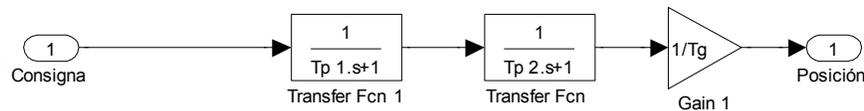


Figura 29 Diagrama de bloques del servomotor

5.2.4 Turbina

A partir de la demostración hecha en el marco teórico y mediante el cálculo de la variable T_w (comúnmente llamada tiempo característico del conducto o tiempo de arranque hidráulico) se determinó la función de transferencia que relaciona la potencia mecánica generada con respecto a la apertura del distribuidor.

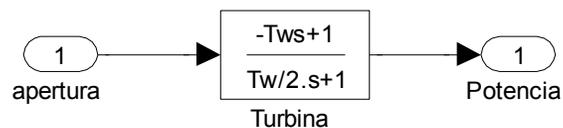


Figura 30 Modelo de turbina implementado

5.2.5 Generador y Red

El diagrama de bloques implementado es el encontrado en el marco teórico y que es mostrado en la Figura 19 que se encuentra en la misma sección.

5.2.6 Medidor de velocidad

Esta parte del lazo de regulación no presenta mayor problema, es mediante la rueda dentada que es posible medir la velocidad a la que gira el grupo (generador y turbina), según los datos técnicos suministrados por el fabricante, la señal puede presentar un retardo como máximo de 0.02s, lo cual se puede modelar como un sistema de primer orden como el que se muestra en la Figura 31. Donde $T_o = 0.02$

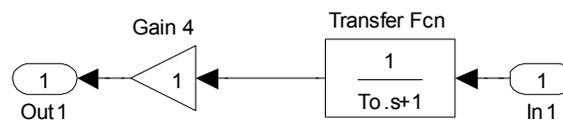


Figura 31 Función de transferencia del medidor de velocidad

5.2.7 Medidor de Potencia (PECA)

El medidor de potencia puede ser considerado un sistema de primer orden con un tiempo de retardo. El tiempo de retardo está disponible en los manuales del fabricante, es equivalente a:

$$T_p = 0.02$$

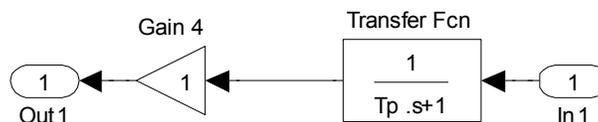
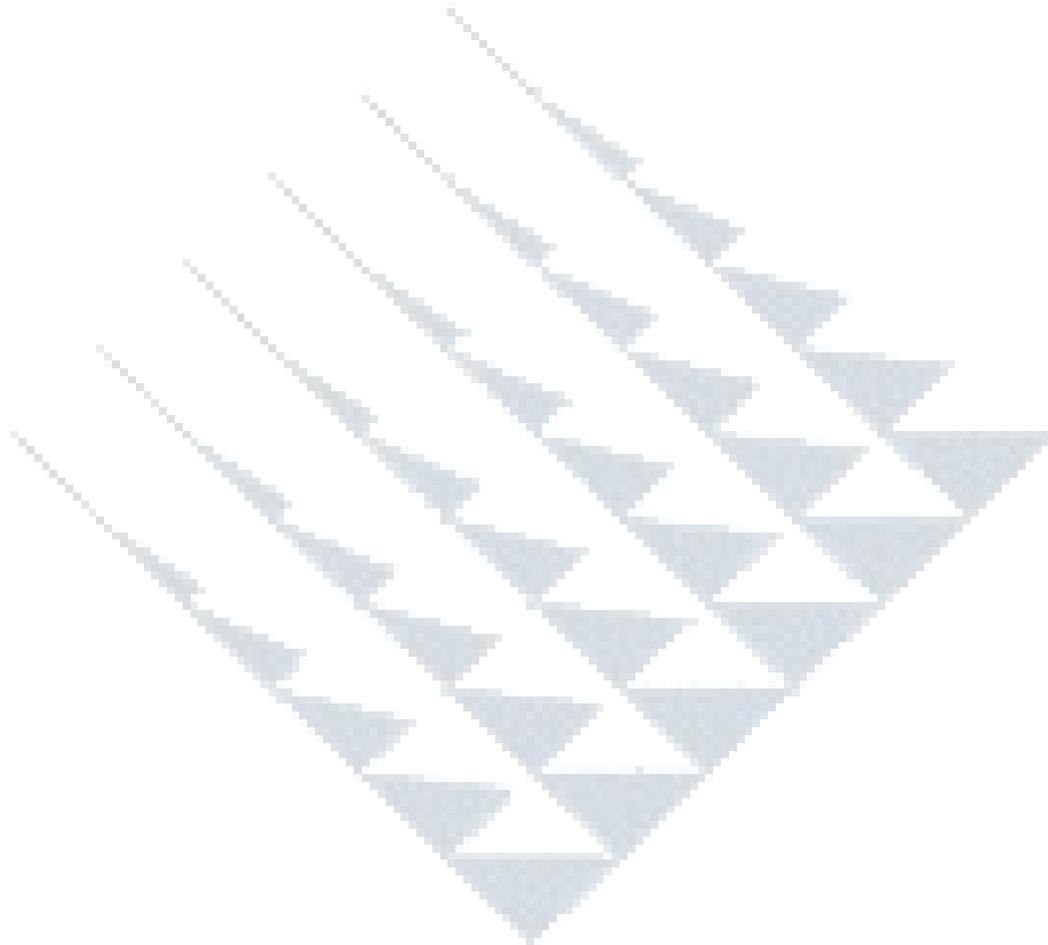


Figura 32 Diagrama de bloques del Medidor de potencia (PECA)



5.2.8 Diagrama completo del lazo de velocidad de la planta.

A partir de la descripción de cada una de las partes del sistema mencionadas hasta ahora se implemento un modelo donde se representa todo el sistema en general de la planta, el cual se muestra en la Figura 33.



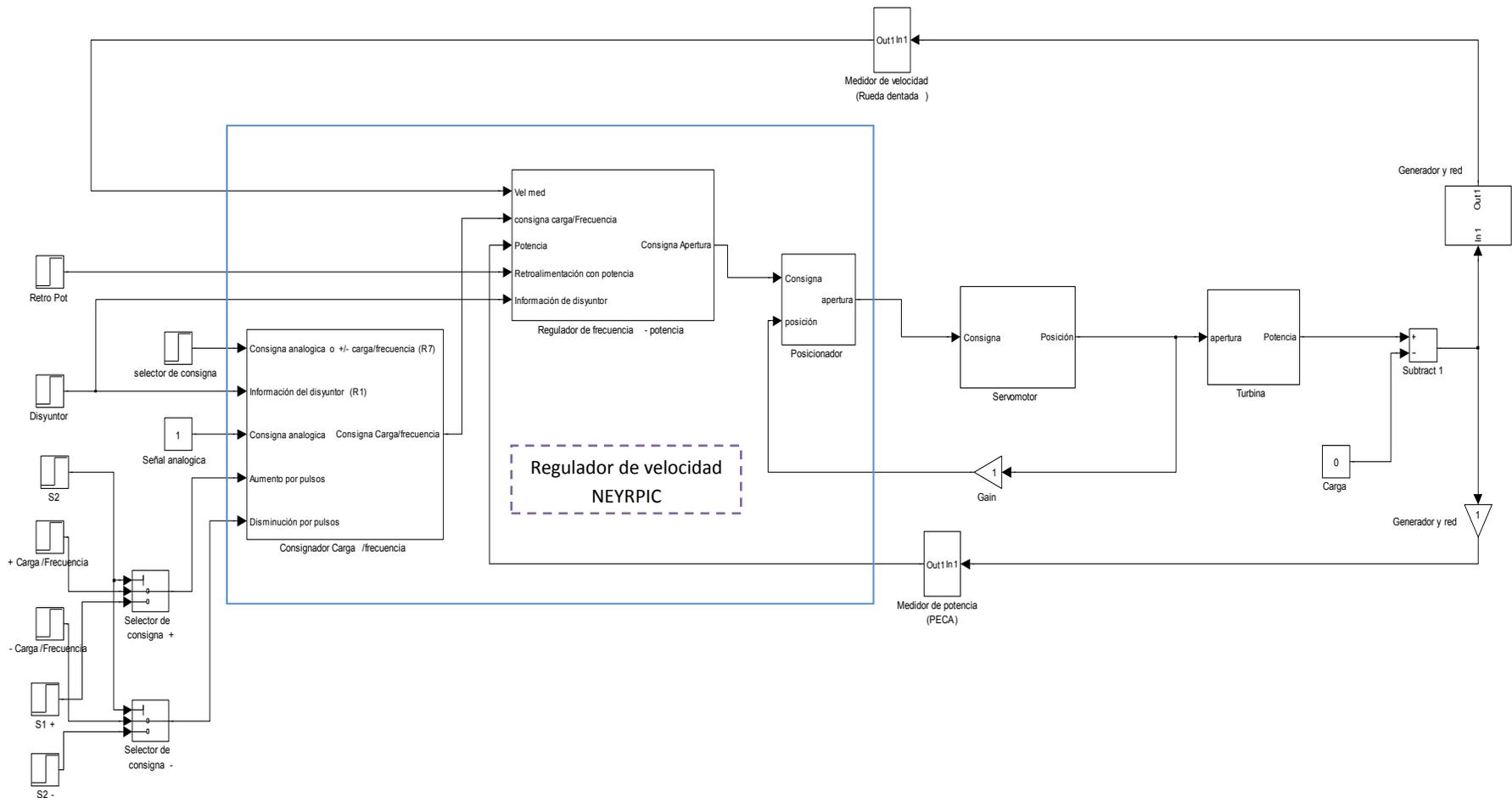


Figura 33 Diagrama de bloques del lazo de velocidad de planta



5.3 Descripción del software

Para el desarrollo del proyecto no se implementó un programa computacional cómo tal, ya que el fin principal fue desarrollar un modelo matemático que presente el lazo, en su lugar se desarrollaron simulaciones del comportamiento del modelado mediante la herramienta computacional MATLAB, mediante este programa fue posible obtener gráficas que representan la respuesta del sistema mediante variaciones que el mismo presente.

En el software mencionado fue posible incorporar las funciones matemáticas equivalentes al comportamiento de todos los subsistemas del modelo equivalente y mediante las herramientas con las que el mismo paquete computacional cuenta, fue posible recrear el comportamiento de la planta ante variaciones, las cuales también fueron incorporadas en la simulación.

Inicialmente lo que se quería era comparar el comportamiento de la planta en tiempo real, que era recopilado por el NEYRPIC 1000 STD con la simulación que trata de representar las variaciones que se presentaron durante el experimento donde se recopilaron los datos. Esto para corroborar que el modelo matemático implementado para los subsistemas que conforman el lazo de regulación de velocidad representan de la mejor manera el comportamiento de la planta.

Luego de obtener una representación aceptable del sistema se procedió a realizar simulaciones que permitieran obtener más información del funcionamiento actual de la planta, para determinar si era posible realizar ajustes en el controlador, y alcanzar mayor eficiencia del sistema.

Se realizaron simulaciones del servomotor y de su sistema copiador (regulador propio), este presenta características que lo hacen un sistema lineal, el cual cuenta con un regulador de posición que funciona correctamente a partir de una consigna dada, esto se observó en las pruebas experimentales recopiladas del NEYRPIC y en las simulaciones realizadas en MATLAB con el modelo equivalente.



Con respecto a la turbina y la tubería de presión los datos que recopila el gobernador solo permiten observar la apertura del distribuidor y la velocidad a la que gira la turbina con respecto a esa apertura, a partir de lo anterior se realizaron simulaciones que permitieran mostrar un modelo que represente esta relación para determinar el comportamiento de la turbina frente a las diferentes variaciones que puede presentar.

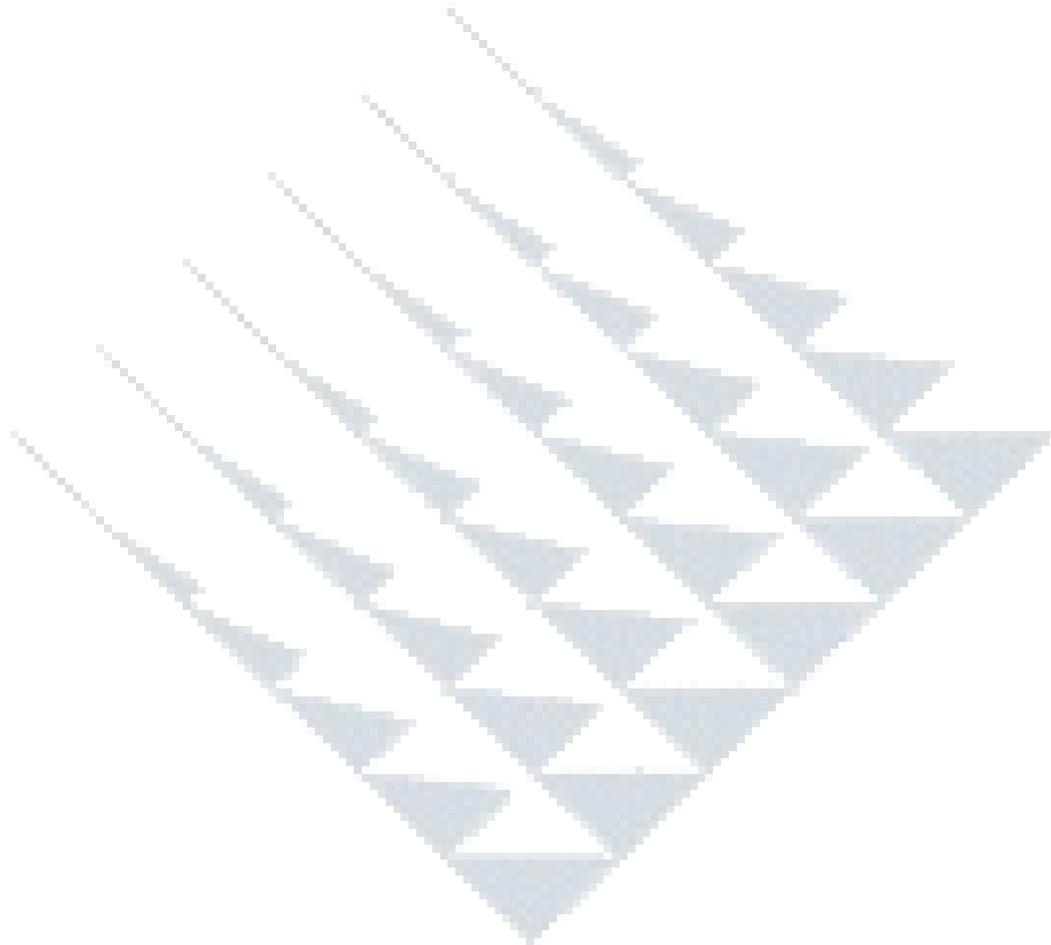
La red a la cual está conectada la planta es el sistema nacional de electricidad, o sea al barraje principal y la planta al ser de 50 MW a capacidad nominal puede considerarse que la carga a la cual está unido el sistema es infinita, esto fue representado en el modelo del generador y la red. Los elementos antes mencionados deben ser analizados en conjunto, ya que la red forma parte de una de las realimentaciones del sistema y de forma directa del subsistema del generador.

Una vez obtenido un modelo aceptable se procedió a realizar ajustes al regulador, para mejorar la eficiencia del mismo, estos se realizaron a partir del lugar de las raíces y del modelo completo, a partir de aquí se procede a ajustar el regulador de forma teórica y mediante el simulador implementado con el modelo de la planta en MATLAB se obtiene una simulación de la respuesta del sistema con los posibles cambios o ajustes que se puedan hacer al regulador de velocidad.

En este proceso de simulación primero se representaron los subsistemas de forma matemática para ser implementados en MATLAB, luego se procedió a su corroboración y ajuste en el mismo software de desarrollo, seguidamente se unificaron los subsistemas y se obtuvo una representación de todo el modelado de la planta, una vez realizado se procedió a crear una simulación que representara el arranque de una de las turbinas, para corroborar el comportamiento de todo el sistema desde su etapa inicial hasta alcanzar la velocidad nominal y posteriormente acoplarse a la red.



Cuando se obtuvo una respuesta congruente con el comportamiento de la turbina en su inicio de operación, se realizaron variaciones en las consignas de operación, con la finalidad de representar las variaciones que pudiera presentar el sistema, a través de todo este proceso se obtuvo la información necesaria del lazo de regulación de velocidad, con esta se determinaron posibles fallas en el accionar actual y a través del mismo programa se sentaron las propuestas de mejora que pueden realizarse en el sistema.





Capítulo 6: Análisis de Resultados

6.1 Resultados Experimentales:

6.1.1 Características principales de la planta

A continuación se resumen las características principales de las Unidades de la C.H. “La Joya”:

Tabla 2 Datos de Turbina hidráulica

Nombre	Valor
Tipo	Francis vertical
Potencia nominal	18.3 MVA
Salto neta nominal	106.1 m
Caudal nominal	18.3 m ³ /s
Velocidad nominal	514.3 rpm
Velocidad de embalamiento	930 rpm
Inercia turbina-generador	35000 kgm ²
Tiempo de apertura distribuidor	11 s
Tiempo de cierre distribuidor	11.5 s
Longitud de tubería forzada	216 m

Tabla 3 Datos eléctricos del generador

Característica	Valor
Potencia nominal aparente	19875 kVA
Factor de potencia nominal	0.885
Tensión nominal	18.8kV
Frecuencia	60 Hz
Número de polos	14
Tensión nominal del rotor	82 V
Intensidad nominal del rotor	724 A

La información mostrada en la Tabla 2 y en Tabla 3 fue recabada a partir de los manuales de puesta en marcha de la planta (ver ref. [2]).



6.1.2 Parámetros de configuración del NEYRPIC 1000

Se revisan los valores de programación de cada uno de los reguladores incluidos en el manual entregado por el fabricante y se comparan con los realmente programados encontrando algunas diferencias.

La Tabla 4 muestra los valores reportados y los realmente programados.

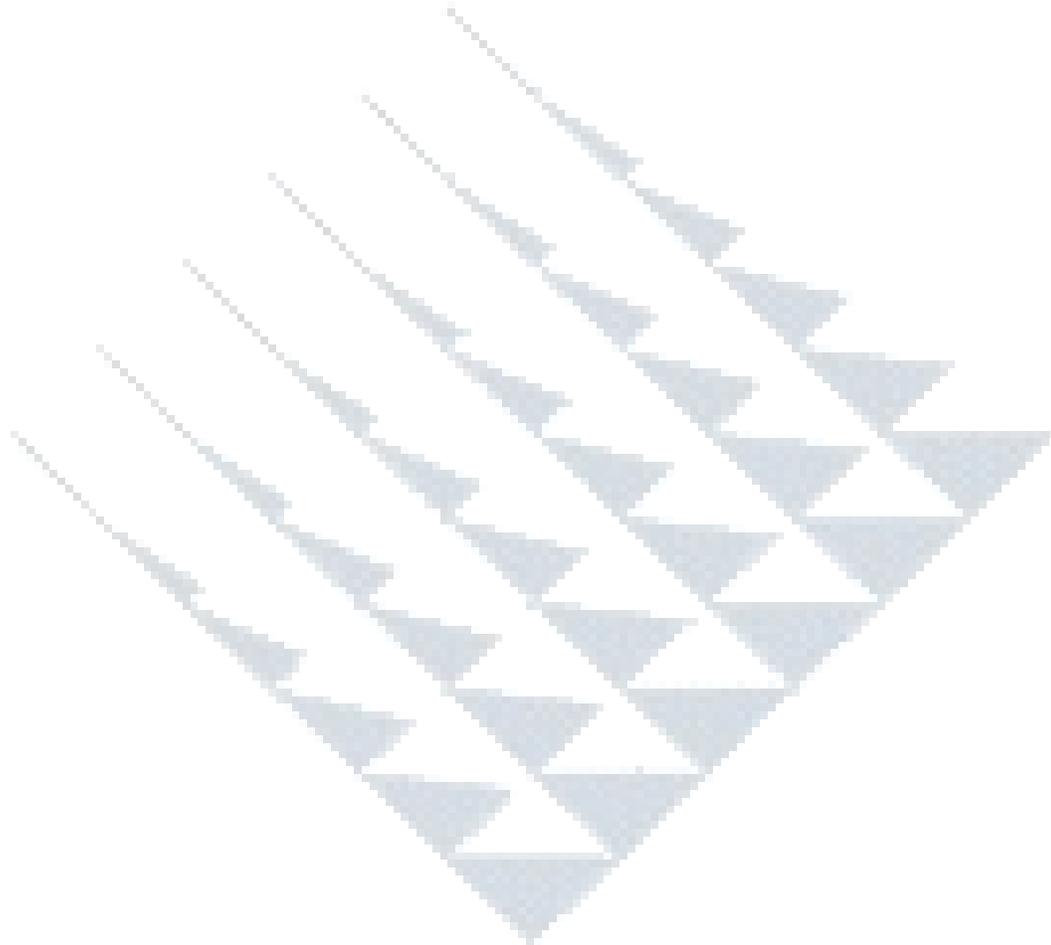




Tabla 4 Parámetros de configuración de operación de las unidades

Símbolo	Parámetro	Unidad 1		Unidad 2		Unidad 3	
		Reporte	Programado	Reporte	Programado	Reporte	Programado
CF_VMAX	Valor máximo de la consigna velocidad	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100
CF_VMIN	Valor mínimo de la consigna velocidad	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900
LO_DEM	Limitador de apertura al arranque	0.330	0.330	0.330	0.350	0.350	0.350
LO_RABT	Limitador de apertura de plegadura	0.280	0.280	0.280	0.290	0.315	0.315
NIV_BP	Estatismo permanente del bucle nivel	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.050
NIV_BT	Estatismo transitorio del bucle nivel	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
NIV_CNG	Consigna de nivel programada	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
NIV_N	Coefficiente de eficacia de la derivada nivel	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
NIV_TD	Tiempo de integración 1 (bucle nivel)	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
NIV_TN	Constante de tiempo de la derivada nivel	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
PU_BTLW	Ganancia proporcional.(Limitador potencia)	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
PU_TDLW	Tiempo integración (Limitador potencia)	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
S1_BP	Estatismo permanente bucle frecuencia	0.050	0.050	0.050	0.065	0.050	0.050
S1_BT	Estatismo transitorio bucle frecuencia	0.500	0.100	0.500	0.370	0.500	0.100
S1_N	Coefficiente eficiencia del acelerómetro	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
S1_TCF	Acelerador máximo normalizado	120.000	240.000	120.000	240.000	120.000	240.000
S1_TD	Tiempo de integración 1 (bucle frecuencia)	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
S1_TD2	Tiempo de integración 2 (bucle frecuencia)	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
S1_TN	Tiempo del acelerómetro	0.450	0.450	0.450	0.500	0.450	0.500
S2_BP	Estatismo permanente bucle frecuencia	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
S2_BT	Estatismo transitorio bucle frecuencia	1.000	1.000	1.000	1.000	0.900	0.900
S2_N	Coefficiente eficiencia del acelerómetro	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
S2_TCF	Aceleración máxima normalizada	180.000	180.000	180.000	180.000	180.000	120.000
S2_TD	Tiempo de integración 1 (bucle frecuencia)	9.000	9.000	9.000	8.000	9.000	10.000



Tabla 4 Parámetros de configuración de operación de las unidades (continuación)

Símbolo	Parámetro	Unidad 1		Unidad 2		Unidad 3	
		Reporte	Programado	Reporte	Programado	Reporte	Programado
S2_TD2	Tiempo de integración 2 (bucle frecuencia)	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
S2_TN	Constante de tiempo del acelerómetro	0.500	0.500	0.500	0.500	5.000	5.000
S3_BP	Estatismo permanente bucle frecuencia	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
S3_BT	Estatismo transitorio bucle frecuencia	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
S3_N	Coeficiente eficiencia del acelerómetro	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
S3_TCF	Aceleración máxima normalizada	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000
S3_TD	Tiempo de integración 1 (bucle frecuencia)	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
S3_TD2	Tiempo de integración 2 (bucle frecuencia)	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
S3_TN	Constante de tiempo del acelerómetro	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
S4_BP	Estatismo permanente bucle frecuencia	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
S4_BT	Estatismo transitorio bucle frecuencia	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
S4_N	Coeficiente eficiencia del acelerómetro	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
S4_TCF	Aceleración máxima normalizada	120.000	120.000	120.000	120.000	120.000	120.000
S4_TD	Tiempo integración 1 (bucle de frecuencia)	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
S4_TD2	Tiempo integración 2 (bucle de frecuencia)	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
S4_TN	Constante tiempo del acelerómetro	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
S5_TCF	Aceleración máxima en modo manual	120.000	180.000	60.000	180.000	60.000	180.000
SY_CHUT	Valor de repliegue de la señal de caída	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
SY_ST1S	Umbral detección de STOR 1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
SY_ST2S	Umbral detección de STOR 2	1.460	1.432	1.460	1.400	1.400	1.400
SY_ST3S	Umbral detección de STOR 3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
VT_PID	Umbral marcha en regulación PID	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995	0.995
VT_SRA	Umbral velocidad plegadura	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800



6.1.3 Descripción de los parámetros más importantes:

Para entender la función y el comportamiento de los parámetros de la Tabla 4 es necesario explicar la secuencia de arranque de grupo.

En un arranque normal de la máquina, se sigue el siguiente procedimiento para llevar a velocidad nominal y sincronización de la máquina:

a) Aceleración

Puede ser realizada de forma manual o automática, si es realizada de forma manual se lleva a cabo a través del mando manual local que se encuentra en el cuadro de turbina; la señal S2 es la encargada de determinar el modo de operación (manual local o remoto), esta señal tiene una rampa de evolución definida por la variable **S5_TCF**. Cuando se opera en este modo la señal generada actúa directamente como consigna de apertura del servomotor.

En el modo remoto, a partir de la orden de marcha, la velocidad real de grupo comienza a aumentar debido a la apertura del distribuidor, inicialmente la apertura se limita en un valor preestablecido en la memoria del regulador, el cual es llamado **LO_DEM**, cuando se llega a este valor se espera que la velocidad llegue a un valor también preestablecido (**VT_SRA**), después que se alcanza esta velocidad, la apertura se ve replegada al valor establecido por **LO_RABT**, esto para reducir la aceleración del grupo.

La velocidad de grupo sigue aumentando pero a menor velocidad, esta etapa termina cuando la medida de velocidad alcanza el valor establecido por **VT_PID**. La Figura 34 muestra el proceso de arranque de una unidad, en la Tabla 5 se resumen los parámetros regulables por el usuario y que intervienen en esta etapa.

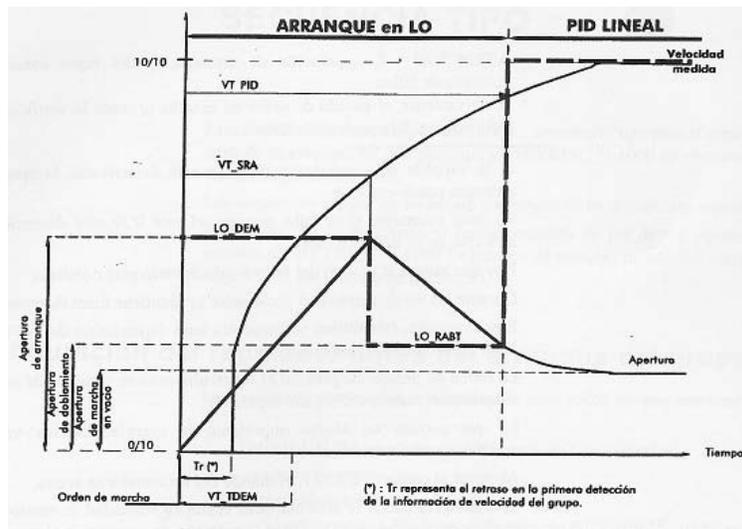


Figura 34 Curva de aceleración en tiempo mínimo

Fuente: Rivera, ver ref. [9]

Tabla 5 Valores regulables por el usuario en el proceso de aceleración

Nombre	Definición	Unidades
LO_DEM	Limitador de aperturas de arranque	Valor reducido de la apertura total
LO_RABT	Limitador de apertura de reducción de aceleración	Valor reducido de la apertura total
VT_PID	Umbral de marcha en regulación proporcional	Valor reducido de la integral derivada velocidad nominal
VT_SRA	Umbral de velocidad de reducción en la apertura	Valor reducido de la aceleración velocidad nominal

b) Regulación

Es en esta fase donde comienza a actuar el regulador PID de velocidad, el juego de parámetros utilizado es el conjunto **S2**, el cual corresponde a marcha en vacío, el conjunto de parámetros se muestra en la Tabla 6.



Tabla 6 Parámetros de la regulación de velocidad (disyuntor abierto)

Nombre	Definición	Unidades
S2_BP	Estatismo permanente del bucle de frecuencia	Valor reducido
S2_BT	Estatismo transitorio del bucle de frecuencia	Sin unidad
S2_N	Coefficiente de eficacia del acelerómetro	Sin unidad
S2_TCF	Aceleración máxima normalizada	Segundo
S2_TD	Constante de integración 1 (bucle de frecuencia)	Segundo
S2_TD2	Constante de integración 2 (bucle de frecuencia)	Segundo
S2_TN	Constante de derivación del acelerómetro	Segundo

El parámetro BP es obligatoriamente igualado a cero, ya que es un proceso transitorio y no interviene la regulación en estado permanente, la variable TCF es utilizada para afinar el control del proceso de sincronización.

c) Sincronización

Este proceso se lleva a cabo por medio del Regulador PID, el cual recibe la evolución de la consigna de velocidad ya sea del sincronizador o por mando manual externo a través de las señales de entrada ETOR4 (R21) y ETOR5 (R22), la consigna sigue la evolución de una rampa, la duración de esta rampa está definida por **S2_TCF**. La evolución de la consigna está limitada por los valores de CF_VMAX y CF_VMIN, los cuales son también ajustables.

d) Acoplamiento

Cuando se logra llegar a la sincronización de la máquina con la red se da la orden de cierre del disyuntor, el regulador conmuta internamente la consigna de velocidad por el valor de consigna interna, el juego de parámetros del regulador de



velocidad se convierten en el de marcha acoplada (**S1**). El estatismo permanente es controlado por **S1_BP**.

e) Toma de Carga

Cuando el grupo esta acoplado a la red es posible acceder a dos modalidades de regulación secundaria: manual y automática, en ambos casos la pendiente de la consigna de carga está controlada por el parámetro **S1_TCF**. La señal de entrada ETOR 0 (relé R7) permite seleccionar la modalidad de funcionamiento, ya sea manual o automática (señal analógica).

e.1 Modo Manual

En modo manual la toma de carga se efectúa a través de las órdenes **+/- carga** (entradas ETOR 4 y ETOR 5, relé R21 y R22 respectivamente.)

Inmediatamente después del acoplamiento y en ausencia de la orden **+/- carga**, el grupo funciona con carga prácticamente nula, incluso si la frecuencia de la red en el momento del acoplamiento es diferente del valor nominal. Sin embargo, si sobrevinieran variaciones de frecuencia en la red después del acoplamiento, el regulador las tomaría en cuenta (regulación primaria.)

e.2 Modo automático

Cuando el regulador se encuentra en modalidad automática, la consigna analógica de carga (EANA 1) fija la característica estática de funcionamiento. El grupo toma inmediatamente la carga si la frecuencia de la red lo permite. En este modo de operación existen dos formas de regulación, uno es por apertura y el otro es por potencia.

La señal de entrada SETOR 8 (relé R5) es la encargada de determinar si la regulación se hace por potencia o por apertura, esta constituye la señal **Retro Pot** de la Figura 33, donde internamente en el regulador PI la señal se encarga de determinar si la retroalimentación del regulador es el error entre la consigna de

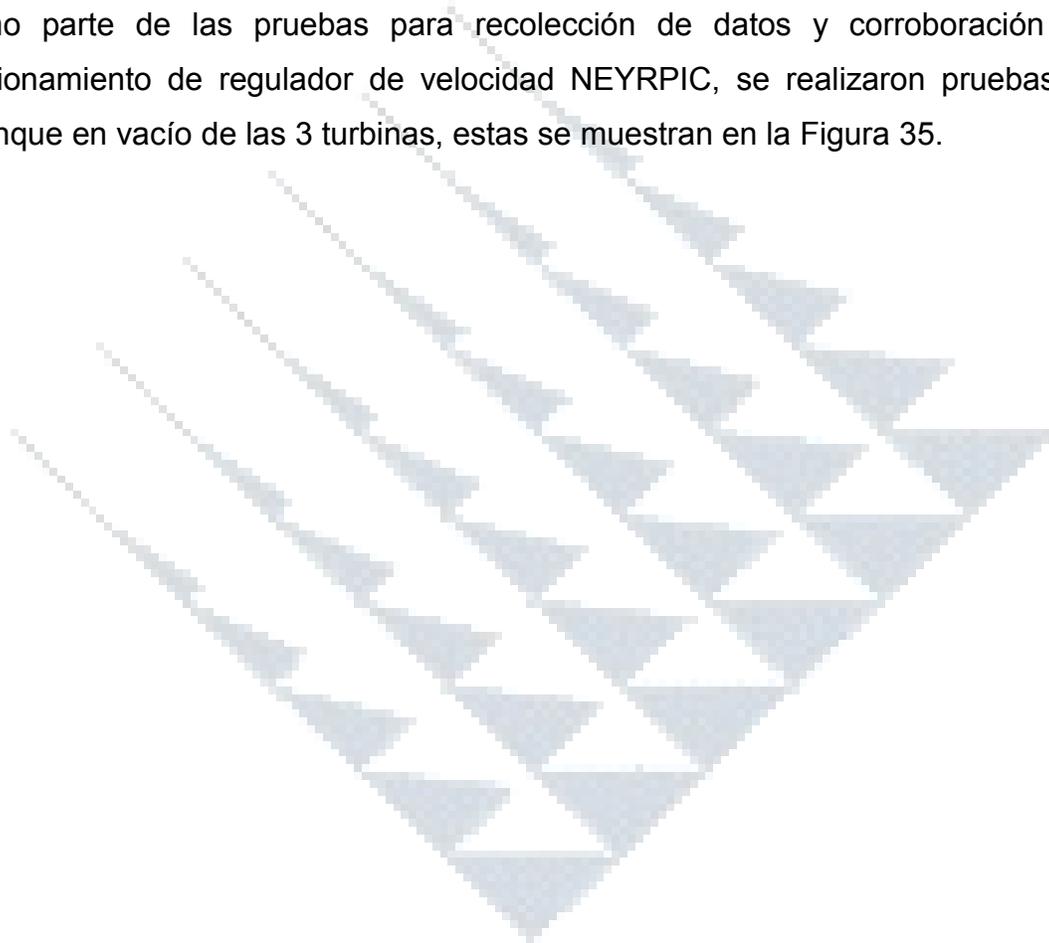


potencia y la potencia obtenida o la salida del PI, esta retroalimentación constituye el efecto del estatismo permanente del sistema.

La variable **S1_BP** es la encargada de la regulación estática. Si BP es pequeño, la unidad reacciona con fuerza a una desviación de frecuencia. Si BP es grande, la unidad obedece sobre todo a su consigna de carga.

6.1.4 Pruebas de arranque

Como parte de las pruebas para recolección de datos y corroboración del funcionamiento de regulador de velocidad NEYRPIC, se realizaron pruebas de arranque en vacío de las 3 turbinas, estas se muestran en la Figura 35.



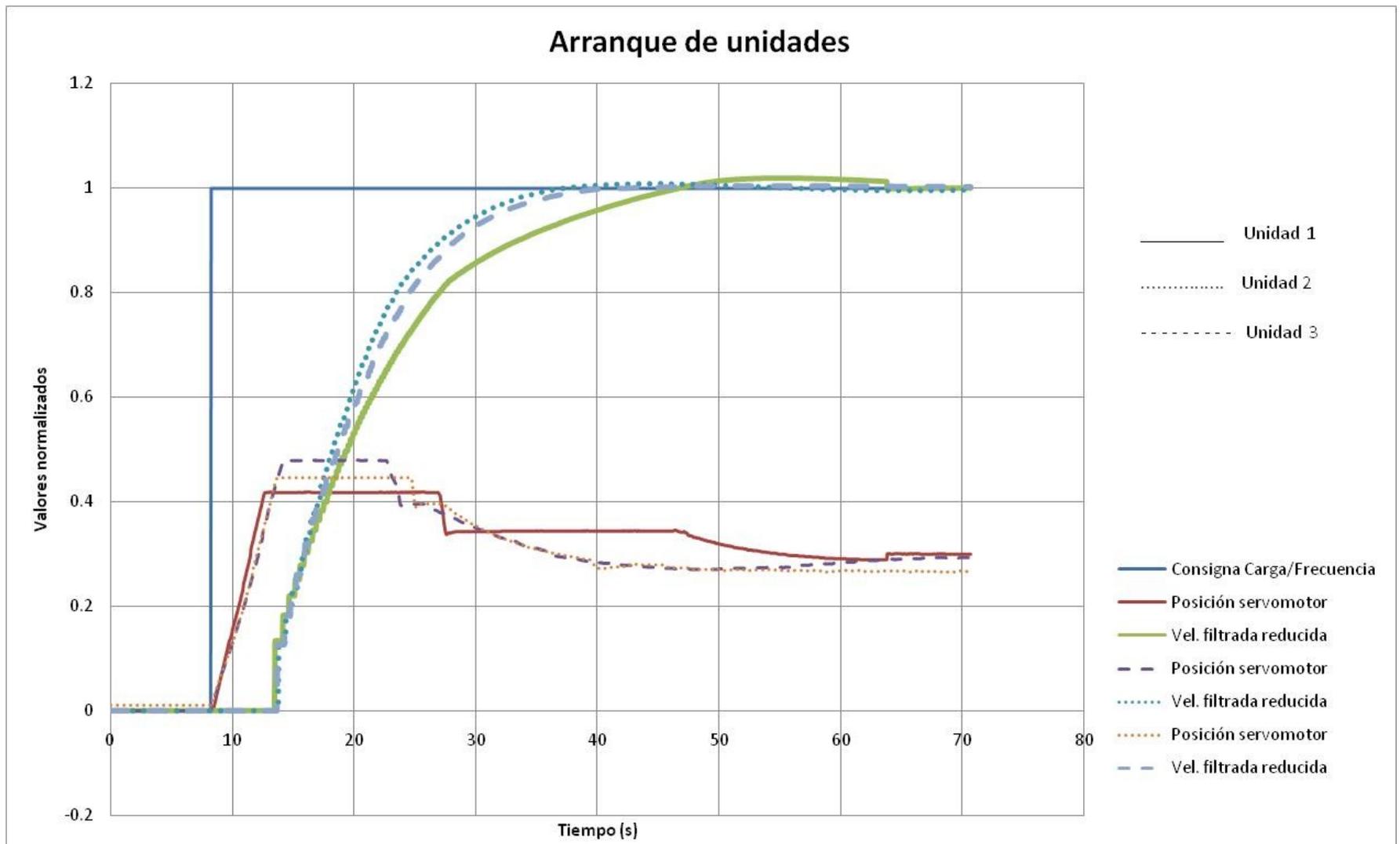


Figura 35 Gráficas de la secuencia de arranque de las 3 unidades de la central “La Joya”



La Tabla 7 muestra la diferencia entre los valores programados y obtenidos experimentalmente en el proceso de arranque:

Tabla 7 Valores programados para el arranque

	Unidad 1		Unidad 2		Unidad 3	
	Valor teórico	Valor experimental	Valor teórico	Valor experimental	Valor teórico	Valor experimental
LO_DEM	0.330	0.418	0.350	0.4785	0.350	0.4453
LO_RABT	0.280	0.3438	0.290	0.3955	0.315	0.3955
VT_PID	0.995	0.9956	0.995	0.8938	0.995	0.8709
VT_SRA	0.800	0.7972	0.800	0.7647	0.800	0.8027

6.1.5 Variaciones de consigna

Se realizaron pruebas con respecto a la regulación automática por apertura y por potencia, se observó la respuesta del sistema ante escalones del 25% en la consigna. Los resultados se muestran en las siguientes figuras:

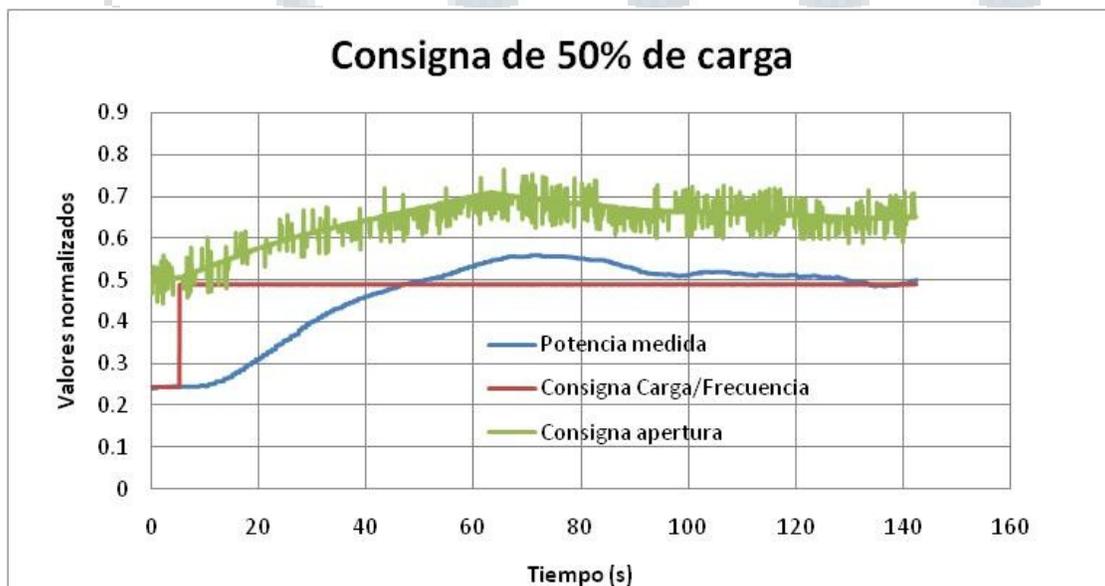


Figura 36 Respuesta del sistema ante un escalón de 25%, consigna de 10MW (Unidad 2)

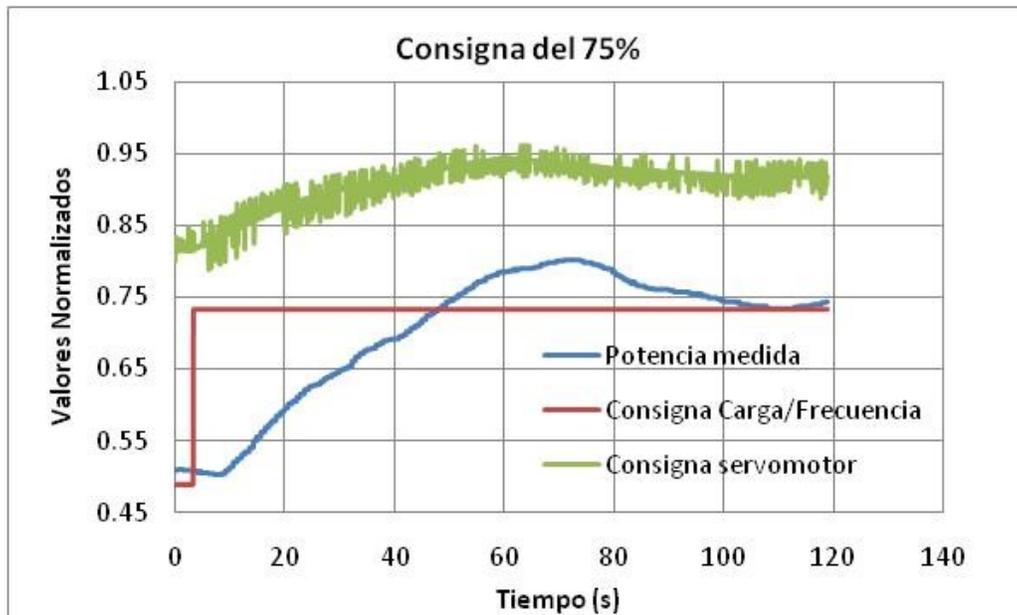


Figura 37 Respuesta del sistema ante un escalón de 25%, consigna de 15MW (Unidad 2)

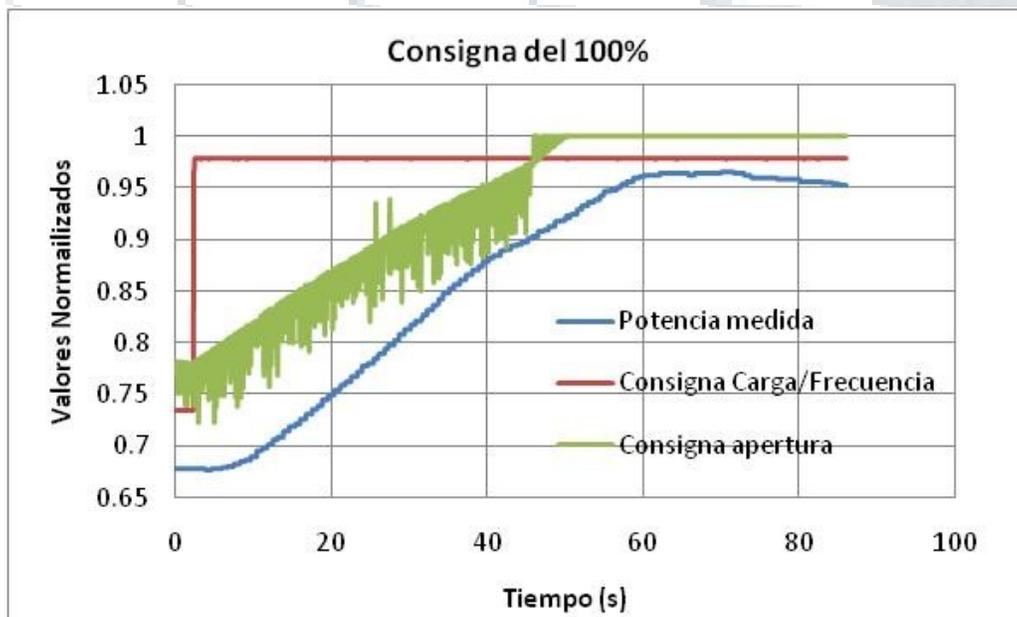


Figura 38 Respuesta del sistema ante un escalón de 25%, consigna de 20MW (Unidad 2)

La Figura 39 muestra los resultados obtenidos para un escalón de consigna de potencia bajando.

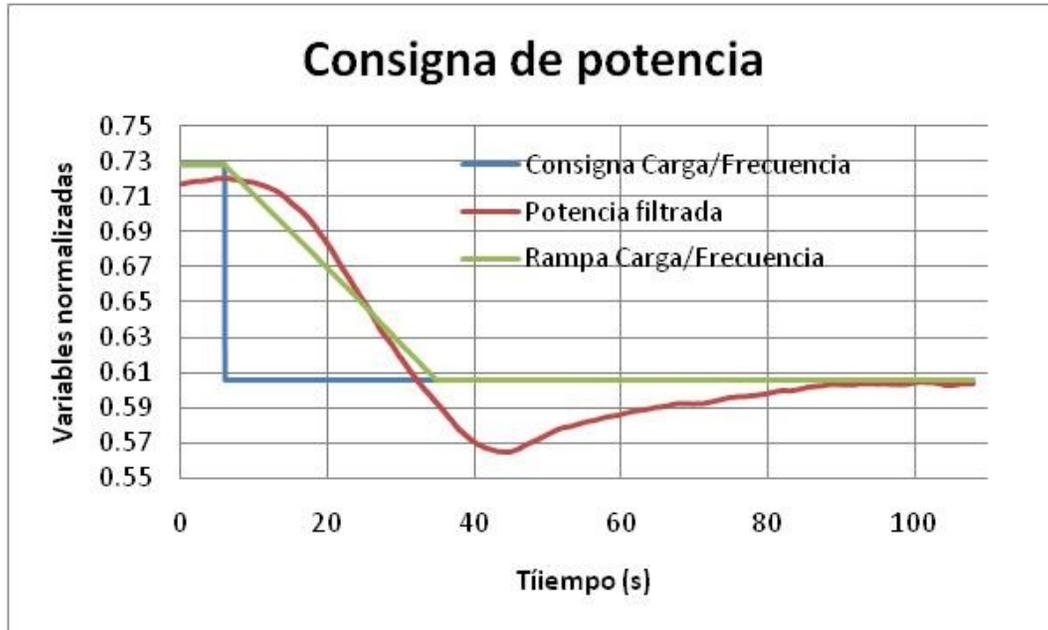


Figura 39 Respuesta ante un escalón en la consigna de potencia del sistema

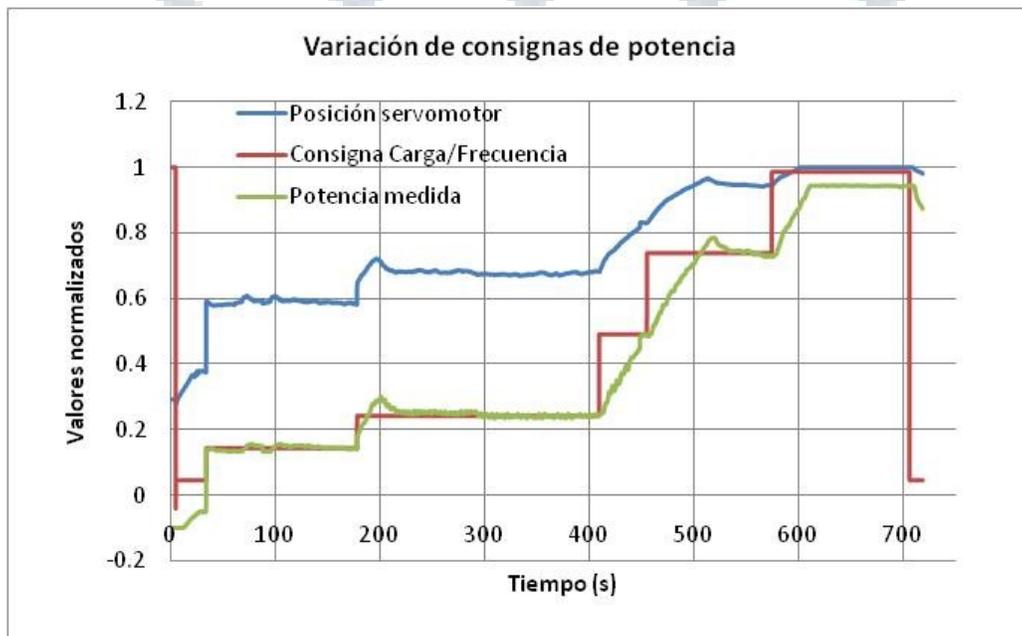


Figura 40 Variación de carga desde potencia mínima a máxima generada (unidad 3)

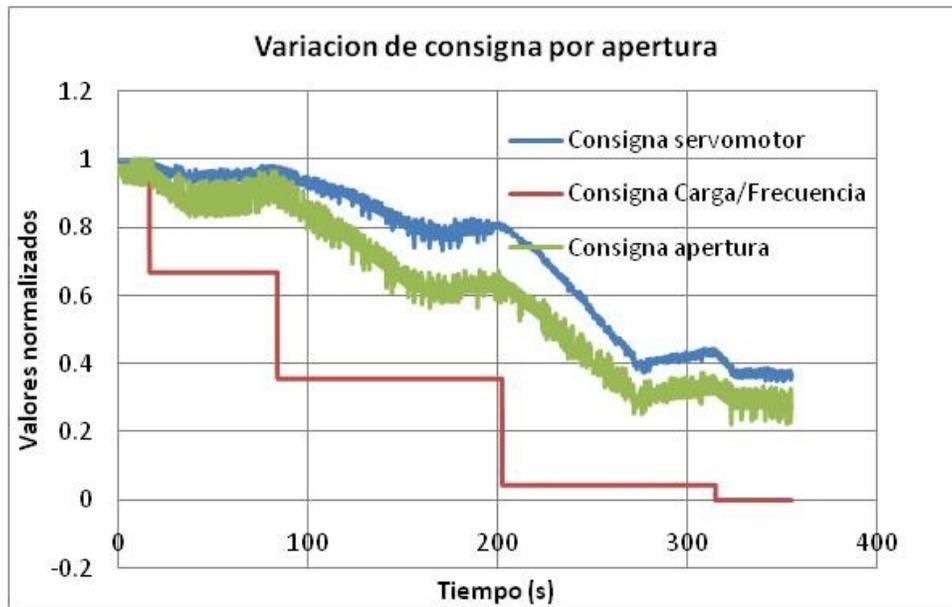


Figura 41 Respuesta del sistema ante variaciones en regulación por apertura (unidad 2)

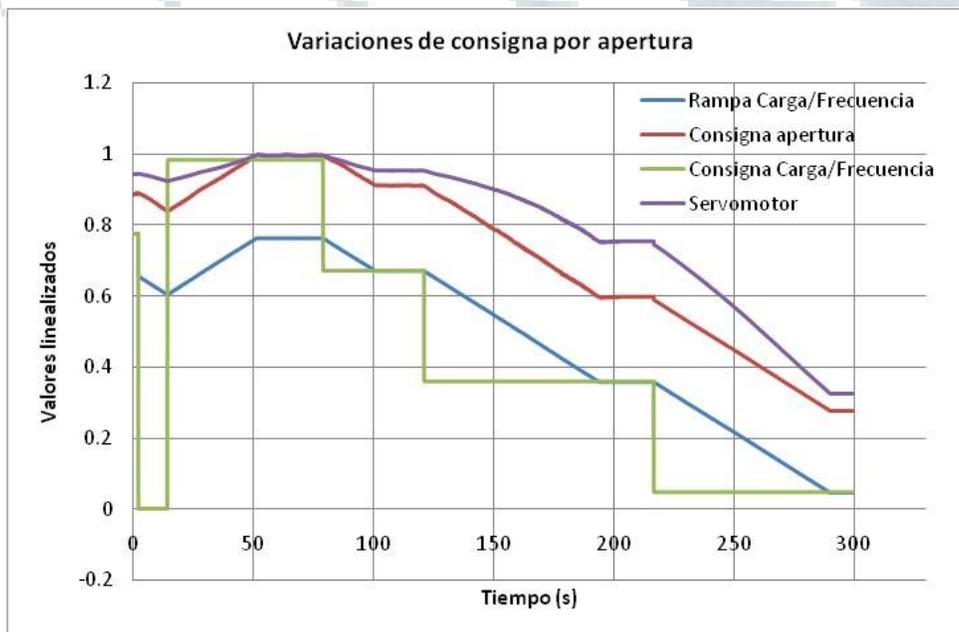


Figura 42 Valores de algunos parámetros de regulación ante variaciones en la consigna por apertura (unidad 3)



A continuación se muestran la Tabla 8 y la Tabla 9, donde se resume el comportamiento de la regulación por potencia y por apertura respectivamente de la unidad 2 ante los cambios en la consigna con escalones de 25%.

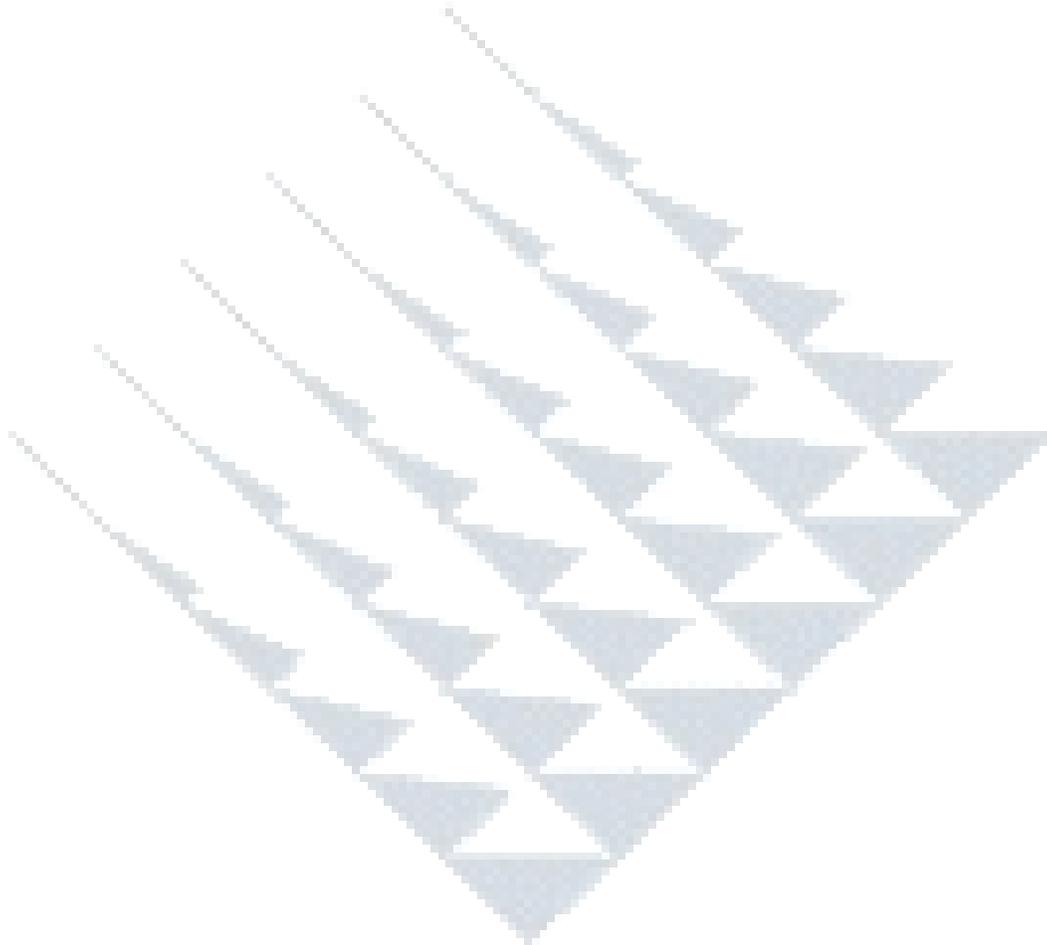




Tabla 8 Regulación de velocidad por potencia, unidad 2

%	Lectura de Consigna Potencia			Lecturas de Potencia			Lectura de Apertura Distribuidor					
	SCADA (KW)	NEYRPIC		SCADA (KW)	NEYRPIC		SCADA (KW)	NEYRPIC				C.C Turbina (%)
		Lazo (mA)	Consigna Carga/Frec		Lazo (mA)	Potencia Medida (%)		Consigna Apertura	Consigna a Servo	Servo	Lazo (mA)	
Min	3000	6.39	-	4420	-	-	46.34	-	-	-	11.41	45
25	5000	7.99	0.24242	6372	8.66	0.24604	52.47	0.50694	0.66406	0.65983	12.34	50
50	10000	11.99	0.48876	10778	12.00	0.49589	68.59	0.65176	0.81152	0.80344	14.97	67.5
75	15000	15.98	0.73412	15292	15.46	0.71994	88.47	0.76228	0.91073	0.91309	18.12	85
100	20000	19.97	0.97849	18947	18.18	0.95924	99.09	1	1	1	19.89	97.5

Tabla 9 Regulación de velocidad por apertura, unidad 2

%	Lectura de Consigna Apertura Distribuidor			Lecturas de Potencia			Lectura de Apertura Distribuidor					
	SCADA (%)	NEYRPIC		SCADA (KW)	NEYRPIC		SCADA (KW)	NEYRPIC				C.C Turbina (%)
		Lazo (mA)	Consigna Carga/Frec		Lazo (mA)	Potencia Medida (%)		Consigna Apertura	Consigna a Servo	Servo	Lazo (mA)	
Min	21	3.99	0	333	4.18	-	27	0.27165	0.3596	0.3603	8.30	25
25	25	4.80	0.04399	1290	4.91	-	32	0.98355	0.4221	0.4106	9.06	30
50	50	9.86	0.35679	8492	10.42	-	60.91	0.62263	0.8056	0.8175	13.87	60
75	75	14.92	0.6652	16456	16.22	-	92.47	0.3115	0.9668	0.9721	18.75	90
100	100	19.97	0.97849	18874	18.13	-	99.18	0.9745	0.9893	1	19.89	97.5



6.1.6 Leyes de interpolación

Dentro de las opciones de programación del NEYRPIC 1000STD está la opción de crear leyes de interpolación, esto mediante la comunicación por conexión serial del Regulador y el software STATUS, el cual permite crear una ecuación.

Cada ley está definida por 9 intervalos (10 puntos) seleccionados por el usuario para estudiar lo mejor posible la curva resultado. En el caso del regulador de la planta se tienen implementados 3 leyes de linearización por cada regulador, estas son:

a) *Linearización de potencia*

Esta consiste en una relación uno a uno con respecto a la señal de potencia que recibe del medidor de potencia.

b) *Limitación de la apertura*

No es más que la definición del límite en la apertura del servomotor, la cual es establecida con un valor de 1.

c) *Ley de interpolación del servomotor*

La relación existente entre la apertura de distribuidor y carrera del servomotor no es lineal, por lo que debe ser programada a partir de una serie de diez puntos. Las leyes aplicadas a cada una de las unidades son las siguientes:

Tabla 10 Conjunto de puntos que forman la ley de linealización del servomotor

Punto	Unidad 1		Unidad 2		Unidad 3	
	X (consigna apertura)	Y(consigna del servomotor)	X (consigna apertura)	Y(consigna del servomotor)	X (consigna apertura)	Y(consigna del servomotor)
0	0	0	0	0	0	0
1	0.1033	0.1	0.098	0.1	0.098	0.1
2	0.1848	0.2	0.174	0.2	0.185	0.2
3	0.2554	0.3	0.304	0.4	0.261	0.3
4	0.3913	0.5	0.38	0.5	0.326	0.4
5	0.467	0.6	0.446	0.6	0.402	0.5
6	0.5489	0.7	0.533	0.7	0.543	0.7
7	0.6467	0.8	0.63	0.8	0.652	0.8
8	0.7826	0.9	0.772	0.9	0.783	0.9
9	1	1	1	1	1	1

A partir de este conjunto de puntos es posible hacer una aproximación experimental de la relación apertura del distribuidor-carrera del servo, esto mediante la curva de mejor ajuste que pueda unir los puntos programados, las figuras siguientes muestran estas aproximaciones.

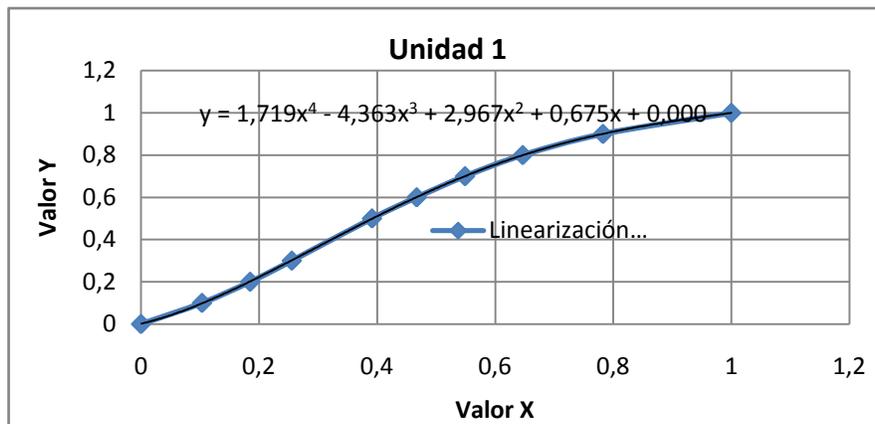


Figura 43 Curva de linealización del servomotor de la unidad 1

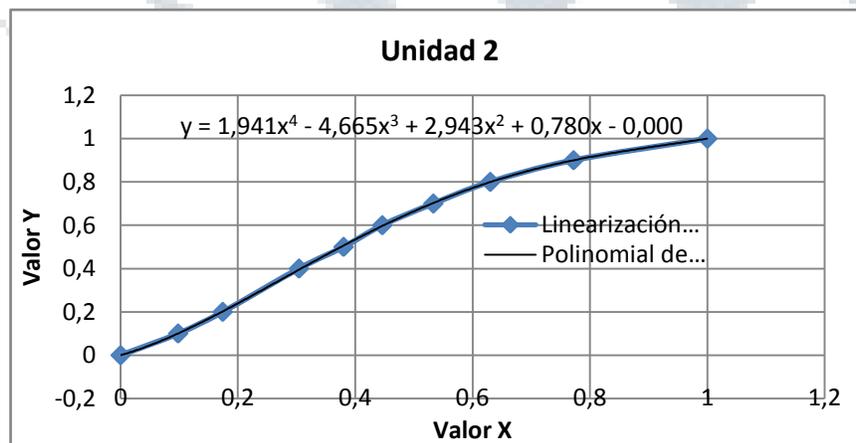


Figura 44 Curva de linealización del servomotor de la unidad 2

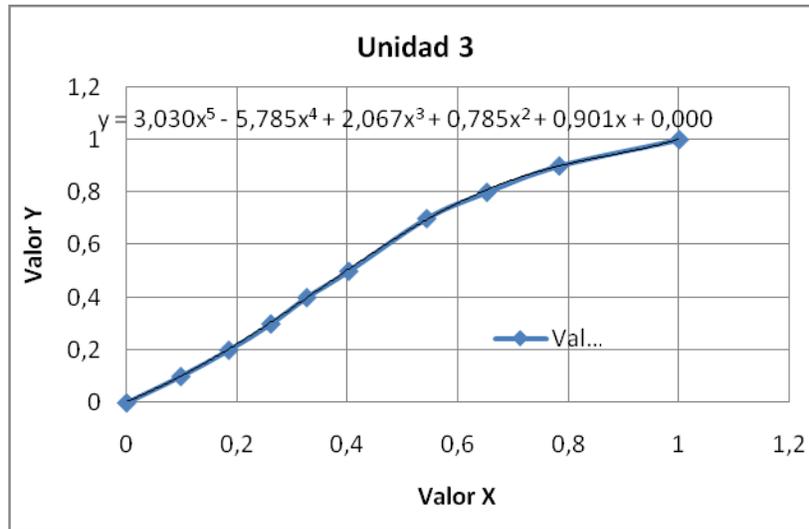


Figura 45 Curva de linealización del servomotor de la unidad 3

Una de las pruebas realizadas consistió en aplicar estas leyes a los datos obtenidos de una prueba experimental donde se varió la posición del servo a partir de una nueva consigna de apertura, la Figura 46 muestra los resultados de esta linealización en la unidad 3.

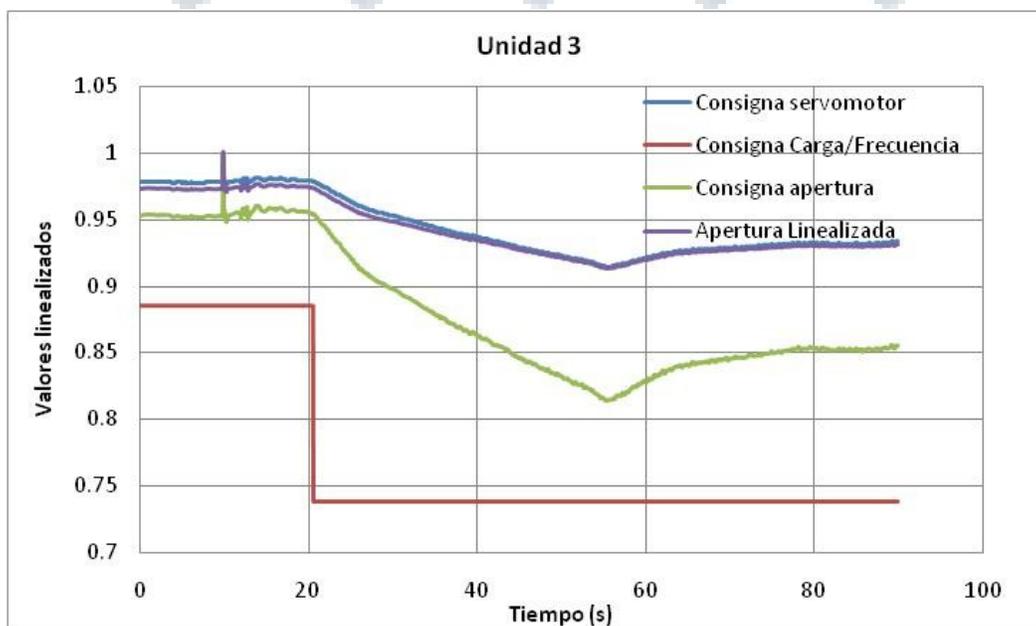


Figura 46 Linearización de la curva de consigna de apertura



6.1.7 Limitación del distribuidor

Para probar la relación directa entre apertura del distribuidor, servomotor y sus respectivas consignas se realizó una prueba cuando una de las máquinas estaba en mantenimiento, es decir máquina detenida y tubería de la turbina respectiva descargada, la prueba consistió en obtener los respectivos valores mediante la interfaz de comunicación del NEYRPIC y una PC, además de medir los valores de tensión equivalentes a la consigna de apertura suministrados en los respectivos lazos de 4 a 20 miliamperios de las variables a medir.

Tabla 11 Apertura del distribuidor

Apertura Distribuidor (%)	Apertura Distribuidor (mm)	Lazo de Corriente (mA)	Posición			
			Local	NEYRPIC		SCADA
				Cons. Servo (%)	Posición ant (%)	
0	0	4.13	0	0.03418	0.01053	1
25	23.5	7.99	22.5	0.29883	0.24796	25
50	47	12.07	49.5	0.63867	0.48899	50
75	68.5	16.08	74	0.87109	0.74759	75
100	92.5	19.91	96	1	0.9962	99
75	75	15.99	72.5	0.87109	0.74781	75
50	47	11.92	47.5	0.63811	0.48852	50
25	23.5	8.03	22.5	0.29863	0.24796	25
0	0	4.15	0	0	0.01053	1

6.1.8 Respuesta del sistema modelado

Una vez determinado el modelo matemático de la planta se programa el mismo en MATLAB para simular el comportamiento del sistema ante variaciones en la consigna de apertura de distribuidor, en la consigna de potencia y de frecuencia de la red.

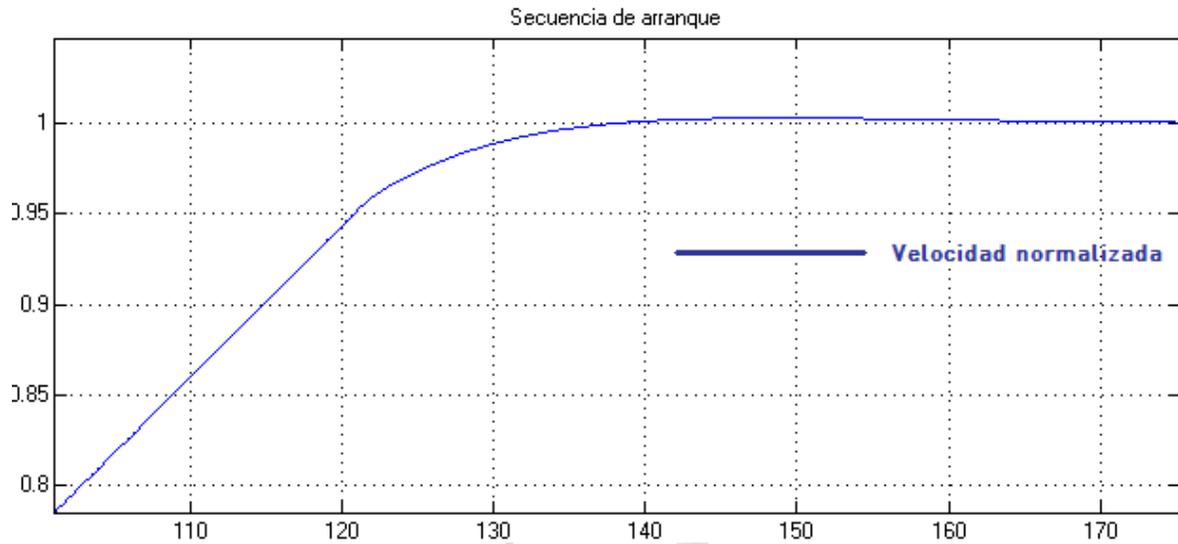


Figura 47 Arranque de unidad, regulación PID

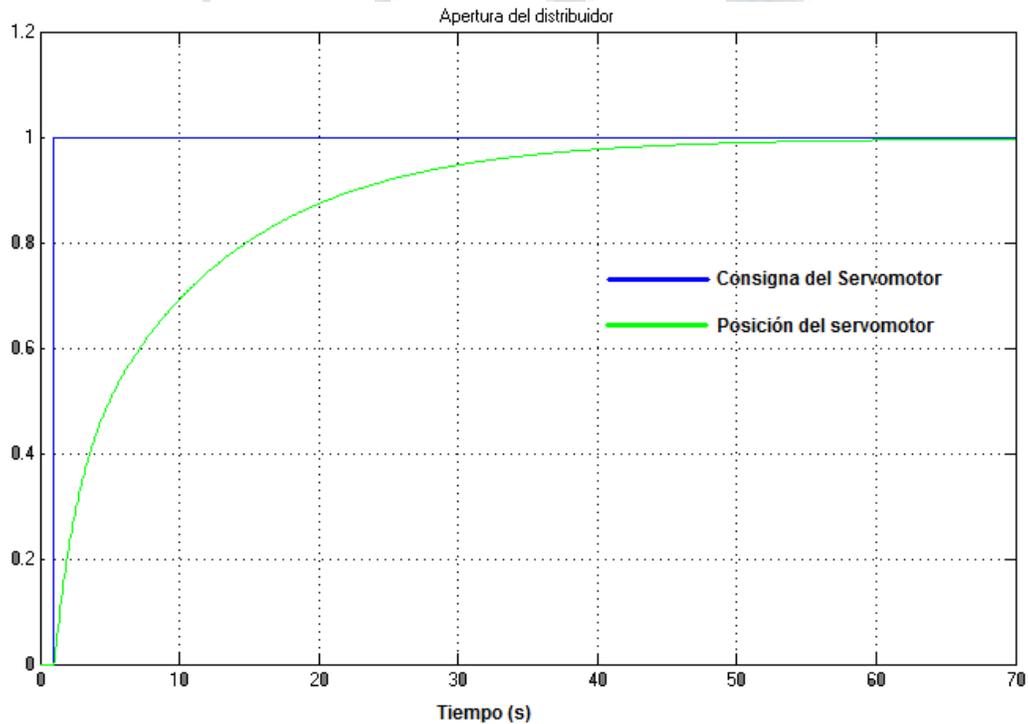


Figura 48 Apertura del distribuidor ante una señal de escalón unitario

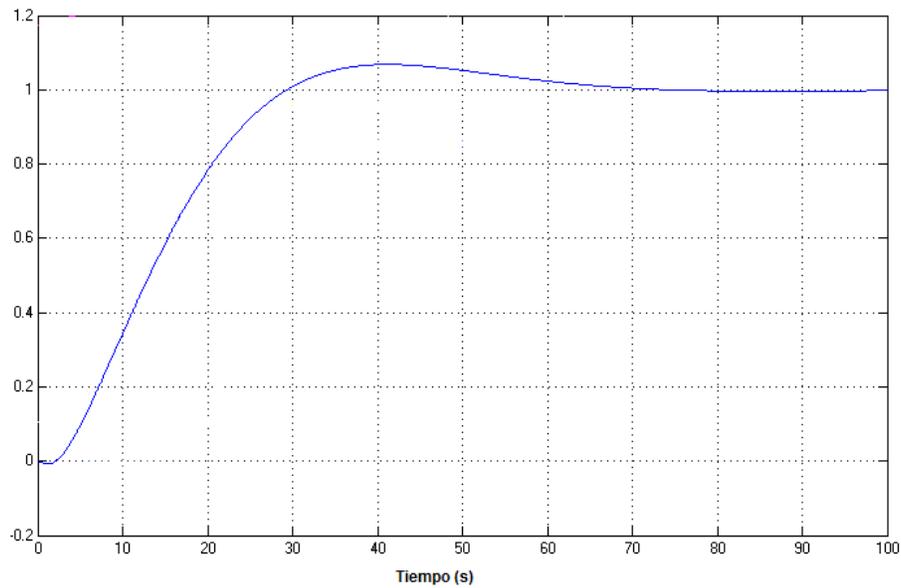


Figura 49 Variación de la velocidad ante un escalón unitario en una secuencia de arranque

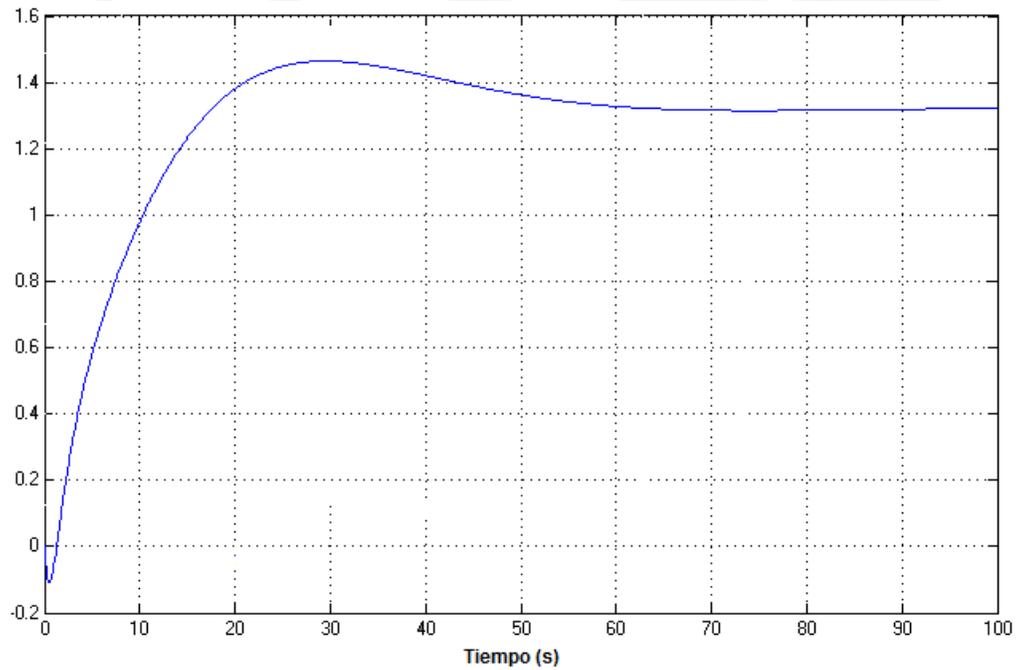
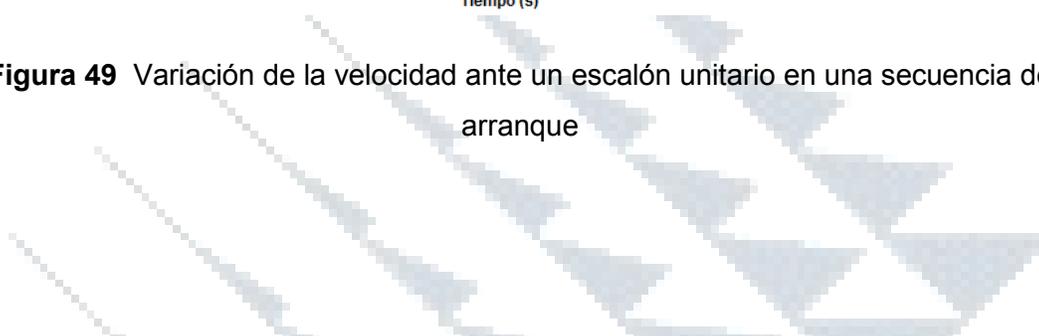


Figura 50 Potencia generada en el arranque en vacío ante un escalón unitario

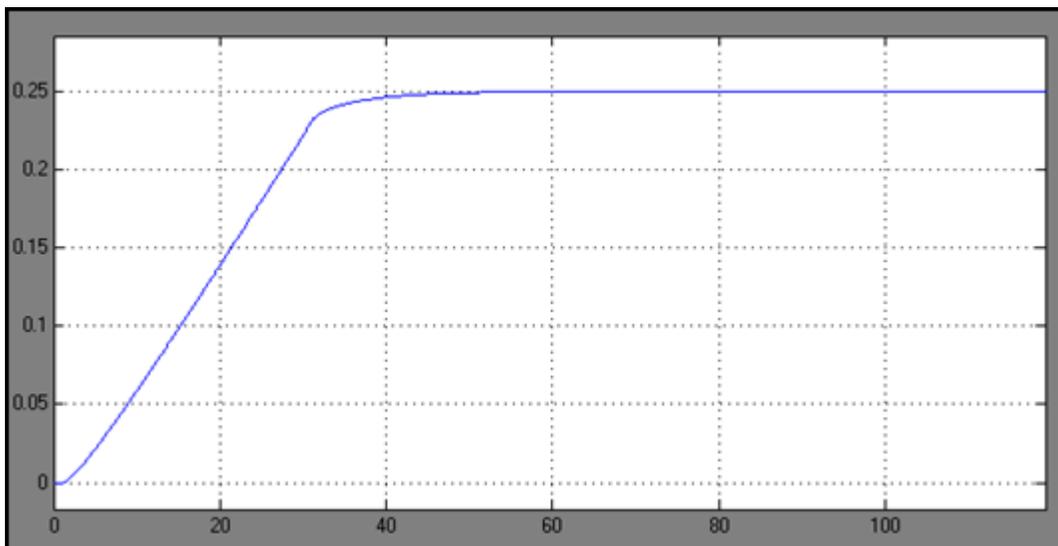


Figura 51 Variación de consigna con un escalón de 25 %

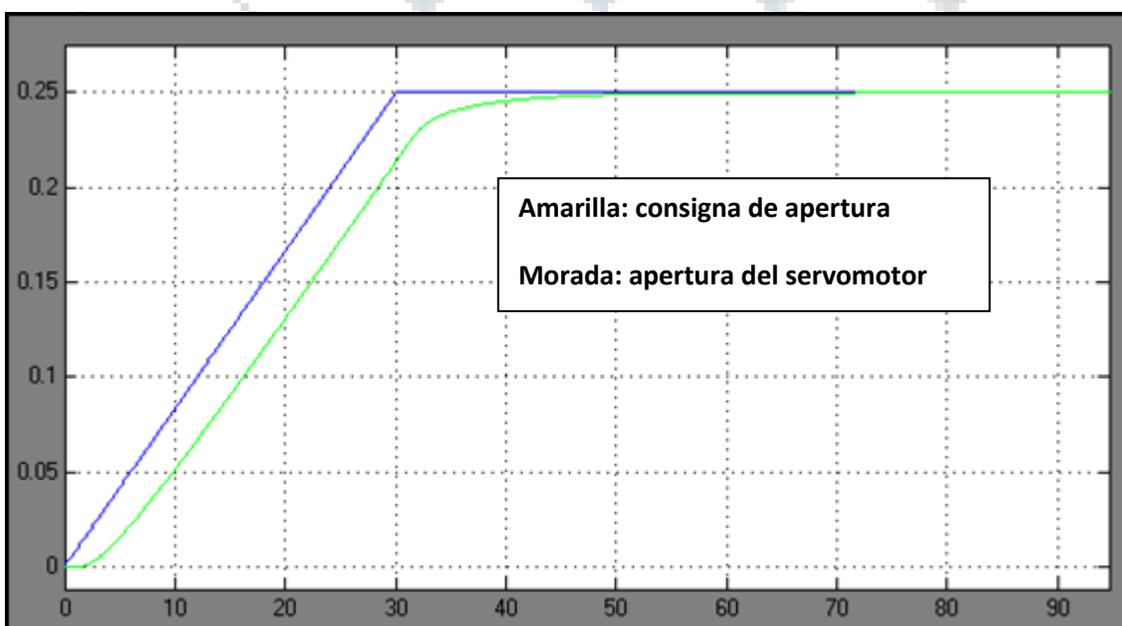


Figura 52 Regulación por apertura, variación del 25% (simulación)



6.1.9 Pruebas de estabilidad

El diagrama de bloques que resume el lazo de regulación de velocidad se mostró en la sección 1.2, en la Figura 6, a partir de este se obtuvo la función de transferencia de cada bloque.

En cuanto al regulador de velocidad se tiene

$$G_r = \frac{1}{BP} * \frac{(1 + sT1)(1 + sT2)}{(1 + sT3)(1 + sT4)}$$

Donde:

$$T1 = T_d$$

$$T2 = T_d * (1 + N)$$

$$T3 = T_d * (1 + BT/BP)$$

$$T4 = N$$

Los valores mencionados corresponden al regulador PID junto con la acción del estatismo permanente

La función equivalente es:

$$G_r = 3.6667 * \frac{(s + 0.1818)}{(s + 0.0333)}$$

La función del sistema copiador corresponde a la obtenida para el servomotor, la cual fue mostrada en la sección 5.2.5. La turbina y red hidráulica (tubería de alta presión) se obtuvo en la apartado 5.2.6 y la correspondiente a la inercia del generador se modela junto con el mismo en la 5.2.7.

A partir de lo anterior se obtiene una función de transferencia total de todo el sistema:

$$G_{Total} = -0.5774 * \frac{(s - 1.667) * (s + 0.2222) * (s + 22.22)}{s * (s + 3.333) * (s - 1.26) * (s + 0.1685) * (s + 19.9)}$$

Luego de realizar un análisis con la herramienta rtool de MATLAB es posible visualizar el lugar de las raíces y la respuesta al impulso del sistema completo donde se incluye como controlador a Gr y como planta a Gtotal, las siguientes figuras muestran los resultados obtenidos:

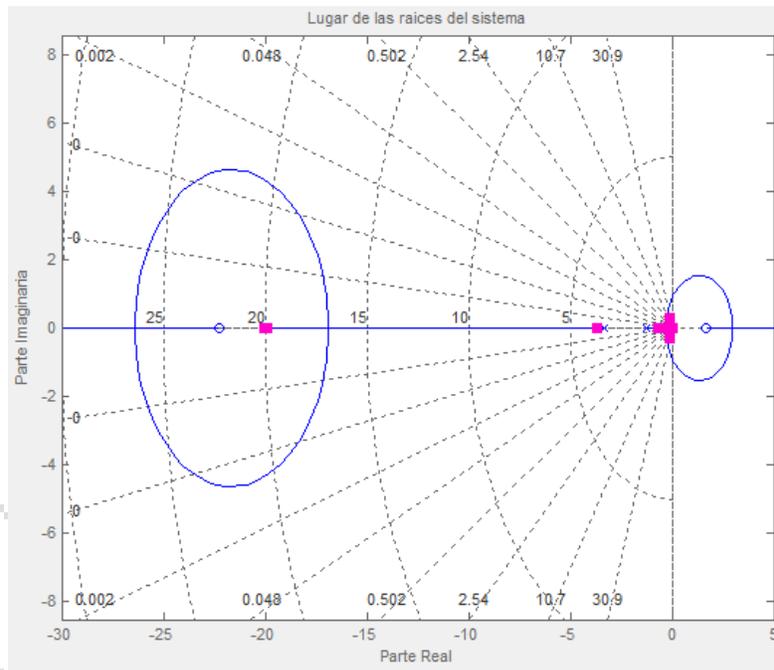


Figura 53 Lugar de las raíces del sistema con el controlador implementado

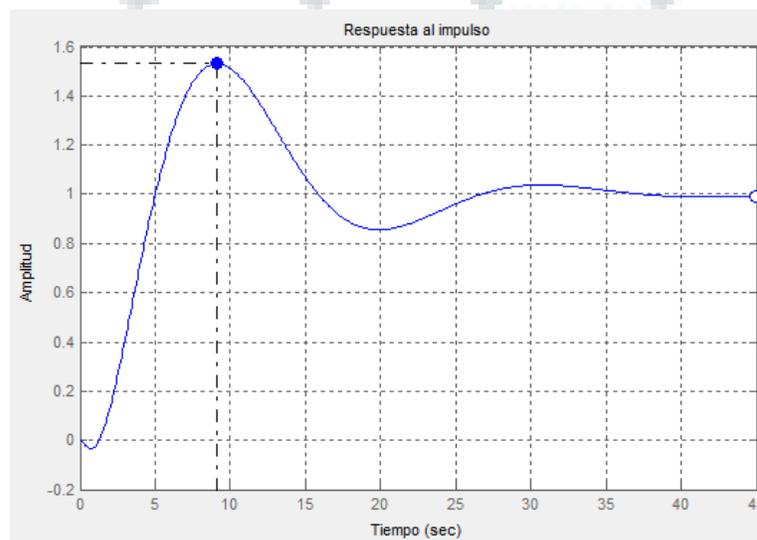


Figura 54 Respuesta del sistema ante un impulso con el controlador implementado



6.2 Análisis de resultados

Con la elaboración del presente proyecto se propuso como fin obtener el modelo matemático del lazo de regulador de velocidad de cada una de las turbinas, para ello se elaboró todo el consecuente desarrollo algebraico y numérico que contribuye a la obtención de cada una de las secciones que conforman este lazo, para ello se recabo toda la información proveniente de la planta, las principales características que presentaba, las turbinas y el generador, estas son mostradas en la Tabla 2 y Tabla 3 respectivamente, a partir de estos datos se puede calcular la constante hidráulica T_w y la constante de inercia H , cuyo cálculo se desarrolló en las secciones anteriores. Como Valores finales se obtienen:

$$T_w = 0.6 \text{ s}$$

$$H = 5.35 \text{ s}$$

Los valores antes citados son parte importante en el desarrollo del modelo, ya que determinan la estrecha relación entre la turbina y la tubería de presión en lo que respecta a la función de transferencia equivalente que se obtiene como modelo de estos dos componentes.

Con Respecto a H es la encargada de representar la inercia del sistema, donde se toma en cuenta la turbina y generador como un único grupo, este puede ser fácilmente observado en la Figura 35 donde se aprecia claramente el retardo que existe entre el comienzo de la apertura del distribuidor y el momento en que la máquina comienza a girar. El valor de T_w no es muy apreciable debido a que no forma parte de los parámetros directamente proporcionales del modelo, este es obtenido mediante la aproximación lineal del modelo.

A partir de la documentación proporcionada por ALSTON del regulador utilizado en estas turbinas y la investigación exhaustiva en internet se logró determinar parte del funcionamiento y modo de operación del NEYRPIC 1000 STD



Como Gobernador electrohidráulico, el NEYRPIC se encarga del control de velocidad de la máquina en la secuencia de arranque y regula también el proceso de generación ya sea por la variación de potencia o por la simple selección de una consigna que determine la apertura de los alabes de cada turbina.

Luego de una ardua investigación fue posible determinar el funcionamiento y secuencia de arranque de cada una de los grupos, así como la respectiva función de los valores de configuración del NEYRPIC, de los cuales hasta el momento no se conocía su función específica y a lo que equivale una variación de cada uno en el sistema, fue posible entender la secuencia de arranque de grupo y de todos los parámetros que podían ser programados en el mismo, a partir de la determinación de un modelo para el gobernador (NEYRPIC), donde se tuvo que implementar una representación matemática que pudiera representar las acciones realizadas por el regulador. La Tabla 4 muestra todos los valores de configuración del gobernador, estos corresponden a los parámetros configurables, que permiten modificar la secuencia de arranque y regulación de sistema, los restantes que no son configurables no son de mucha influencia en el funcionamiento del gobernador.

La Figura 34 muestra la secuencia de arranque típica y las variables que modifican esta curva en el arranque, para poder corroborar la secuencia se realizó la captura de información procedente del NEYRPIC en el proceso de arranque de cada una de las tres unidades, a partir de los datos obtenidos se crea la Figura 35, donde se muestra claramente las variables en juego en el proceso, es a partir de estos datos que se crea la Tabla 7, donde se muestran los valores programados y los que se pueden obtener experimentalmente de las curvas de cada unidad.

Cuando se observan los resultados obtenidos en la Tabla 7, se nota una variación en lo que respecta a los valores de apertura, esto se debe a que la señal observada experimentalmente es la posición del servomotor y la configurada en el regulador corresponde a una consigna en la apertura del distribuidor, no obstante al hacer una linealización de los valores obtenidos mediante las leyes de



interpolación las cuales se explicarán más adelante estos valores también difieren un poco de los programados.

Tanto en la Tabla 7 como en la Figura 35 se observa que las unidades 2 y 3 tienen un comportamiento muy similar, en lo que se refiere a la velocidad de la rampa que comienza a abrir el distribuidor, no obstante ambas presentan una característica interesante que es la entrada en funcionamiento del regulador de velocidad como tal, la cual se supone ocurre al 99.5% de la velocidad nominal de la máquina y en las unidades 2 y 3 este empieza antes del 90% de la velocidad, solo la máquina 1 se comporta según los parámetros de configuración en la secuencia de arranque y aceleración.

Una vez alcanzada la velocidad nominal se cierra el interruptor de grupo, antes de ese momento la máquina operaba en vacío y con un juego de parámetros, este es el juego de parámetros S2, hasta ese punto se puede observar que el regulador de velocidad funciona correctamente pues logra sincronizarse con la red, solo que se aprecia un pequeño sobre-impulso en la velocidad de grupo con respecto a la velocidad nominal deseada, que luego corrige hasta lograr la sincronía.

Cuando el interruptor se cierra se cambia el juego de parámetros del PID al conjunto S1, este juego está implementado para ejercer una regulación estática en el sistema y no en la parte transitoria donde se está acoplado a la red. El modelo implementado del gobernador consta de tres partes: el consignador, el regulador de carga/frecuencia y el posicionador, esto se puede observar en la Figura 23, en el régimen transitorio el regulador se caracteriza por comportarse como un PID, formado por dos bloques: el PD el cual se encarga de acelerar la máquina y el PI el cual junto con el estatismo permanente el modo acoplado contribuyen a regular el sistema carga-frecuencia.

Para determinar el comportamiento del sistema ante variaciones en la consigna ya sea regulando por potencia o por apertura se realizaron varias pruebas y se recolectó la información mediante el software STATUS, los resultados se muestran



en las gráficas que van desde la Figura 36 a la Figura 41. Con respecto a las gráficas donde se regula por potencia se observa un sobre-impulso en la señal, así como un pequeño error en estado estacionario.

Cuando se obtiene la función de transferencia del regulador (Ver Sección de estabilidad) y se realiza el análisis de estabilidad de todo el lazo de regulación de velocidad se nota que existen estos dos problemas: error en estado estacionario y sobre-impulsos, estos se pueden deber a la conversión en el lazo de 4 a 20mA con respecto a la consigna de potencia fijada desde es SCADA o al de la señal de potencia generada que le llega al NEYRPIC por otro lazo de 4 a 20mA. La Tabla 8 muestra algunos ejemplos de los valores medidos para diferentes consignas de potencia y potencia resultante. En esta tabla también se observa un leve error en cuanto a la conversión de valores. Aunado a esto si se analiza el sistema por separado del regulador, si bien este está linealizado, el sistema es estable y la incorporación del regulador de velocidad también lo afecta, debido a los valores programados en el regulador.

En las gráficas en donde la regulación es por potencia se puede observar como la señal de consigna carga frecuencia corresponde a la señal de la consigna de potencia deseada, además en el proceso para llegar a ese nuevo valor potencia el regulador no ve de inmediato la nueva consigna, lo que ve el regulador es una señal de rampa generada por el consignador, la pendiente de la rampa está determinada por el parámetro TCF, al obtener de forma experimental el valor de esta pendiente de rampa, se puede corroborar que es el equivalente al inverso de TCF (Ver sección 3.2.5). La Figura 55 muestra mejor un ejemplo de cómo un corrector digital funciona en estos casos:

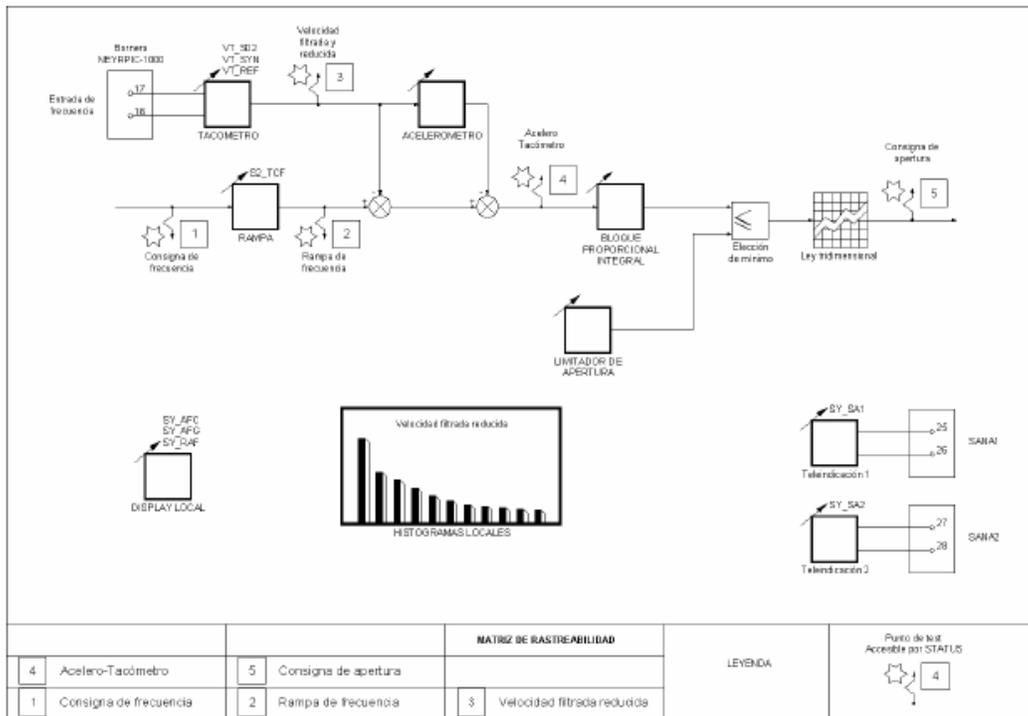


Figura 55 Ejemplo de un corrector digital

Fuente: Zamora, ver ref. [11]

En estas gráficas también se puede observar que en la unidad 2, la señal que corresponde a consigna de posición, sea esta apertura del distribuidor y del servomotor, presenta mucho ruido u oscilaciones, esto afecta el correcto funcionamiento del sistema de regulación.

Con respecto a la regulación con apertura se presentaron solo 2 figuras, donde se realizaron en la misma grafica varios cambios de consigna, la Figura 41 corresponde a variaciones en la unidad 2 y la Figura 42 corresponde a variaciones en la unidad 3. En la unidad 2 continúa el problema del ruido en lo que corresponde a la consigna de apertura en mayor grado, la consigna del servomotor por la ley de interpolación reduce un poco este ruido y si bien la señal de posición del servomotor no se muestra en esta figura, en experimentos anteriores se corrobora que la señal de posición del servomotor siempre sigue a la



señal de consigna del mismo, esto quiere decir que el regulador implementado para lo que es el lazo de posición del servomotor funciona correctamente, cabe destacar que el regulador implementado en el NEYRPIC no permite el ajuste de este lazo de regulación.

Se debe recordar que la consigna de apertura que se muestra en una de las señales, que permite mostrar el regulador, es diferente de la consigna del servomotor, cuando se regula por apertura se observa que existe un error muy grande entre la consigna fijada y la apertura real; este error se debe a la linealización que se tiene en las leyes de interpolación donde en ciertos tramos la linealización es muy semejante al valor real deseado y en otros esta se aleja bastante, además se observa que la conversión de la señal de 4 a 20mA realizada por el SCADA y la cual se muestra en el regulador como la señal carga-frecuencia cuando opera en apertura afecta la regulación, esto se puede observar en la Tabla 9 donde se tienen diferentes valores de consigna para la regulación por apertura. Aunado a esto se debe recordar que el ajuste que hace el SCADA en lo que respecta a regulación por apertura es debido a que inicialmente la máquina tiene un valor de consigna mínima de operación, lo que dificulta aún más la regulación por apertura al realizar un ajuste en la parte baja de la curva donde inicialmente se tiene un offset de la señal hasta llegar a la apertura máxima la cual corresponde al valor real.

En lo que respecta a las leyes de interpolación en cada uno de los reguladores se tiene incorporado 3 leyes: la de potencia, que establece una relación uno a uno, con respecto a la señal de entrada, la de limitación de apertura que su única función es no permitir dar una señal de apertura más allá del máximo establecido. La tercera ley es la más importante pues es la que permite relacionar la apertura del distribuidor con la carrera del servomotor, como ya se mencionó el regulador mediante 10 puntos programados en la ley permite linealizar por tramos la señal, en este caso apertura del distribuidor, lo que equivale a una respectiva posición del servomotor.



Experimentalmente se obtuvieron curvas de mejor ajuste para los puntos de la ley de interpolación de cada unidad, los resultados para cada unidad fueron mostrados en la Figura 43, Figura 44 y Figura 45. Para comprobar los valores de las ecuaciones obtenidos para cada unidad se procedió a aplicarle la ecuación de linearización a la consigna de apertura en cualquiera de los pruebas realizadas donde se mostrara también la consigna del servomotor o su posición, la Figura 46 incorpora una curva más que es la equivalente a la consigna del servomotor y es producto de una de las ecuaciones encontradas, por lo que se puede comprobar la ley de interpolación fijada por el regulador.

Aún con la ecuación de linearización para la consigna del servomotor, se deben corroborar los límites que esta tiene, ya que si presenta una aproximación bastante buena a la que realiza internamente el NEYRPIC, en ciertos tramos de la curva la aproximación se puede aproximar o alejar del valor real. Es por esto que se realizó una prueba donde se probaba la apertura del distribuidor, esta prueba tiene características especiales como por ejemplo: que la máquina estaba detenida y que se estaba operando en modo local, por lo que los valores de consigna corresponden a la conversión de la secuencia de pulsos que generan el aumento o disminución de una consigna mediante una rampa. La Tabla 11 muestra los resultados obtenidos en los diferentes puntos de medición, además las posiciones fueron fijadas hasta obtener los porcentajes de apertura en escalones de 25 %.

A partir de los valores de la tabla anteriormente mencionada se puede observar que el funcionamiento en modo local en lo equivalente a la regulación por apertura, los valores del lazo de corriente corresponden realmente al valor de la consigna dada al servomotor, ya que la señal sale directamente del consignador y va al posicionador (ver Figura 23), no interviene el bloque de regulación PI y estatismo permanente, donde en condiciones de operación la señal de consigna sería consigna carga-frecuencia., a la cual debe sumársele la apertura mínima de operación.



Con respecto a la simulación del modelo obtenido en MATLAB se mostraron algunas gráficas por ejemplo: el arranque de la unidad, dentro de las limitaciones del modelo está que fue obtenido mediante la linealización por lo que no se pueden hacer variaciones muy grandes en el mismo pues el modelo perdería validez, ya que se encuentra modelado en donde las variaciones pueden ser consideradas como lineales. En la Figura 47 se muestra el arranque de la unidad, no se puede realizar la secuencia de arranque como en el sistema real ya que las variaciones en la apertura no generaran la aceleración suficiente para poder arrancar la unidad, es por esto que se hace un arranque utilizando el regulador PID con los parámetros S2 donde la apertura se realiza con pequeñas variaciones en la consigna, al observar la gráfica, si bien el tiempo que toma en alcanzar la velocidad nominal es mucho mayor que el real, el comportamiento es el mismo si tomamos solo el área donde en forma real actúa el regulador, se observa un pequeño sobre-impulso el cual también se puede observar en los datos obtenidos de forma real.

Con respecto al servomotor, al tener un controlador PID para controlar la posición no existe mayor problema en el modelado, la Figura 48 muestra la respuesta del posicionador ante un impulso unitario el cual como se observa de forma experimental el porcentaje de error en la posición del servo es mínima, esto mismo es reflejado por el modelo.

La turbina junto con la tubería de presión expresan el comportamiento de un sistema de primer orden, en la Figura 49 se muestra el comportamiento de la misma frente a un escalón unitario, en esta gráfica se puede observar el comportamiento instantáneo de la turbina ante cambios bruscos en la apertura, en la misma se observa un pequeño sobre-impulso producto del escalón lo cual expresa la característica que relaciona la velocidad con respecto a la potencia generada en la turbina.

La Figura 51 muestra una variación de consigna de potencia en un 25% donde el sobre-impulso en la señal mostrada (potencia) es casi despreciable, esto se debe



a que la consigna de apertura se mantiene estable durante todo el proceso de regulación, es decir no presenta oscilaciones, cambia suavemente, lo que permite un mejor control del sistema. Con respecto al sistema real si bien no muestra un comportamiento muy similar, responde ante los cambios en la consigna de carga de la misma forma.

La Figura 52 muestra el comportamiento de todo el sistema frente a un cambio en la consigna de apertura cuando se está regulando de esta forma. Como era de esperar no se puede observar el error en estado estacionario que presenta el sistema real ya que al simularlo no se contempló el problema de la linealización del servomotor, cuando se presenta un cambio en la consigna por apertura, el grupo evoluciona lentamente hasta alcanzar la apertura requerida en el sistema.

La importancia de obtener el modelo matemático del lazo de regulación de velocidad de la planta está en que constituye una herramienta para poder determinar el comportamiento del sistema ante variaciones de carga en la red, inicialmente este trabajo se realizó considerando la red infinita donde las variaciones en frecuencia una vez acoplados a la red son mínimas.

En la sección 6.1.9 se hace un estudio de la estabilidad del sistema, se obtiene la función de transferencia completa del regulador y la respuesta de la planta (sistema posicionador, turbina y tubería de presión junto con el generador y la red) y su comportamiento con el regulador implementado hasta ahora en el NEYRPIC.

La Figura 53 muestra el lugar de las raíces del sistema con el controlador implementado y en la Figura 54 se muestra la respuesta al impulso de toda la planta. Al observar las figuras anteriores se puede explicar los resultados experimentales obtenidos con respecto a la regulación, donde se nota un sobre impulso cuya amplitud es de 1.58 y un tiempo de estabilización de más de 40 segundos. También se observa que todos los polos de la planta se encuentran del lado izquierdo del plano s , lo que demuestra que el sistema es estable, además se

observa que algunos de los polos se encuentran muy cerca del origen, esto muestra que el sistema se encuentra en los límites de estabilidad del sistema.

En la sección de recomendaciones se muestran las variaciones sugeridas al regulador, se varió la ubicación de los polos y ceros del regulador para así hacer más estable el sistema y corregir el error en estado estacionario mostrado y el sobre-impulso, la figura 56, mostrada a continuación; compara la respuesta ante un impulso de la planta en su funcionamiento actual y el funcionamiento que tendría una vez que se apliquen los ajustes necesarios.

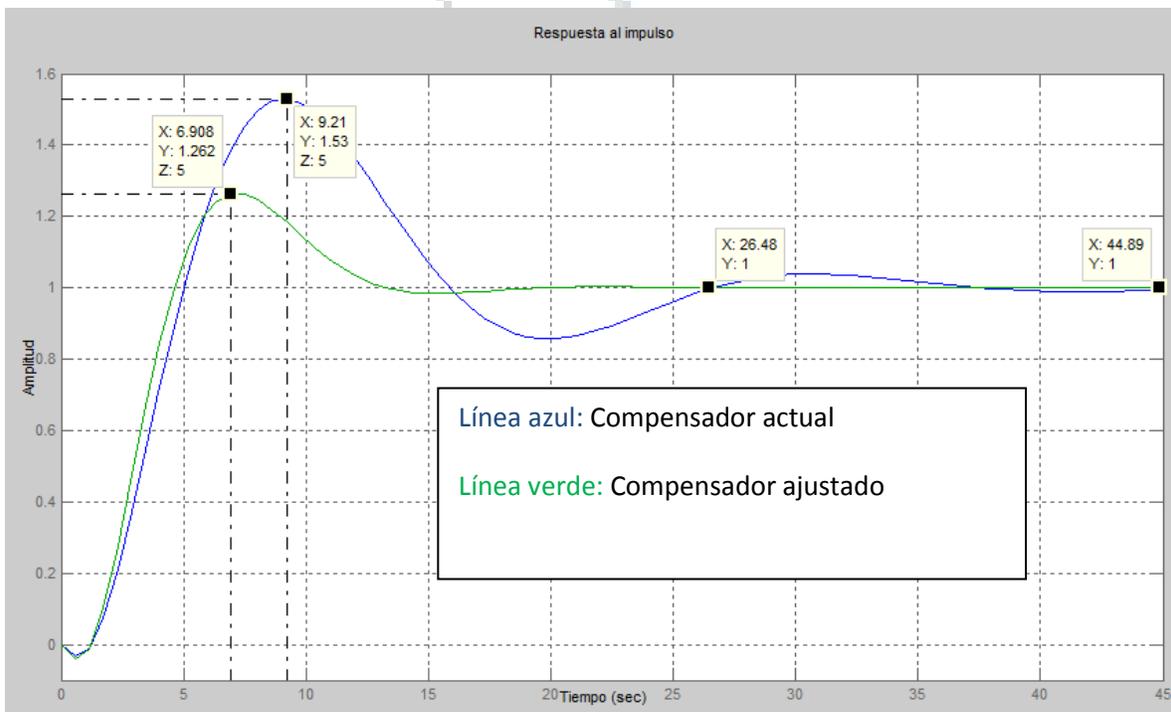


Figura 56 Respuesta al impulso unitario del sistema

Al observar esta gráfica se concluye que al aplicar los cambios propuestos en el regulador el sobre impulso disminuirá de 1.51 a 1.26 y el tiempo de estabilización de 45 segundos a 26.48 segundos, logrando así aumentar la eficiencia, contribuyendo a mejorar el funcionamiento integral de la Central Hidroeléctrica de “La Joya”.



Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

- El estatismo permanente se encarga de responder de manera fuerte ante variaciones en la carga cuando su valor es pequeño y responde más lentamente conforme este vaya aumentando.
- Para operar en el modo Isla es necesario acondicionar señales que en su forma de operación actual impiden este modo de operación.
- La carga inicial con la que se puede arrancar en Isla debe ser pequeña ya que de lo contrario el sistema no podrá arrancar.
- Existe un error en lo que respecta a la conversión de la señal de consigna en modo de regulación por apertura la cual se debe a errores en la linealización de la carrera del servomotor.
- El error en la regulación por apertura también se debe a un error en el ajuste en la conversión de corriente en la consigna ya que cuando inicia la regulación por apertura ya existe un valor mínimo de apertura para que el sistema pueda operar.
- El ruido o inestabilidad en las señales medidas por alguno de los sensores provoca errores en la regulación del sistema.
- La señal de posición del servomotor está limitada en su valor mínimo debido a ajustes manuales, esto para permitir la apertura máxima
- El error en la posición de apertura mínima del distribuidor provoca error en el sistema de regulación, tanto en apertura como en potencia.

7.2 Recomendaciones

7.2.1 Ajuste de parámetros

A partir de la información suministrada en [Digipid], es utilizando la función de transferencia de la turbina, donde se toma en cuenta las constantes H y T_w , estas constantes fueron calculadas al inicio del proyecto con respecto a las características propias de la planta. La determinación de los parámetros de regulación se lleva a cabo mediante el criterio de Nyquist, en el dominio de la frecuencia donde a partir del estudio de estabilidad realizado es posible ajustar los valores de los ceros y polos del sistema.

Primero se disminuye el sobre-impulso y el error en estado estacionario al determinar la región de convergencia del sistema, donde se toma como criterios tener un sobre-impulso no mayor al 5% y un tiempo de estabilización menor a 25s, el área sombreada en la Figura 57 , muestra el área para ubicar las raíces.

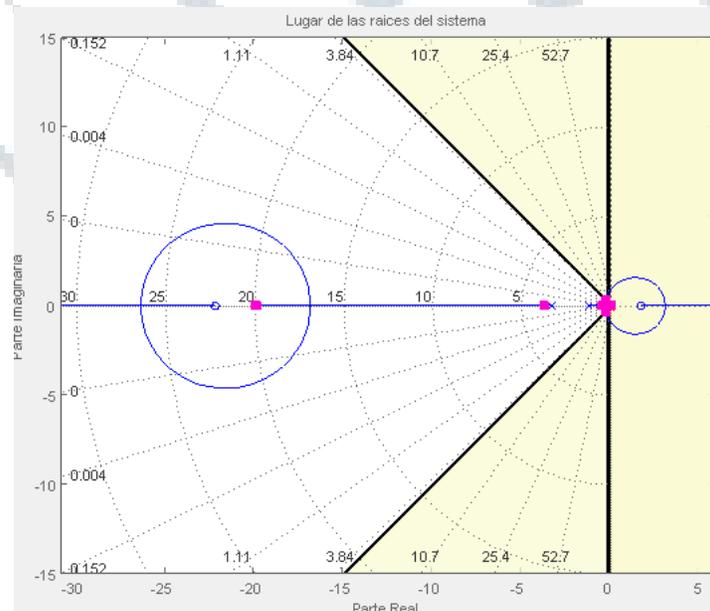


Figura 57 Lugar de las raíces del sistema con el regulador ajustado a nuevos parámetros

Luego de realizar los ajustes necesarios al controlador la respuesta al impulso junto con el diagrama de Niquist para determinar la estabilidad del sistema se muestran en la siguiente figura:

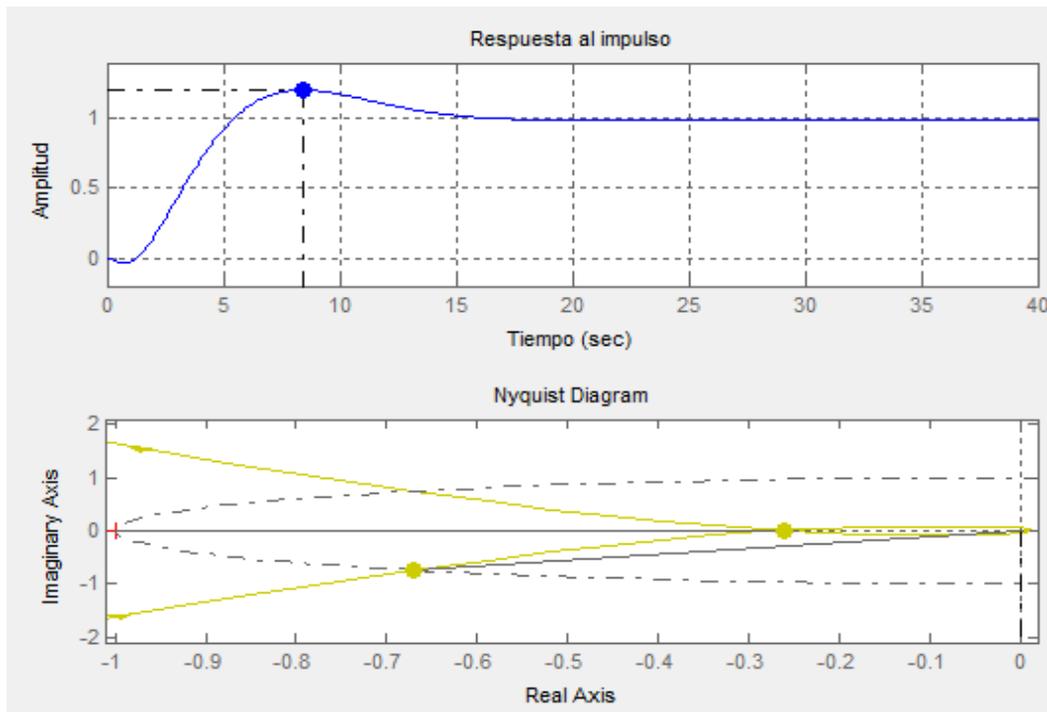


Figura 58 Criterio de estabilidad de Niquist y respuesta al impulso del regulador ajustado

Donde la función equivalente del regulador sería:

$$G_{r(mod)} = 5 * \frac{(s + 0.1)(s + 0.182)}{(s + 0.15)(s + 0.1)}$$

A partir de esta función y tomando en cuenta estos criterios de diseño es posible obtener cada uno de los valores del regulador a programar

a) Tiempo de la reacción transitoria (TD)

$$TD = 3 * Tw - 0.5 \tag{41}$$

Con Td en segundos (constante de tiempo de integración), válida si se cumple la condición que el tiempo de arranque hidráulico sea mayor que 0.5 segundos ($Tw > 0.5 \text{ seg.}$)

b) Tiempo de dosificación de la derivación (TN)

$$TN = 0.75 * Tw \tag{42}$$



Con T_n en segundos (constante de tiempo de la derivación).

c) *Estatismo transitorio velocidad/carrera (BT)*

$$bt = 1.5 * \frac{T_w}{T_a} \quad (43)$$

Con BT en valor por unidad o valor normalizado.

7.2.2 Funcionamiento modo Isla

A diferencia del arranque normal, la orden de marcha se aplica cuando el disyuntor del grupo (interruptor de la unidad generadora) ya está cerrado en una línea fuera de tensión. Desde el inicio del procedimiento, el juego de parámetros en cuestión es el de la marcha conectada, en el NEYRPIC 1000STD el juego de parámetros que intervienen en el modo Isla es el S3 (S3_BP, S3_BT, S3_N, S3_TN, S3_TD y S3_TCF).

Por lo general, los parámetros mencionados son el resultado de un estudio de estabilidad.

a) *Preparación*

Las condiciones requeridas en el momento del arranque son las siguientes:

- Entrada ETOR 6 pasa al nivel inferior (des excitación del relé R1), disyuntor cerrado.
- Entrada ETOR 0 pasa al nivel inferior (des excitación del relé R7), consigna de velocidad en modalidad +/- velocidad.

b) *Condición de arranque*

De conformidad con el arranque normal, el arranque del grupo se efectúa por la excitación del relé R0 (entrada ETOR 1 en estado superior), de la misma forma, el arranque se puede efectuar únicamente después de controlar la ausencia de fallos. Las operaciones de arranque y aceleración son similares a las del arranque normal.



Bibliografía

- [1] Aguayo, Paul S., Andrade, Sebastián S., Valdes Jaime S. **"Sistemas eléctricos de potencia: Estabilidad transitoria en generadores síncronos"**, Universidad de Chile, 2007
- [2] ALSTON **"PROYECTO HIDROELECTRICO LA JOYA: MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO"**, UNION FENOSA GENERADORA LA JOYA, Ed. 1, septiembre 2005
- [3] Arosemena, Carlos J. S. **"Simulación de una Central Hidroeléctrica en red aislada"** Material consultado en Internet en la página: http://www.caesoft.es/productos/edsa/formacion/sim_central_hidro_aislada.pdf
- [4] Ledesma, Pablo **"Regulación de frecuencia y potencia"** Universidad Carlos III de Madrid, Septiembre 2008
- [5] Lotto, V., Vago. P., etal. **"Central Hidroeléctrica San Mantaro (Perú) Pruebas Dinámicas para la regulación de Frecuencia"** RETE Transmissione & Distribuize, 2005
- [6] Martins, Adair, etal. **"MODELADO DE TURBINAS HIDRÁULICAS CON LA METODOLOGÍA DE BOND GRAPHS"** Departamento de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, 2006
- [7] Mejía, Luz A. C., MONROY Mauricio J., DÍAZ, Alexandra A., HENAO, Edison C. **"MODELADO Y SIMULACIÓN DEL CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR HIDRÁULICO"** Universidad Tecnológica de Pereira, Octubre, 2003
- [8] Mora, José E. etal. **"Aplicación de los sistemas de control en plantas hidroeléctricas"**. Monografía, Universidad de Costa Rica, San Jose, 2004
- [9] Rivera, Herson D.T. **"SISTEMAS DIGITALES DE CONTROL DE CARGA Y REGULACIÓN DE VELOCIDAD (DIGIPID), PARA LA ESTABILIDAD DE FRECUENCIA EN PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS"** Trabajo de graduación, Universidad de San Carlos de Guatemala, septiembre, 2006
- [10] Saavedra, Andrés J. Ramírez José M. Vásques H.P. **"Validación de modelos de los sistemas de control de generación para estudios de estabilidad de la central hidroeléctrica de Salvajina. Parte I Control de Velocidad"** Universidad del Valle, Grupo de Investigación en Control Industrial, 2003



- [11] Zamora, J.L. Rouco, L. Pangola, F.L. **“Ajuste de reguladores de turbinas hidráulicas con técnicas de estimación de parámetros”**, Instituto de Investigación Tecnológica, Universidad Pontificia Comillas, Madrid 2008

- [12] Zamora, J.L. Rouco, L. Pangola, F.L. **“Modelos de Centrales Hidroeléctricas Para Estudios De Estabilidad”**, Instituto de Investigación Tecnológica, Universidad Pontificia Comillas, Madrid 2007

- [13] Zenteno, Victor C. **“Sistemas de control automático de velocidad de generadores eléctricos de potencia”** Facultad de ingeniería de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos de Lima, Perú, 2000

- [14] http://www.uniovi.es/Areas/Mecanica.Fluidos/investigacion/_publicaciones/Libros/LibroSistemasdeBombeo/index.php?page=6. Material consultado Lunes 23 de Octubre del 2009 a las 3:20 p.m.

- [15] <http://www.wikipedia.com>. Pagina consultada el Miércoles 25 de Octubre del 2009 a las 9:00 a.m



Apéndices

A. 1 Glosario, abreviaturas y simbología

Disyuntor: Interruptor automático por corriente diferencial. Se emplea como dispositivo de protección contra los contactos indirectos, asociado a la puesta a tierra de las masas.

Estatismo permanente: Se define como la variación de velocidad entre una condición de plena carga y vacío, para el mismo ajuste del regulador de carga. Si existe una relación lineal entre las variaciones de frecuencia y la potencia, resultará este estatismo igual al efectivo en la banda de regulación.

Estatismo transitorio: Se define como la variación de velocidad entre una condición de plena carga y vacío al momento de cambiar el ajuste del regulador de carga.

Golpe de ariete: Se define como una fuerza dinámica adicional que se súper impone a la presión estática normal que existe en una tubería de conducción. Esta fuerza dinámica es el resultado de una transformación súbita de la energía cinética producida por la masa móvil del agua, en energía de presión. Esta transformación se produce generalmente por el cierre de algún artefacto instalado en la terminal de la línea, válvula, bomba, etc., creándose de inmediato una onda de presión que tiene cierta velocidad y que oscila de uno a otro extremo de la tubería de conducción.

Potencia activa: Es la potencia en que el proceso de transformación de la energía eléctrica se aprovecha como trabajo. Los diferentes dispositivos eléctricos existentes convierten la energía eléctrica en otras formas de energía, tales como: mecánica, lumínica, térmica, química, etc. Esta potencia es la realmente consumida por los circuitos.

Salto hidráulico o caída neta: Es la diferencia de niveles entre la cámara de carga y el canal de fuga a la salida del tubo de aspiración, es la energía que por kilogramo de agua se pone a disposición de la turbina.

Transductor: Dispositivo que, bajo la influencia de una variación de energía de una forma o en un sistema, produce una correspondiente variación de nivel de otra forma de energía o en otro sistema.



A. 2 Información sobre la empresa

La empresa Unión Fenosa es una empresa de origen español que en la actualidad opera en 14 países y tiene presencia en toda la cadena de valor del ciclo energético: energía hidroeléctrica, nuclear, térmica de carbón y de Fuel-Oil, además de ciclos combinados de Gas³.

Los negocios que respecta a energía eléctrica de UNION FENOSA en el ámbito internacional están agrupados en tres nodos: México, Colombia, Centroamérica y Otros. Estos últimos incluyen, por un lado, a Panamá, Guatemala, Nicaragua y República de Moldova, países en los que se desarrolla fundamentalmente la actividad de transporte y distribución de electricidad, y por otro, la República Dominicana, Kenia y Costa Rica, donde el negocio principal es el de generación de energía¹.

UNION FENOSA opera en Costa Rica la central hidráulica de La Joya, que tiene una potencia instalada de 50 MW. Esta central ha sido autorizada como un proyecto de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) por Naciones Unidas el 9 de marzo de 2007. Los proyectos MDL están previstos en el Protocolo de Kioto para limitar y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero¹.

La central de La Joya se encuentra ubicada en la provincia de Cartago, específicamente en el distrito de Tucurrique, a unos 60 kilómetros de San José, entró en operación en junio del 2006 y utiliza el agua del río Reventazón para mover 3 turbinas tipo Francis vertical, capaces de generar la potencia mencionada anteriormente. El control de los sistemas de toda la planta se lleva a cabo mediante dispositivos lógicos programables (PLC`s) y placas opto-acopladas encargadas de comunicar los sistemas de alta potencia con los de módulos de control. Para llevar a cabo el control de la producción y la comunicación con todos los dispositivos de campo que intervienen en la planta, se utiliza una aplicación de software diseñada especialmente para trabajar en estos ambientes y que permite la fácil interacción entre el hombre y la máquina, este es llamado Sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), que en español significa: Control supervisor y de adquisición de datos.

Las turbinas son las encargadas de convertir la energía cinética del agua en movimiento a energía mecánica proveniente del torque ejercido por el agua sobre la turbina, produciendo la rotación de su eje, la energía mecánica es transformada en energía eléctrica a través de los generadores⁴.

³ Toda la información recopilada de la empresa UNION FENOSA fue tomada de su página en Internet, ver [1]

⁴ Explicación tomada de libro de Quiroga, ver [2]



El funcionamiento de las turbinas está determinado por diversos parámetros, entre ellos: caudal, velocidad del agua, salto o caída, el momento de inercia entre otros factores, esta es una de las partes más importantes de una planta hidroeléctrica, pues es la encargada de regular la generación de electricidad y mantenerla constante. En las turbinas tipo Francis el control de este proceso se realiza por medio de la cantidad de agua que llega a la turbina⁵, esto se logra por medio de un sistema llamado gobernador.

El gobernador se encarga de determinar y ajustar la posición de los servomotores, los cuales a su vez hacen mover el distribuidor, el cual es el encargado de regular el paso de agua por la turbina, su posición es fijada por parámetros establecidos por los operarios de la planta.

Un gobernador es un dispositivo capaz de limitar el caudal de agua para llevar a cabo una función de regulación, esta puede ser para diferentes propósitos: regulación por velocidad y regulación por potencia⁶, ambas formas de regulación lo que buscan es buscar la estabilidad del sistema.

En el caso de la velocidad lo que se quiere es mantener la velocidad constante a partir de una consigna dada. Para la regulación por potencia la máquina es ajustada para que entregue cierta cantidad de potencia mecánica, la cual será convertida en energía eléctrica.

En el caso de La Joya, el sistema gobernador con el que se cuenta es un módulo electrónico digital el cual se encarga de controlar la posición del servomotor a partir de las variables de entrada que determinan su funcionamiento, estas son: consignas (potencia y apertura), potencia generada y posición real del servomotor.

Este sistema electrónico que cumple la función de gobernador es llamado comercialmente como NEYRPIC 1000STD y es proporcionado por la empresa francesa llamada ALSTON, la cual brinda muy poca información y soporte técnico de sus productos, por lo que no se cuenta con muchas especificaciones de funcionamiento o manipulación del equipo.

Para la planta hidroeléctrica La Joya es de vital importancia el correcto funcionamiento del regulador NEYRPIC ya que por medio de él se debe mantener invariante la velocidad de la turbina además de establecer la generación y regulación de la energía eléctrica producida por la planta.

⁵ Información tomada de los modelos actuales de centrales hidroeléctricas, ver [3]

⁶ Reguladores de turbinas hidráulicas, ver[4]