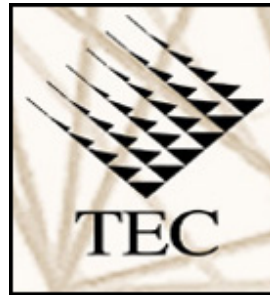


**Instituto Tecnológico de Costa Rica**

**Escuela de Ingeniería en Electrónica**



**Instituto Costarricense de Electricidad**

**(ICE)**

**“Diseño de un simulador para el gobernador de una planta hidroeléctrica en lenguaje LabView”**

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

**Luis Diego Bianchini Obando.**

**Cartago, Noviembre de 2002**

## RESUMEN

Este es un trabajo realizado por un estudiante de último nivel del Instituto Tecnológico de Costa Rica, en el Centro de Servicio de Investigación y Desarrollo (I+D) del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), con el objetivo principal de simular un gobernador de una planta hidroeléctrica en LabView para la instrucción de operadores.

Como parte de la metodología se realizó un diagrama de flujo que describe la lógica de control del gobernador, se seleccionó un modelo matemático de un gobernador con turbina Francis, validado en Matlab por el I+D, para ser tomado como base en el diseño e implementación del programa en LabView del gobernador. Finalmente se implementó un software en lenguaje escalera para un PLC Modicom, el cual realiza la interfaz externa de variables de interés del gobernador.

La conclusión más importante obtenida con la realización del este proyecto es resaltar la característica de LabView, como un lenguaje poderosa y versátil para el diseño de aplicaciones en ingeniería, incluyendo aquellas con requerimientos de simulación en tiempo real, pues LabView ofrece una gran cantidad de herramientas para tal propósito.

Éste proyecto constituye una primera etapa dentro del diseño del simulador de plantas hidroeléctricas y térmicas, que se encuentra en proceso de desarrollo en el C.S. Investigación y Desarrollo.

**Palabras clave:** LabView, Gobernador, Planta Hidroeléctrica, Simulador, ICE

## **ABSTRACT**

The feature work it's being realized by a last level student from the Technological Institute of Costa Rica, in the Research and development center of the National Institute of electricity (ICE). Its main objective it's to simulate a governor for a hydro electric plant based on LabView for the instruction of operators.

As part of the methodology, it was made a flux diagram which describes the control logic of the governor; in order to this, it was selected the mathematical model for a Francis turbine, validated on Matlab by the ICE to be taken as base for the design of the program on LabView for the governor.

Finally it was created a software package for a PLC Modicom, which serve as an external interface of variables of interest for the governor.

The main conclusion obtained from this project was to emphasize the Lab View, as a powerful a versatile tool on engineering applications, as well of the efficiency of their specialized packages for the simulations of processes on real time.

This project is the first part for the design of hydro electrical power plants that it's on development by the Research and development center of the National Institute of electricity.

**Keywords:** LabView, Governor, Hydro Electrical Plant, Simulator, ICE

## **DEDICATORIA**

Primero que todo, quiero dedicar mi proyecto de graduación a Dios, por darme fuerzas en los momentos más difíciles de toda mi carrera, y por darme sabiduría y entendimiento.

También se lo quiero dedicar a mi familia, por tener fe en mí, y por apoyarme durante esos años de estudio que tanto esfuerzo me costó. Éste proyecto es para ustedes...

Diego Bianchini

## **AGRADECIMINETO**

Quiero agradecer a todas las personas del departamento del Centro de Servicio de Investigación y desarrollo del ICE, que en algún momento me ayudaron en el desarrollo del proyecto, especialmente al Ing. Roberto Lizano, por su gran ayuda y paciencia. Gracias...

Diego Bianchini

## ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	10
1.1 Descripción de la empresa: .....	10
1.2 Definición del problema y su importancia .....	12
1.3 Objetivos .....	14
CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES .....	17
2.1 Estudio del problema a resolver.....	17
2.2 Requerimientos de la empresa .....	18
2.3 Solución propuesta. ....	18
CAPÍTULO 3 PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO.....	21
CAPÍTULO 4 DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE.....	24
CAPÍTULO 5 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE DEL SISTEMA.....	27
5.1 Definición de LabView .....	27
5.2 Composición de LabView .....	28
5.3 Ventajas de utilizar LabView.....	31
CAPÍTULO 6 MARCO TEÓRICO .....	33
6.1 Teoría general del gobernador en una planta hidroeléctrica.....	33
6.2 Estudio teórico de los modelos matemáticos del gobernador Genérico. ....	43
CAPÍTULO 7 ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	52
7.1 Explicación del diseño .....	52
7.1.1 Diagrama de flujo para el sistema de un gobernador.....	52
7.1.2 Modelo matemático del gobernador a simular .....	55
7.1.4 Programa prototipo en LabView; Simulador del gobernador.....	58
CAPÍTULO 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	62
Bibliografía .....	65
APÉNDICES Y ANEXOS.....	66

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Distribución física de los elementos que interactúan en el proyecto desarrollado. ....	19
Figura 4.1 Bloque de un sistema Quantum típico.....	24
Figura 6.1 Estatismo permanente de 5% .....	39
Figura 6.2 Esquema de un gobernador.....	40
Figura 6.3 Curva característica de regulación del gobernador.....	42
Figura 6.4 Modelo matemático del gobernador.....	45
Figura 6.5 Modelo matemático de una turbina .....	47
Figura 6.6 Diagrama funcional de un sistema eléctrico elemental .....	48
Figura 6.7 Función de transferencia de un sistema eléctrico elemental.....	49
Figura 7.1 Diagrama de flujo de un gobernador .....	53
Figura 7.2 Modelo matemático experimental del gobernador.....	55
Figura A1 interfaz del simulador del gobernador.....	67

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 6.1 Valores típicos de los parámetros de gobernador y turbina hidráulicos ...	50
Tabla 7.1 Entradas y salidas del sistema .....	54



**CAPÍTULO 1**  
**INTRODUCCIÓN**

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUCCIÓN**

---

#### **1.1 Descripción de la empresa:**

El Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) fue creado como institución autónoma en el año 1949, y fue concebido desde su origen como el ente rector y principal ejecutor del desarrollo y administración de la industria eléctrica nacional. En su ley constitutiva se expresa con claridad que tal desarrollo debe sustentarse en el aprovechamiento óptimo de los recursos naturales del país. También fue creada para satisfacer las necesidades y expectativas evolutivas de los clientes y la sociedad costarricense, mediante el suministro oportuno de servicios y aplicaciones de telecomunicaciones e información de calidad, a precios y tarifas competitivos, con la tecnología adecuada y el mejor recurso humano.

En el año 1993, el ICE realizó el 92.7% de la generación de electricidad, con el 92.8% de la capacidad instalada nacional. Maneja prácticamente el 100% del sistema de transmisión y distribuye electricidad al 39% de los consumidores directos totales del país. Otras empresas se dedican principalmente a la distribución, y algunas de ellas generan también electricidad. Con la creación del ICE, el país avanzó notablemente en el desarrollo del sector eléctrico, en la segunda mitad de este siglo. Asimismo, el servicio es confiable, de alta calidad, de cobertura nacional, sustentado en el uso racional de los recursos energéticos nacionales y soportado en políticas y planes de expansión a largo plazo.

En la actualidad el ICE es dirigido por el Ing. Pablo Cob, quien tiene la misión de mantener la empresa en propiedad del Estado, que sea competitiva y de clase mundial, líder en el mercado de las telecomunicaciones e información con la mejor tecnología y recurso humano (con más de 5000 empleados) al servicio del cliente y de la sociedad costarricense.

El proyecto se realizó en el Centro de Servicio de Investigación y Desarrollo, cuyo jefe de departamento es el Ing. Ronald Jiménez Valverde. En éste laboran 39 empleados de los cuales se encuentran ingenieros en: electrónica, informática, eléctricos, metalurgia, químicos, industriales, civiles y mecánicos, también se cuenta con técnicos en electrónica y en circuitos impresos.

Este departamento está conformado por diversos laboratorios: en primera instancia se cuenta con el Laboratorio de Corrosión, en el cual se realizan estudios y soluciones de problemas de corrosión en sistemas metalmecánicos, posteriormente se tiene el Laboratorio de Circuitos Impresos, en donde se desarrollan impresos de circuitos para utilizarlos en el campo de la ingeniería electrónica, y finalmente existe el Laboratorio de Simulación de Sistemas de Potencia, en el cual se investiga y se modelan sistemas de potencia en redes de mediana y alta tensión.

## **1.2 Definición del problema y su importancia**

El Centro de Servicio Investigación y Desarrollo se encuentra en proceso de implementar un simulador para operadores de Plantas Hidroeléctricas, estableciendo varias tareas de diseño para estudiantes universitarios relativos al uso de LabView, tales como simulación de módulos locales, interfaz de instructor, coordinación de tareas, etc. Esto se debe a que el ICE contaba hace varios años con un simulador de plantas hidroeléctricas de (fabricación israelita) para la instrucción de operadores, pero después de 8 años de operación este aboleció tecnológicamente, y resultó imposible localizar los respuestos.

A raíz de algunos de los apagones sufridos por el sistema eléctrico en los últimos años, se toma la decisión de restaurar este simulador. Sin embargo las ofertas por sistemas nuevos son muy costosas, y no existe interés por parte del fabricante original de modernizar este sistema. Se decidió diseñarlo, fabricarlo, configurarlo y ponerlo al servicio del área de entrenamiento, además tomar los gabinetes y armarios del simulador anterior, los que representan un ahorro importante y sobre estos establecer una primera versión de este nuevo simulador.

Este proyecto nació como una iniciativa del sector energía con el fin de solventar y mejorar los tiempos de las interrupciones del Sistema Nacional Interconectado, conformado por todas las plantas de generación y el cual se encuentra enlazado con el resto de Centroamérica. De allí que es necesario atacar el problema desde muchos frentes. Uno de ellos consiste en el diseño de submódulos de simulación, categoría en la que se ha asignado este proyecto.

El sistema brindará la oportunidad de entrenamiento a operadores de las diferentes centrales hidroeléctricas del ICE, ayuda a mejorar las habilidades en el proceso de arranque y paro de generadores en forma manual, la operación de una planta en condiciones estables, la operación y toma de decisiones en condiciones de contingencia, así como refrescar conocimientos en las nociones básicas de la operación de plantas tanto en forma aislada como en forma interconectada.

En este sentido el objetivo buscado para un estudiante universitario consistía en el desarrollo, prueba y validación de uno de los módulos del simulador, el cual está integrado con equipo de planta. El desarrollo se basa en LabView, y específicamente está orientado a analizar la capacidad de simulación de esta herramienta, así como la comunicación con el mundo exterior, mediante una interface con el protocolo Modbus de Modicom desde LabView hacia un PLC de campo.

El módulo específico que se diseñó es el de un gobernador de una planta hidroeléctrica, el cuál es un sistema mecánico que contiene algoritmos de control que varían los parámetros de salida dependiendo de las características de entrada del sistema. Este se encarga de regular la cantidad de agua que entra a las turbinas por medio de los álaves, de este modo se regula la velocidad del generador hidroeléctrico, para finalmente controlar la cantidad de potencia producida por el mismo.

La pretensión al llevar a cabo este proyecto es brindar una herramienta poderosa a los operadores de las plantas hidroeléctricas para su instrucción en este campo, y darle la oportunidad de mejorar sus destrezas para disminuir la probabilidad de cometer errores a la hora de operar una planta real. De ésta manera se ve disminuida la posibilidad de apagones en el país y el desperdicio de potencia. Por ende, este es un proyecto muy importante y novedoso ya que en la actualidad no existe ningún sistema que cumpla con este cometido.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Diseñar un simulador para el gobernador de una planta hidroeléctrica en LabView para el entrenamiento de instructores, comunicándose con el mundo exterior en protocolo MODBUS RTU vía puerto serie con un PLC Modicom de Quantum.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- a. Realizar un reporte que contenga información sobre el comportamiento general del gobernador en una planta hidroeléctrica.
  
- b. Desarrollar un diagrama de flujo que explique el funcionamiento del gobernador en la operación de una planta hidroeléctrica.
  
- c. Llevar a cabo un reporte sobre el estudio teórico de los modelos matemáticos del gobernador.
  
- d. Estudiar y escoger el modelo matemático del gobernador a simular, a partir de los modelos ya existentes en Matlab.
  
- e. Elaborar un programa experimental utilizando las herramientas de programación que ofrece LabView, para la familiarización con dicho programa.

- f.** Diseñar un programa final prototipo en LabView para la simulación de un gobernador de una planta hidroeléctrica a partir de los modelos matemáticos ya estudiados.
  
- g.** Crear un programa experimental para el aprendizaje y familiarización con el hardware, y las herramientas de programación del PLC Modicon.
  
- h.** Implementar un programa o en escalera para el PLC Modicon de la serie de automatización Quantum, que realice la interfaz externa de variables de interés del gobernador.
  
- i.** Agregar al programa final del simulador, la comunicación Modbus RTU implementada en LabView, para la interacción con el PLC.
  
- j.** Acoplar y realizar las pruebas finales de los programas en labView y PLC, para el proceso de "setting" o simulación real del gobernador.

## **CAPÍTULO 2**

### **ANTECEDENTES**



## **CAPÍTULO 2**

### **ANTECEDENTES**

---

#### **2.1 Estudio del problema a resolver**

El proyecto tiene un antecesor, el cual nació a finales de los años ochenta e inicios de los noventa. Fue la primera versión de un simulador para plantas hidroeléctricas, la cual fue comprada a una empresa Europea, y cumplía el objetivo de la capacitación general a operadores de plantas hidroeléctricas. Como se dijo en la sección 1.2 este obsolece dejando la necesidad de implementar una nueva versión que solvente las necesidades ya expuestas.

Para la realización de la nueva versión del simulador se contó con los siguientes proyectos antecesores:

- Como primera etapa se tiene en desarrollo un PLC distribuido, que se está construyendo a partir tecnología PIC y/o Atmel. Este PLC está en fase experimental y tiene la peculiaridad que se comunica en protocolo Modbus RTU.
- Además se contó con el Simulador de Sistemas de Potencia, el cual fue diseñado para la evaluación de la Red Nacional Interconectada y por ende aportó muchos detalles sobre el comportamiento de varios de los elementos que se requirió en este proyecto.
- Se dispuso con algoritmos de control para gobernadores diseñados en Matlab, los cuales se aprovecharon al máximo ya que representaban una base sólida para iniciar el nuevo simulador.

## **2.2 Requerimientos de la empresa**

El centro de Investigación y Desarrollo requería de un simulador de plantas hidroeléctricas prototipo, el cual debía ser implementado por medio de LabView.

Para el desarrollo de dicho simulador se debía tomar como base las unidades generadoras de la planta Arenal. Esto quiere decir que el simulador debía implementarse tomando en cuenta el tipo de gobernador y turbina que compone la planta arenal.

El compartimiento del simulador debía asemejarse lo máximo posible al comportamiento real de los gobernadores instalados en las plantas hidroeléctricas, por lo tanto el sistema debió correr en tiempo real y además debió comunicarse vía Modbus RTU con un PLC, el cual se utilizó para simular la carga de un sistema aislado.

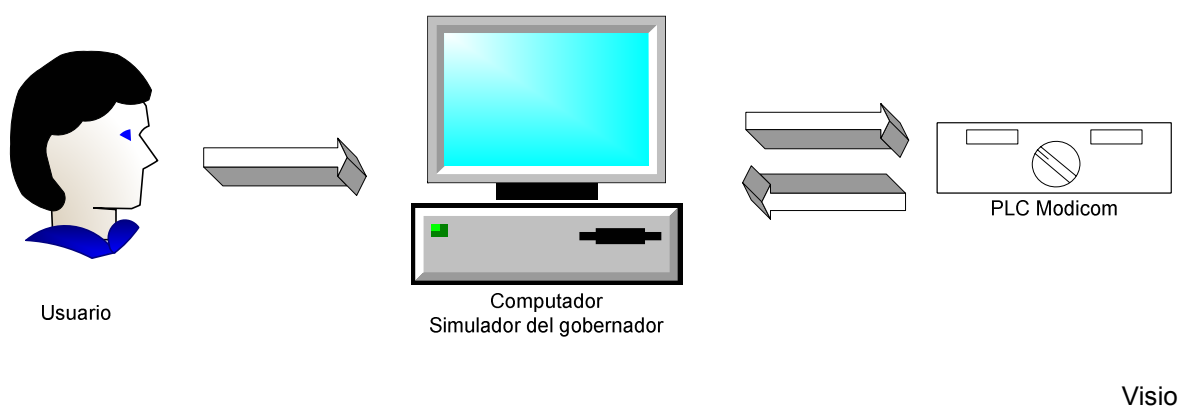
## **2.3 Solución propuesta.**

Como el proyecto ya tiene varios años de seguimiento y además representa un módulo de un simulador total de una planta hidroeléctrica, la solución ha sido propuesta en gran parte por el Centro de Servicio Investigación y Desarrollo del ICE.

Se tomó como referencia el modelo matemático de un gobernador genérico acoplado a una turbina Francis, el cuál ha sido validado en Matlab por el laboratorio de simulación de sistemas de potencia del ICE. Partiendo de dicho modelo, se implementó el simulador del gobernador en tiempo real en LabView, utilizando paquetes de programación especializados.

Para el proceso de “setting” o simulación de entradas del simulador, específicamente la simulación de la carga de un sistema eléctrico aislado, se utilizó un PLC Modicon, el cual contiene una tarjeta de comunicación Modbus.

A continuación se tiene un diagrama básico de cómo se solucionó el problema desde el punto de vista físico. Primero se tiene el instructor, el cuál se va a entrenar por medio del simulador, después se tiene el computador con sistema operativo Windows, que contiene el software (simulador), y por último se tiene el PLC que va a sondear la carga del sistema.



**Figura 2.1.** Distribución física de los elementos que interactúan en el proyecto desarrollado.

## **CAPÍTULO 3**

### **PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO**

## **CAPÍTULO 3**

### **PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO**

---

Antes de realizar el diseño y el modelado del sistema, se realizó en primera instancia una gira a las plantas hidroeléctricas de Arenal, Corobicí y Sandillal (complejo ARCOSA), con la idea de conocer el funcionamiento real de los gobernadores.

Posteriormente, utilizando los manuales brindados por el departamento, se desarrolló un reporte teórico sobre el gobernador (ver capítulo 6), en el cual se detalló todas las variables importantes que afectan su comportamiento, al igual que todas las partes que lo conforman. Además se especificó la respuesta dinámica y su reacción ante perturbaciones en la carga eléctrica.

A partir del reporte anterior, se diseñó un diagrama de flujo que resume el funcionamiento del gobernador (ver capítulo 7), en función de las variables de entrada y de salida.

Por otro lado se realizó un reporte de los modelos matemáticos del gobernador, turbinas genéricas y sistemas eléctricos elementales, apoyado en la bibliografía brindada (ver capítulo 6). Este incluye las ecuaciones necesarias para describir paso por paso el desarrollo de los modelos matemáticos, y el análisis sobre la regulación primaria del gobernador.

Se seleccionó uno de los modelos matemáticos validados en el laboratorio de simulación de sistemas de potencia de centro de investigación y desarrollo (ver capítulo 7).

Para la introducción al LabView se estudió el manual “User manual”, además se realizó un programa experimental en el cual se utilizaron las herramientas de alto nivel que dispone el este software.

Partiendo del modelo matemático seleccionado, y utilizando el paquete de software “PID control Toolset” que proporciona labView, se desarrolló el simulador del gobernador en tiempo real,

Se estudiaron los manuales del PLC Modiom, y los manuales de la tarjeta de comunicación Modbus. Posteriormente se desarrolló un programa, en el cual se almacenan los datos leídos en una entrada analógica del PLC.

Seguidamente se realizó un estudio del protocolo Modbus RTU por medio de su respectivo manual, con el objetivo de familiarizarse con este tipo de comunicación, para posteriormente implementar las funciones necesarias para desarrollar este protocolo en labView, para la interacción entre el simulador del gobernador y el PLC,

Finalmente se acoplaron los programas en labView y el PLC para realizar las pruebas de “setting”, o simulación real del gobernador.

# **CAPÍTULO 4**

## **DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE**

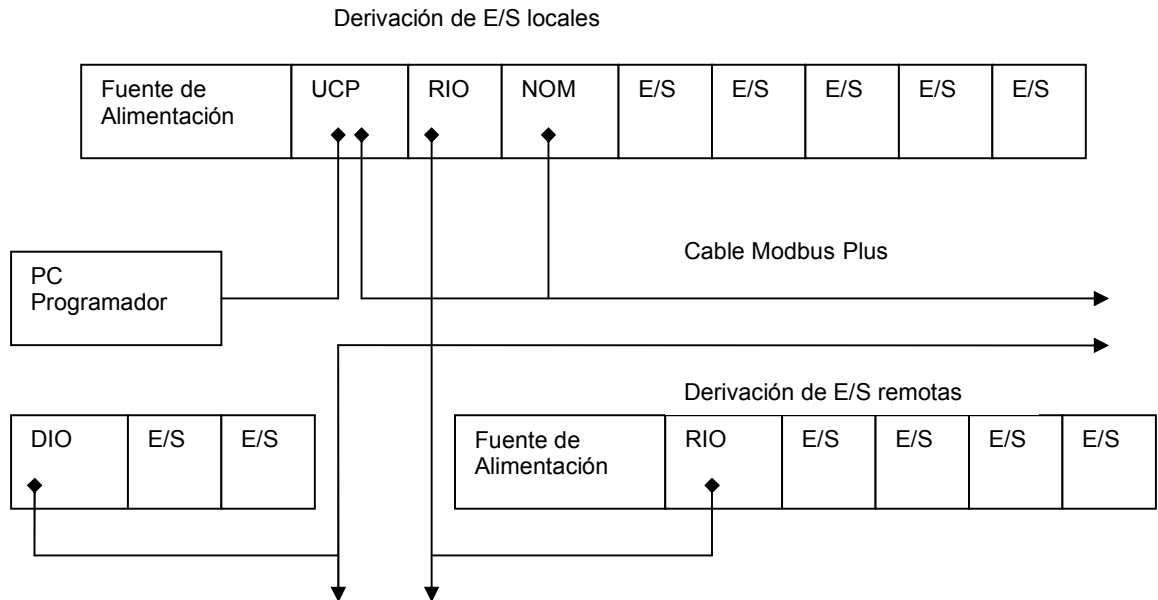
## CAPÍTULO 4

### DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE

---

Como se dijo en los capítulos anteriores se utilizó un PLC Modicon, de la serie de Quantum. Este es un sistema de computación de propósito especial con capacidades de procesamiento digital. El PLC Modicon está diseñado para realizar funciones de control en tiempo real a través de una arquitectura modular expansible en aplicaciones industriales. La serie de sistemas Modicon Quantum está compuesto por UCPs(Unidades centrales de procesamiento), módulos E/S (y E/S remotas), fuentes de alimentación y matriz de conectores.

La siguiente figura muestra un diagrama en bloques de un sistema Modicon Quantum típico:



Drawing de Word

**Figura 4.1** Bloque de un sistema Quantum típico



**a. UPC Quantum:**

Es un sistema eléctrico de operación digital que utiliza una memoria programable para el almacenamiento interno de instrucciones del usuario. Estas instrucciones se utilizan para ejecutar funciones específicas, permitiendo el control a través de las salidas digitales y analógicas, para diversos tipos de procesos.

**b. E/S de Quantum:**

Son conversores de señales eléctricas que transforman las señales hacia y desde los dispositivos de campo, a un nivel y formato de señal que pueda ser procesado por la UPC.

**c. Fuentes de alimentación Quantum:**

Se utilizan para el suministro de energía para todos los módulos insertados en la matriz de conectores, incluso los módulos de UPC, los módulos de interfaz y los módulos E/S.

**d. E/S remota (RIO) Quantum:**

Estos utilizan una configuración de red E/S basada en un S908, que comunica a través de un cableado coaxial simple o doble hasta una distancia de 4,573m.

**e. E/S distribuidas (DIO) de Quantum:**

Estos han sido diseñados específicamente para vincular módulos E/S con la cabecera a través de una red Modbus plus.

**f. Matrices de conectores Quantum:**

Las matrices de conectores Quantum pueden ser utilizadas en todos los sitios de E/S locales, remotas o distribuidas. Hay tres matrices de conectores disponibles en versiones de 2,4,6,10 y 16 alojamientos.

## **CAPÍTULO 5**

### **DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE DEL SISTEMA.**

## **CAPÍTULO 5**

### **DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE DEL SISTEMA**

---

#### **5.1 Definición de LabView**

LabView es un lenguaje de programación gráfica, que usa objetos visuales en lugar de líneas de texto para crear aplicaciones. En contraste con los lenguajes de programación tradicionales, donde las instrucciones determinan ejecuciones en el programa, LabView usa datos flotantes de programación, donde los datos determinan ejecuciones.

Una de las importancias que representa utilizar LabView, es que se encuentra integrado para comunicarse con hardware como: GPIB, VXI, PXI, RS-232, RS-485, y tarjetas de adquisición de datos. También tiene bibliotecas incorporadas para usarse en software standard tal como TCP/IP, networking y activX.

Dicho programa, facilita la creación de aplicaciones previamente compiladas que se pueden ejecutar a la velocidad necesaria para adquisición de datos, pruebas, mediciones, y soluciones de control.

LabView contiene bibliotecas para la adquisición de datos, su respectivo análisis y su representación. LabView también incluye las herramientas de desarrollo tradicional de programas: se puede utilizar breakpoints, animar programas de ejecución, y realizar pasos sencillos a través del programa para depurarlo.

LaView provee numerosos mecanismos para conectar código externo o software a través de DLLs, compartir librerías, ActiveX, y más.

## 5.2 Composición de LabView

Los programas de LabView son llamados instrumentos virtuales (VIs), porque en apariencia y en operación imitan instrumentos físicos, como osciloscopios y multímetros. Todo VI usa funciones que son manipuladas desde la interfaz de usuario o otras fuentes, y despliega la información o sus movimientos en otros archivos o otras computadoras.

Un VI contiene los siguientes tres componentes:

### a. Panel frontal:

Este componente es la interfaz de usuario del VI. Se puede construir el panel frontal con controles e indicadores, los cuales son terminales interactivas de entrada y salida de los VI. Se tienen controles como perillas, botoneras, interruptores y otros dispositivos de entrada. Se tienen indicadores como gráficos, LEDs, entre otros. Los controles simulan dispositivos de entrada y abastecen datos hacia el diagrama de bloque del VI. Por otro lado los indicadores simulan dispositivos de salida y despliegan los datos provenientes del diagrama de bloque.

### b. Diagrama de bloque:

Después de construir el panel frontal, se puede desarrollar el programa usando representaciones gráficas de funciones de control desde el panel de objetos. El diagrama de bloque contiene la fuente de código gráfico. Los objetos del panel frontal aparecen como terminales en el diagrama de bloque. Todo control o indicador contiene una terminal correspondiente en el diagrama de bloque. Adicionalmente el diagrama de bloques contiene funciones y estructuras que se pueden acceder desde las bibliotecas de LabView.

**c. Iconos y conectores:**

Los íconos identifican los VI. Los conectores se utilizan para enlazar entre si los VI. Un VI que se encuentra en otro VI, es llamado un subVI, éste es el equivalente a una subrutina en lenguaje de programación basado en texto.

LabView ofrece en los menús de herramientas, opciones necesarias para crear y editar el panel frontal y el diagrama de bloque. Labview proporciona tres tipos de menú:

**a. Menú de herramientas:**

El menú de herramientas se puede utilizar en el panel frontal y en el diagrama de bloques. Cada herramienta tiene un modo especial de operación para el cursor del mouse. Cuando se selecciona alguna herramienta, el ícono del cursor del mouse cambia por el ícono de la herramienta. Estas herramientas se utilizan para operar y modificar el panel frontal y el diagrama de bloques.

**b. Menú de controles:**

El menú de controles sólo se puede emplear en el panel frontal. Este contiene los controles e indicadores del panel frontal, los cuales se utilizan para crear la interfase del usuario.

**c. Menú de funciones:**

El menú de funciones sólo se puede emplear en el diagrama de bloque. Este contiene los objetos que se utilizan para programar los VI, como aritméticos, instrumentos de E/S y operaciones de adquisición de datos.

Otros términos importantes que se deben describir para un mejor entendimiento del lenguaje de programación de labView son:

**a. Terminales:**

Los terminales representan el tipo de dato de los controles e indicadores. Por ejemplo DBL, representa doble precisión. Por medio de los terminales los datos están entrando y saliendo del diagrama de bloques, para intercambiar información con el panel frontal. Si un dato es ingresado por medio de un control del panel frontal, éste entra a través de los terminales en el diagrama de bloque.

**b. Nodos:**

Los nodos son objetos en el diagrama de bloques, los cuales tienen entradas o salidas y operaciones cuando los VI se ejecutan. En analogía, son funciones, operaciones y subrutinas en los lenguajes basados en código texto.

**c. Enlaces:**

En el diagrama de bloques los datos se transfieren a través de los enlaces. Con los enlaces se conectan los terminales de los controles e indicadores con la sumatoria o resta de funciones. Cada enlace tiene una sola fuente de dato, pero éste se puede enlazar con todos los VI o funciones que puedan leer el dato. Los enlaces tienen diferentes colores y estilos, dependiendo del tipo de dato. Un enlace roto aparece como líneas punteadas

**d. Estructuras:**

Las estructuras son equivalentes gráficos de las sentencias clásicas como “while”, “if”, “for”, “cases”, de los programas basados en lenguaje de texto. Las estructuras se usan en el diagrama de bloque para repetir bloques de código y ejecutar código condicionalmente o en específico orden.

### **5.3 Ventajas de utilizar LabView**

LabView proporciona las herramientas para crear soluciones a sistemas científicas e ingenieriles. Este provee la flexibilidad y desempeño de un poderoso lenguaje de programación sin estar asociadas a dificultades ni complejidades.

LabView proporciona miles de formas eficientes y rápidas para programar instrumentación, adquisición de datos, y sistemas de control. Cuando se utiliza para diseñar, crear prototipos, realizar pruebas, e implementar sistemas de instrumentación, se puede reducir el tiempo de desempeño del sistema y aumentar la productividad por un factor de 4 a 10.

Por último LabView también proporciona los beneficios del soporte técnico de la National Instruments corporation.

## **CAPÍTULO 6**

### **MARCO TEÓRICO**



## CAPÍTULO 6

### MARCO TEÓRICO

---

#### 6.1 Teoría general del gobernador en una planta hidroeléctrica.

Conceptos teóricos importantes para poder entender el funcionamiento de los gobernadores:

##### Sistema de control:

Compara el valor efectivo de las variables de salida de una planta, con el valor deseado o referencia, determina la desviación o error actuante y produce una señal de control para reducir el error.

##### Ecuación de equilibrio:

La siguiente ecuación muestra el comportamiento de las potencias, en donde  $P_m$  es la potencia mecánica, y  $P_d$  es la potencia eléctrica. La diferencia de las dos potencias da como resultado el excedente de potencia, ya sea positivo o negativo. Si las dos potencias son iguales, el sistema se encuentra en equilibrio.

$$\Delta P_m - \Delta P_d = \text{Excedente de potencia} \quad (1)$$

##### Perturbación:

Es el desbalance entre la generación y carga o falla en el sistema. Puede ser una pérdida de generación ( $\Delta P_g$ ) o un cambio de carga ( $\Delta P_c$ ) o una combinación de ambos. Es el desequilibrio entre la potencia mecánica y la potencia eléctrica.

La siguiente ecuación muestra lo anterior.

$$\Delta P_d = \Delta P_g + \Delta P_c \quad (2)$$

#### Desviación de frecuencia:

Es la diferencia de frecuencia que hay entre la frecuencia de referencia y la frecuencia actual. Una desviación de frecuencia normal es de:  $\pm 0.02\text{Hz}$  (de  $59.98\text{Hz}$  a  $60.02\text{Hz}$ ), ya que la frecuencia del sistema es de  $60\text{Hz}$ .

#### Características de cargas:

La carga depende tanto del voltaje como de la frecuencia, pero depende mucho más de la frecuencia. Si la carga aumenta, disminuye la frecuencia del sistema. Si la frecuencia varía en un 1%, el desempeño de la carga varía en un 3%. Se puede decir que en un cambio de la potencia eléctrica, resultado de una perturbación, la carga conectada al sistema produce un cambio debido a su variación con la frecuencia. La siguiente ecuación muestra la relación que hay entre la carga (D) y la frecuencia (f):

$$D = \frac{\frac{\Delta P}{P_d}}{\frac{\Delta f}{f_0}} \quad (3)$$

Es importante mencionar que la relación carga-frecuencia ayuda a contrarrestar la desviación de frecuencia. Entre mayor sea la diferencia entre las magnitudes de la carga y la frecuencia menor va hacer la desviación de frecuencia

La ecuación siguiente muestra el cambio total de la potencia eléctrica en función de los cambios de la frecuencia debido a los efectos de la carga (D).

$$\Delta P_{d_T} = \Delta P_d + D * \Delta f \quad (4)$$

### Características de Inercia:

En un cuerpo físico, es la medida de su resistencia a la aceleración angular. Por ende se opone al cambio de velocidad o dirección de rotación en una turbina. Esta depende de la masa, diámetro y velocidad de rotación como se muestra en la siguiente ecuación.

$$H = \frac{2.31 * 10^{-10} * W * R^2}{S_n} \quad (5)$$

Donde:

W: peso del generador (libras)

R: radio de giro (pies)

S<sub>n</sub>: potencia nominal (MVA)

La inercia ayuda a mantener la frecuencia constante. El cambio de frecuencia para obtener la energía necesaria dependerá de la constante de inercia, si la inercia es grande se tendrá desviaciones menores de frecuencia.

Hay dos formas de incrementar la inercia en una turbina: Una es aumentar el flujo de agua, y la otra es disminuir la carga.

### Características de regulación:

Se puede interpretar como un coeficiente de sensibilidad llamado estatismo permanente (R), que relaciona los cambios de potencia con la variación de la frecuencia. A medida que se tiene un valor de R más pequeño, se tendrá una mayor ganancia y una sensibilidad más alta a los cambios de frecuencia.

### Constantes de tiempo:

Las constantes de tiempo de los mecanismos de gobernación de la velocidad y de la turbina modifican considerablemente la respuesta dinámica de la frecuencia. A medida que incrementan las constantes de tiempo, la respuesta es más oscilatoria y se dan cambios mayores en la frecuencia.

### Ecuaciones de estado estable:

El cambio de frecuencia en estado estable (después de perturbación) se puede ver en la siguiente ecuación:

$$\Delta f_{ee} = \frac{-\Delta P_m}{\left(\frac{1}{R}\right)} \quad (6)$$

De lo anterior se observa que a medida que R es más pequeño, el error en estado estable es más pequeño.

El disturbio de potencia en términos de la frecuencia estable se manifiesta por medio de la siguiente ecuación:

$$\Delta P_d = -\left(\frac{1}{R}\right) * \Delta f_{ee} - D * \Delta f_{ee} \quad (7)$$

Esta quiere decir que el disturbio es igual al cambio de potencia generada menos el cambio de carga. En otras palabras el disturbio se contrarresta por un cambio en la potencia generada.

### La función de un gobernador:

Se utiliza para controlar la velocidad del eje que hay entre la turbina y el generador. Su función es mantener constante la velocidad del rotor, y asegurar por ende una frecuencia constante.

Al ocurrir un disturbio, se perturba el equilibrio entre la potencia eléctrica que se suministra a la carga y la potencia mecánica que produce la turbina. El resultado es una desviación de la frecuencia alrededor de su valor nominal. Esta variación la detecta el gobernador de velocidad, y como resultado, se produce un cambio de posición en las válvulas de admisión de la turbina. Esta acción finalmente producirá un cambio en la producción de potencia mecánica, tratando de lograr el equilibrio entre potencias mostrado por la ecuación 1. La rapidez en que cambia la frecuencia (velocidad del generador) dependerá de la magnitud del disturbio y de la inercia de la maquina (H).

La ecuación siguiente representa la dinámica del generador y evalúa la razón de cambio de la frecuencia.

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{\Delta P_m - \Delta P_d}{2 * H} \quad (8)$$

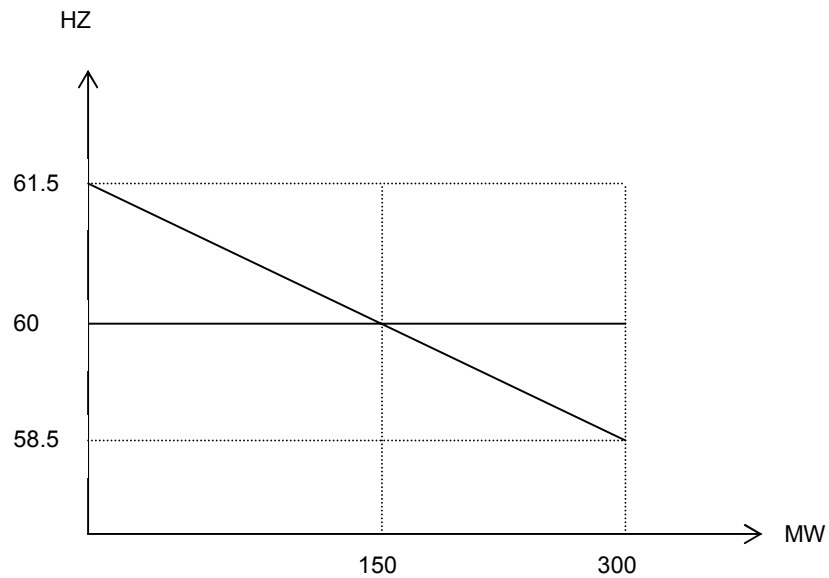
El cambio inicial de la frecuencia dependerá solo de la potencia eléctrica, ya que el cambio en la potencia mecánica es cero.

En términos genéricos y de acuerdo con los requerimientos del control de velocidad en centrales eléctricas se puede decir que el gobernador esta compuesto por los elementos siguientes:

- a. Fuente de alimentación: Se encarga de la alimentación de los circuitos eléctricos. Es un generador de imanes permanentes (GIP). Este se encuentra acoplado al eje de la turbina y produce un voltaje alterno a una frecuencia igual a la velocidad de esta.
- b. Detector de velocidad: Toma la señal de GIP, y se encarga de generar una corriente directa proporcional a la velocidad de la turbina.

- c. Referencia de velocidad: Se conoce como 65F y su función es definir el nivel de frecuencia de la unidad.
- d. Ajustador de velocidad: En conjunto con la referencia de velocidad y la velocidad detectada se obtiene la señal de desviación o error.
- e. Control de velocidad: Utilizando la señal de error o desviación de velocidad, regresa la velocidad de la turbina a el valor de referencia. Esto lo hace por medio de un regulador PID el cual esta compuesto por tres canales: proporcional, integral y derivativo.
- f. Ajustador de potencia: Define la potencia que entrega el generador a la red.
- g. Control de potencia: Define la característica de velocidad o potencia-frecuencia del generador, a esto se le conoce como estatismo permanente. Es recomendado que el gobernador maneje un estatismo de un 3% o un 5% La regulación de potencia se realiza con base a la posición del servomotor auxiliar, la cual representa la potencia mecánica del generador, y es comparada con la potencia de referencia para obtener el error y corregirlo. Dicho control se realiza por medio de un regulador PI.

En la figura siguiente se muestra la curva característica del estatismo permanente de 5%.



Drawing de Word

**Figura 6.1** Estatismo permanente de 5%

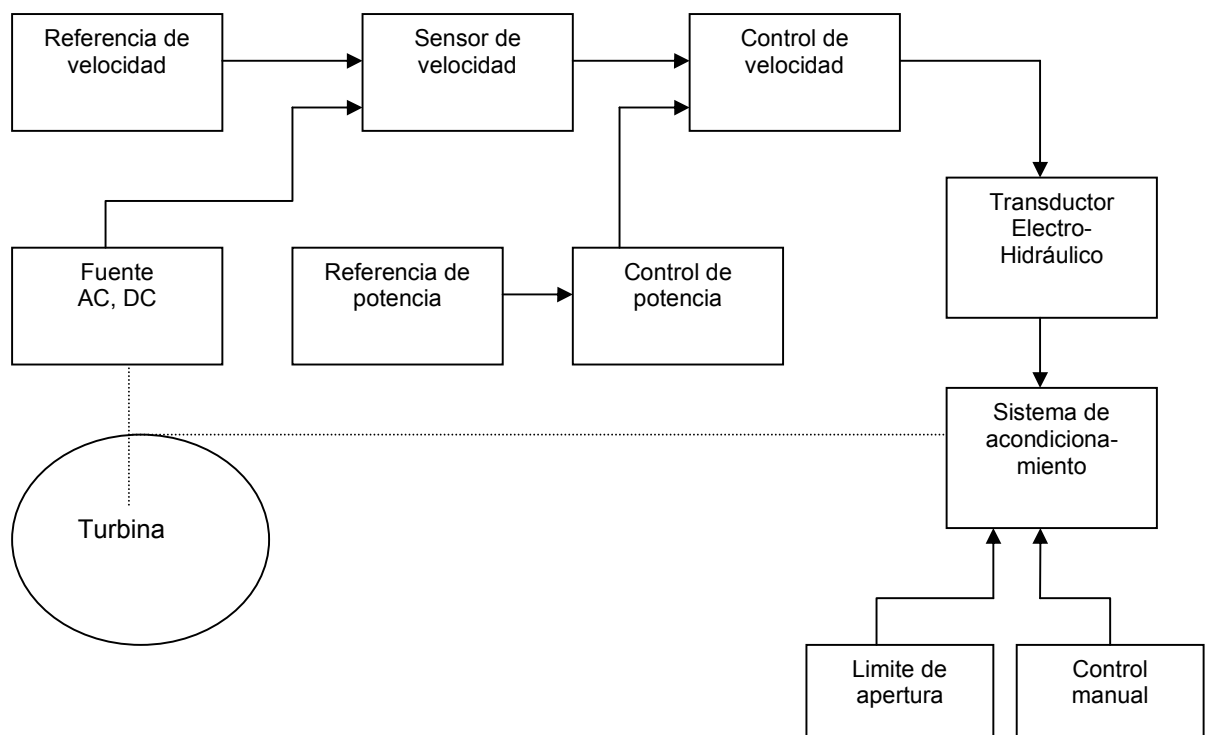
De la figura anterior se puede denotar que si la frecuencia incrementa, el gobernador debe reducir la potencia de salida del generador, para estabilizar la frecuencia al valor de referencia. Por otro lado si la frecuencia decrece el gobernador aumenta la potencia de salida del generador, para estabilizar de nuevo la frecuencia

- h. Control manual: Este permite maniobrar el sistema de accionamiento, principalmente con propósitos de inspección sin intervención del control eléctrico del gobernador.
- i. Servomecanismo de accionamiento: Toman la señal electrónica de control del gobernador y generan los movimientos necesarios para corregir la posición del

equipo de admisión (álabes), y así corregir la velocidad o potencia del generador. Para esto se utiliza un regulador PD.

- j. Limites de apertura de admisión de agua: la función es vigilar la acción del gobernador para no sobrepasar ciertos límites y evitar daños en algunas de sus partes.

En la siguiente figura se muestra un esquema típico de la distribución de los elementos anteriores:



Visio

**Figura 6.2** Esquema de un gobernador



### Respuesta Dinámica de un gobernador:

Durante una perturbación la potencia eléctrica se modifica y se produce un desequilibrio electromagnético en las unidades, produciéndose un cambio en la velocidad de la máquina. Esta condición hace reaccionar al gobernador para modificar la potencia mecánica y establecer el equilibrio electromecánico en el sistema. Durante este periodo se genera una condición oscilatoria inestable, que depende del tipo de respuesta del gobernador (parámetros). El gobernador debe ser capaz de mantener la frecuencia del sistema en un valor preestablecido, además de experimentar una respuesta estable durante alguna perturbación.

Los parámetros que intervienen en el comportamiento de la respuesta de velocidad de una máquina son, la inercia del generador y la inercia del agua.

Por ejemplo, se puede mencionar que en un sistema con gran inercia, la velocidad o frecuencia del sistema tiende a ser más constante que en un sistema de baja inercia, como se observa en la ecuación 8 denominada ecuación de oscilación de la máquina.

Como el esfuerzo económico es bastante grande para lograr una constante de inercia mecánica elevada, se trata de lograr ese efecto a través del ajuste de los parámetros del gobernador de velocidad.

Con respecto a la constante de aceleración del agua  $T_w$ , se puede mencionar que conforme crece, se pierde la capacidad de regulación de la unidad por problemas en el sistema hidráulico. Esta condición se puede representar en la siguiente ecuación:

$$T_w = \frac{Q}{g \cdot h} * \frac{L}{A} \quad (9)$$

Donde:

$g$  aceleración de la gravedad.

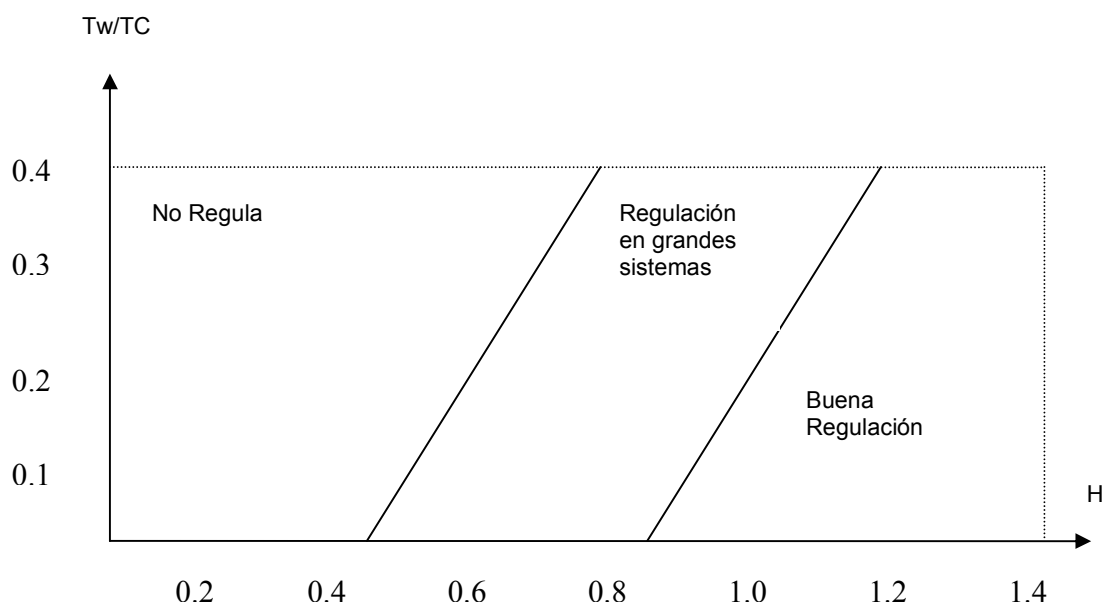
$h$  caída neta.

$Q$  flujo de agua en la turbina.

$L, A$  longitud y área transversal de la turbina de presión.

De la ecuación anterior se puede apreciar que al aumentar la longitud de la tubería principal aumenta el  $T_w$ .

En la siguiente figura se muestra una curva característica de las posibilidades de regulación de una unidad respecto a sus parámetros de  $H$  y  $T_w$ .



Drawing de Word

**Figura 6.3** Curva característica de regulación del gobernador

En la figura anterior se puede apreciar que se tiene muy buena regulación en sistemas de alta inercia y una baja constante de aceleración del agua. Por el contrario, se obtiene mala regulación en sistemas con poca inercia y una alta constante de aceleración del agua.

## 6.2 Estudio teórico de los modelos matemáticos del gobernador Genérico.

En esta sección se va a estudiar los modelos matemáticos teóricos del gobernador, turbina y sistema eléctrico elemental.

### Gobernador:

El primer elemento a considerar es el detector de velocidad, en este caso existe un péndulo a través del cual la velocidad de la turbina se traduce en un desplazamiento de la válvula piloto. El giro del péndulo produce una fuerza nominal proporcional al cuadrado de la velocidad angular:

$$F_n = K_w \omega^2 \quad (10)$$

A partir de la ecuación anterior, el desplazamiento de la válvula piloto respecto a la velocidad estará definida por:

$$\Delta X = K \Delta \omega \quad (11)$$

El desplazamiento de la válvula producido por la velocidad de referencia esta definida por:

$$\Delta X_{ref} = K_4 \Delta \omega_{ref} \quad (12)$$

La conexión mecánica entre la válvula piloto y el servomotor produce un desplazamiento proporcional entre los dos elementos:

$$\Delta X = K_3 \Delta \omega \quad (13)$$

El movimiento de la válvula piloto está definido por las tres condiciones analizadas, cambio de velocidad, cambio en velocidad de referencia y moviendo del servomotor, actuando según la relación siguiente:

$$\Delta X = K4\Delta 4_{ref} - K3\Delta 3 - K\Delta\Delta \quad (14)$$

Para aplicar una ecuación de transferencia se debe utilizar un modelo donde se muestre la turbina y el modelo mecánico del generador. La función de transferencia  $G(s)$ , se refiere al modelo de la turbina. La función de transferencia de velocidad es:

$$\Delta W(s) = \frac{\Delta w_{ref} K4G(s) - K3(1 + sTg)\Delta P}{KG(s) + K3Js(1 + sTg)} \quad (15)$$

Para obtener el modelo del generador se tiene que evaluar las siguientes condiciones:

- a. Se tiene que aplicar un escalón unitario en  $\Delta w_{ref}$  y evaluar el límite de del valor final.

$$\lim_{S \rightarrow 0} \Delta w = K4/K \cong 1 \quad (16)$$

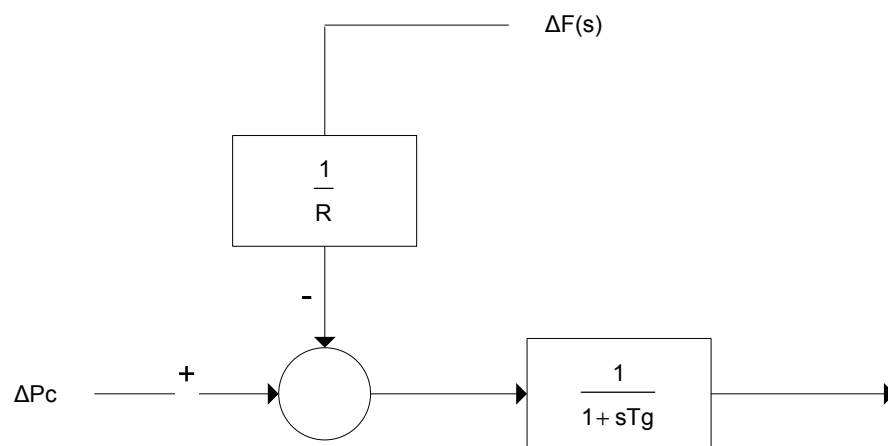
- b. Se debe obtener una potencia mecánica de 1 p.u al generarse una señal de error de 1 p.u

$$\lim_{S \rightarrow 0} \left[ \frac{\Delta P_v(s)}{e(s)} \right] = G(0)/K3 \cong 1 \quad (17)$$

- c. La regulación del sistema se define como el cambio de la velocidad al modificarse la potencia generada.

$$\lim_{S \rightarrow 0} \Delta \text{im} \Delta W = -K_3 / KG(0) = 1/K = R \quad (18)$$

De acuerdo con las características analizadas, el modelado matemático para un sistema de gobernanación de velocidad elemental se representa por la siguiente figura:



Visio

**Figura 6.4** Modelo matemático del gobernador

Donde:

R: Característica de regulación de velocidad de estado estable (estatismo permanente).

Tg: Constante de tiempo del gobernador.

Pc: Potencia en la carga

F: Frecuencia.

Como se puede ver en lazo anterior se tiene como entrada los cambios en la carga, y el porcentaje de estatismo permanente. Y como salida se tiene el cambio de posición de la válvula o compuerta.

### Turbinas:

La salida del sistema del gobernador será a su vez la señal de entrada de la turbina. La salida de la turbina se realiza mediante un cambio en la potencia mecánica.

Se puede considerar un modelo de la turbina hidráulica con la siguiente estructura en el dominio de la frecuencia:

$$Pm(s) = \left[ \frac{1 - sT_w}{1 + \frac{1}{2}sT_w} \right] \Delta X_E \quad (19)$$

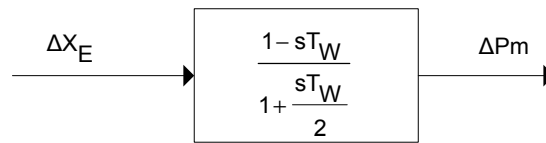
en donde:

$\Delta X_E$  : Abertura de compuertas álabes.

$T_w$ : Constante de aceleración del agua.

$Pm$ : Potencia mecánica

El modelo que representa esta relación se puede ver en la siguiente figura.



Visio

**Figura 6.5** Modelo matemático de una turbina

Sistema eléctrico elemental:

Una vez obtenido los modelos para los componentes individuales, estos se pueden interconectar para formar un sistema eléctrico elemental, formando por una máquina (turbina-generador), el gobernador, la carga y la perturbación. Dicho modelo se puede obtener a partir de la ecuación de equilibrio para cambios de incrementos de potencia:

$$\Delta P_m - \Delta P_d = \frac{dW}{dt} + D * \Delta f \quad (20)$$

Donde:

Pd: potencia eléctrica

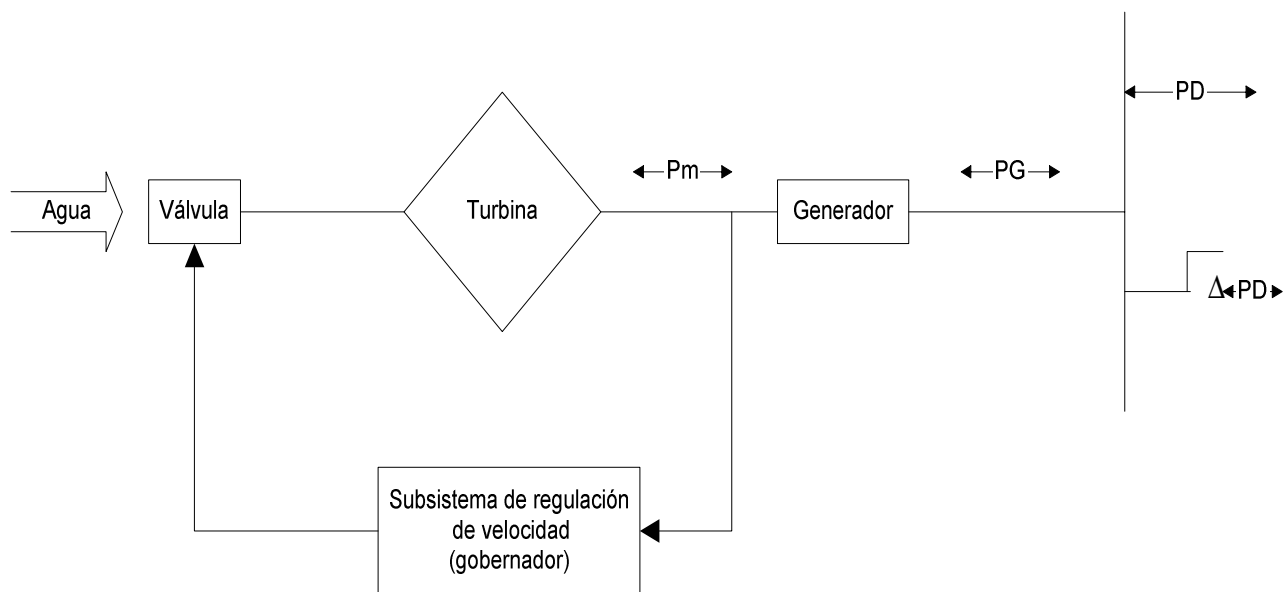
Pm: potencia mecánica

W: perturbación

D: carga

F: frecuencia

En la siguiente figura se muestra un diagrama funcional de un sistema eléctrico elemental:

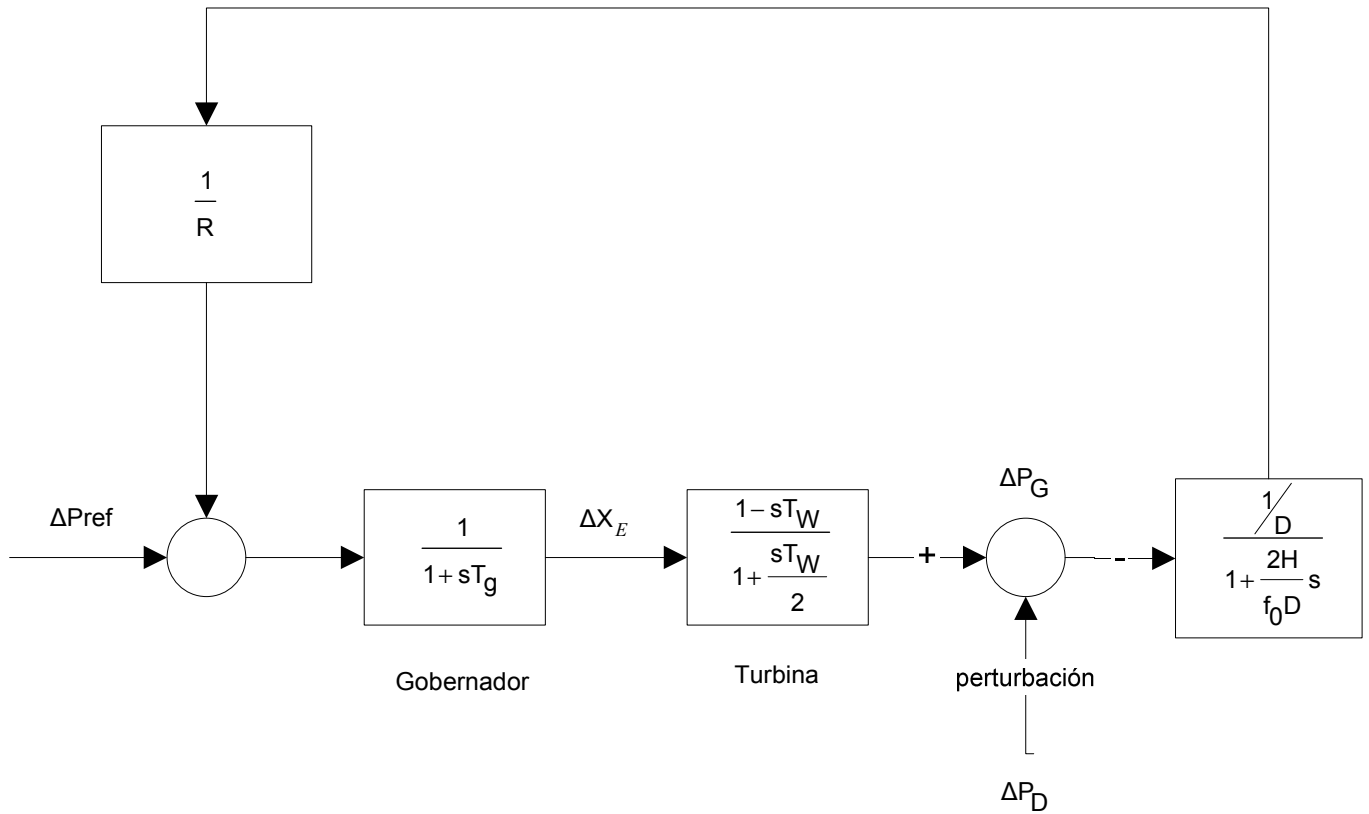


Visio

**Figura 6.6** Diagrama funcional de un sistema eléctrico elemental



Seguidamente se tiene la función de transferencia de un sistema eléctrico elemental:



Visio

**Figura 6.7** Función de transferencia de un sistema eléctrico elemental

En la figura anterior, las perturbaciones se modelan a través de la variable  $P_D$  la cual representa cambios en la potencia eléctrica del sistema, también se muestra la señal de referencia en el gobernador ( $P_{ref}$ ) que permite realizar cambios en la generación de la unidad por un proceso independiente de la frecuencia; es una señal de regulación secundaria. Es importante señalar que la producción de potencia mecánica dependerá de las constantes de tiempo del sistema de gobernanación de velocidad ( $T_g$ ) y del agua ( $T_w$ ).

En la tabla 2 se incluyen los valores típicos de los parámetros necesarios para modelar turbinas y gobernador de plantas hidroeléctricas

**Tabla 6.1** Valores típicos de los parámetros de gobernador y turbina hidráulicos

<b>Constante</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor típico (Segundos)</b>	<b>Rango (Segundos)</b>
$T_g$	Constante de tiempo del gobernador	0.2	0.2 - 0.4
$T_w$	Constante de aceleración del agua.	1.0	0.5 - 5.0
$R$	Estatismo permanente	0.04	0.03 - 0.06

**CAPÍTULO 7**  
**ANÁLISIS Y RESULTADOS**

## **CAPÍTULO 7**

### **ANÁLISIS Y RESULTADOS**

---

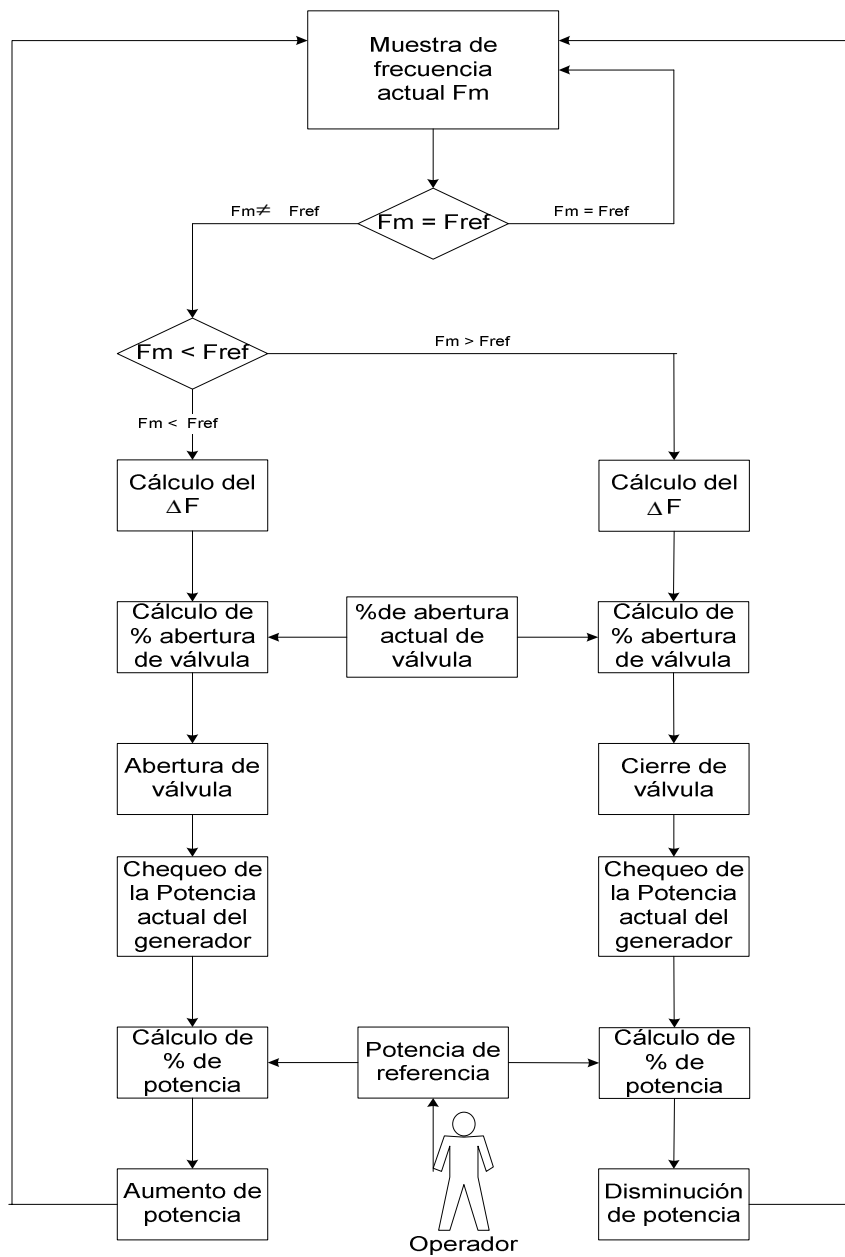
#### **7.1 Explicación del diseño**

A continuación se va a presentar los resultados obtenidos durante el cumplimiento de los objetivos planteados en el capítulo 1.3.

##### **7.1.1 Diagrama de flujo para el sistema de un gobernador.**

En la figura 7.1 se encuentra un diagrama de flujo que describe el proceso de control que utiliza el gobernador para mantener la frecuencia nominal, tanto en momentos de estabilidad, como ante perturbaciones.

Primero se hace un muestreo de la frecuencia o velocidad actual de la turbina. Esta se compara con la frecuencia de referencia para verificar si ha ocurrido algún disturbio. Si es así, se calcula la diferencia de las frecuencias y junto con la posición actual de la válvula de agua, se obtiene el porcentaje de abertura que se necesita para corregir la posición de dicha válvula, ya sea cerrarla o abrirla. Posteriormente se sondea la potencia actual entregada por el generador y comparándola con la potencia de referencia aplicada por el operador, se obtiene el porcentaje de potencia que se debe aumentar o disminuir dependiendo del caso, para contrarrestar el disturbio ocurrido inicialmente en la frecuencia o velocidad del sistema. En la siguiente figura se muestra el diagrama de flujo del gobernador implementado.



Visio

**Figura 7.1** Diagrama de flujo de un gobernador

### Entradas y salidas del sistema

En la siguiente tabla se determinan las variables de entrada y salida del sistema implementado (simulador del gobernador):

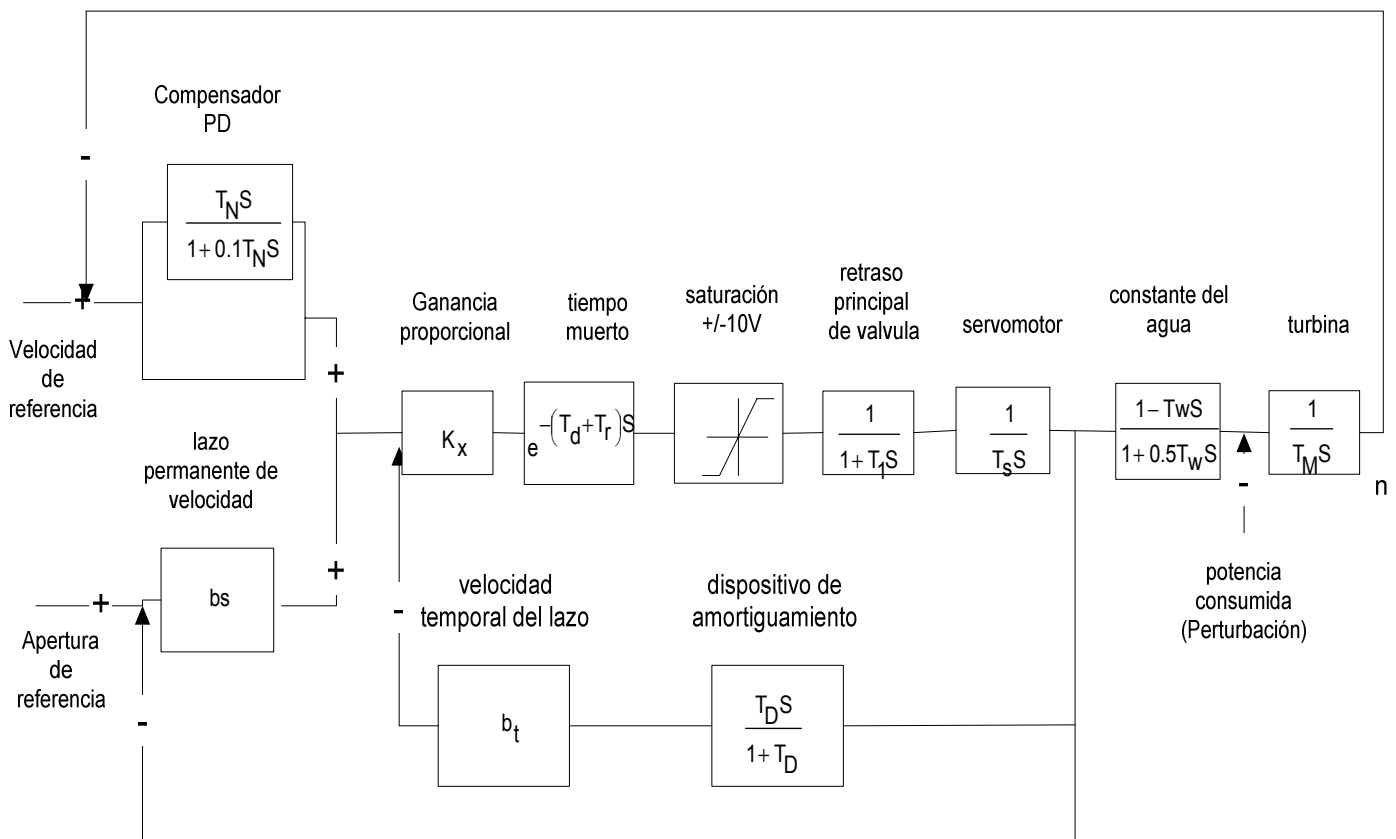
**Tabla 7.1** Entradas y salidas del sistema

<b>Entrada</b>	<b>Descripción</b>	<b>Salida</b>	<b>Descripción</b>
Velocidad de referencia Rango de 90-100%	Velocidad a la que se desea mantener el sistema (60Hz)	Velocidad actual	Velocidad actual del sistema
Potencia de referencia Rango de 0-100%	Potencia deseada para mantener la frecuencia constante en el sistema	Porcentaje de abertura actual	Abertura de los álabes actual
Porcentaje de abertura de referencia Rango de 0-100%	Abertura de los álabes deseada para mantener la frecuencia constante del sistema		
Carga Rango de 0-100%	Potencia de consumo, que provoca la perturbación del sistema		

## 7.1.2 Modelo matemático del gobernador a simular

### Modelo matemático

La siguiente figura muestra el modelo matemático experimental del gobernador que ha sido tomado como referencia para realizar la implementación del simulador en LabView.



Visio

**Figura 7.2** Modelo matemático experimental del gobernador

La razón principal por la cual se seleccionó el sistema de gobernador anterior, fue que el sistema generador por modelar (Planta Arenal) cuenta con turbinas tipo Francis, de modo que era necesario ser consistente con ese aspecto para que el modelo de gobernador por diseñar respondiera correctamente. Como se ha mencionado en capítulos anteriores, Planta Arenal fue seleccionada como modelo base por parte del Centro de Investigación y Desarrollo

#### Descripción de módulos y parámetros del gobernador:

- a.  $T_N$ : Constante de tiempo de derivación, puede ser ajustada en un rango de 0-10 seg. El bloque de compensador PD actúa como derivador de la señal de error de velocidad.
- b.  $b_s$ : Lazo de estatismo permanente. Es una ganancia eléctrica. Tiene un rango de 0 -15%.
- c.  $K_x$ : Ganancia proporcional. Rango de 1.5 – 22

Se recomienda una ganancia de 6.25 cuando la señal de salida del gobernador es el 100% (+/- 10V) a 8 Hz de error de frecuencia.

- d.  $T_r$ : Tiempo de respuesta. Tiempo que se dura en leer la entrada y referirla a la salida. El tiempo recomendado es  $T_r = 16\text{ms}$ .
- e.  $T_d$ : Tiempo de retardo de los datos. Es el tiempo entre el cambio físico de la señal, y el momento en que es reconocida por el controlador. Se utiliza un  $T_d=10\text{ms}$ .

Por lo tanto el tiempo muerto total es de:  $T_r+T_d=26\text{ms}$ .

- f.  $T_1$ : Constante de tiempo de la válvula principal. El rango típico para esta constante es  $T_1 = 0.05-0.15$  seg. Este valor depende del tamaño de la válvula



g.  $T_s$ : Constante de tiempo del servomotor. Es el tiempo que requiere el servomotor para llevar el 100% de la señal mecánica a eléctrica. El rango típico de  $T_s$  es 2-20 seg.

h.  $T_x$ : Constante de tiempo de regulación de velocidad:

$$T_x = \frac{T_s}{K_x} \quad (21)$$

Ésta constante es un valor teórico, e indica la rapidez del gobernador para reaccionar a cambios en la velocidad de la turbina. Puede ser descrito como el tiempo que se requiere para mover los álabes desde el 0% al 100% de abertura.

Para el buen desempeño del gobernador este valor debe estar entre 0.5-2 seg.

i.  $T_D$ : Constante de tiempo del dispositivo de amortiguamiento. Rango ajustable entre 0-25 seg.

j.  $b_t$ : Lazo de velocidad temporal. Es una ganancia eléctrica. Rango ajustable 0-750%

k.  $T_w$ : Tiempo de aceleración del agua o tiempo de inercia hidráulico:

$$T_w = \frac{QL}{gAH} \quad (22)$$

Es el tiempo de aceleración de una columna de agua de longitud "L" a través de un área "A" bajo el efecto de gravedad "g" desde cero a una carga nominal "Q".

l.  $T_M$ : Tiempo de arranque mecánico:

$$T_M = \left( \frac{n\pi}{30} \right)^2 \frac{J}{P} \quad (23)$$

Es el tiempo que toma todas las partes rotativas con un momento de inercia “J” desde el reposo hasta una velocidad nominal “n”.

Es importante mencionar que el modelo anterior es basado en el principio de carga aislada o barra aislada. Esto quiere decir que la carga del sistema tiene una inercia lo suficientemente pequeña para percibir cambios en su frecuencia, siendo estos provocados por una serie de alteraciones en la inercia mecánica del generador-turbina. Por lo tanto la frecuencia del sistema se puede regular utilizando sólo una unidad de generación, como lo es en este caso.

### **7.1.3 Programa prototipo en el PLC Modicon.**

Para la simulación de la carga de un sistema aislado, se utilizó un PLC Modicon Quantum modular con un UPC 434-12, y un módulo de entradas analógicas AVI 030. Se utilizó una señal de corriente CD variable, en un rango desde 4 a 20 miliamperios, la cual es sensada por el PLC a través de una de sus entradas analógicas.

Posteriormente se diseñó un programa en escalera, en donde la señal sensada es escalada por un factor de proporcionalidad para obtener valores desde 0 a 100, para después ser almacenados en un registro cuya dirección se encuentra dentro del PLC

### **7.1.4 Programa prototipo en LabView; Simulador del gobernador.**

Partiendo del modelo matemático expuesto capítulo 7.1.2, se diseñó el simulador del gobernador en tiempo real. La lógica del programa es descrita en la sección 7.1.1 de este capítulo. Mientras el programa se ejecuta, el gobernador recibe perturbaciones en la carga del sistema (por medio del PLC), provocando una desviación en la frecuencia, la cual es regulada manualmente por el operador al manipular la potencia de generación de la turbina-generador. De esta forma el sistema mantiene la frecuencia del sistema alrededor de la frecuencia de referencia digitada por el operador.

Utilizando el paquete de programación “PID Control Toolset” se implementaron todos los módulos que componen el gobernador, teniendo resultados muy satisfactorios. La ventaja que proporciona dicho paquete, es la posibilidad de programar los módulos de cada parámetro del gobernador como funciones de transferencia en tiempo continuo, teniendo comportamientos muy semejantes a las herramientas que proporciona Matlab. Esto a la vez facilitó la depuración del programa y la validación del mismo, ya que se pudo comparar su respuesta con los modelos en Matlab.

El proceso de simulación en tiempo real, se llevó a cabo utilizando una señal de reloj para evaluar el modelo matemático en un periodo de tiempo específico, y al utilizar el tiempo de discretización (es la base de tiempo que utiliza LabView, para discretizar internamente cada función de transferencia en tiempo continuo, y luego evaluarla) igual al periodo de esa señal de reloj, se logró una respuesta continua y en intervalos de tiempos constantes.

Para la comunicación con el PLC se utilizó las herramientas VISA de LabView. Estas proporcionan VI's especializados para la lectura y escritura al puerto serie. Seguidamente se implementó la función 03 del protocolo Modbus RTU, la cual realiza la lectura de uno o más registros del PLC Modicom, de esta manera el simulador obtiene el dato (en este caso la perturbación de la carga), y lo utiliza para realizar la regulación de frecuencia del sistema.

## **7.2 Alcances y limitaciones.**

El proyecto de graduación ha sido finalizado en un 100%, cumpliendo satisfactoriamente con los objetivos planteados en el anteproyecto.

Se ha cumplido con el cronograma planteado y no ha habido retrasos. El proyecto se ha desarrollado cumpliendo con los requisitos y sugerencias dadas por el encargado de la empresa.

Durante la implementación del simulador se han hecho varias correcciones o modificaciones en la metodología del proyecto:

Primero, se pretendía diseñar el simulador del gobernador en el sistema operativo Solaris o Linux. Pero el paquete de LabView que se disponía en el departamento para estos sistemas operativos, estaba incompleto y adquirirlos significaba retrasos en el proyecto. En contraparte se contaba con un paquete de software (LabView) con todas sus herramientas y programas para Windows, por lo tanto se decidió proceder bajo este sistema operativo.

En el anteproyecto se había dejado abierta la posibilidad de utilizar un PLC Allen Bradley (que se comunica en lenguaje Modbus) que se encuentra disponible en el departamento, pero éste no estaba instalado y nunca se había utilizado. Por esa razón se utilizó el PLC Modicon el cual se encuentra en constante uso (debidamente instalado), y además se comunicaba por lenguaje Modbus, siendo éste el principal requisito o característica buscado por el coordinador del proyecto.

La última modificación que se le hizo a la metodología, se base en la implementación del protocolo Modbus en LabView. Primero se pretendía incorporar por medio de un CIN (nodo de interfaz de código) los procedimientos necesarios en lenguaje C para realizar la comunicación Modbus, valiéndose de la ventaja que en el departamento ya existía este código. Pero se acordó implementar las funciones del protocolo en LabView puro, para probar los alcances de este software.

## **CAPÍTULO 8**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## **CAPÍTULO 8**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

---

#### **8.1 Conclusiones**

##### **8.1.1 Conclusiones acerca del software y hardware utilizado.**

- a.** LabView es un lenguaje de programación de muy alto nivel y de fácil manejo para aplicaciones de ingeniería, proporciona una interfaz amigable para el usuario, y paquetes de programación poderosos.
- b.** El paquete “PID control toolset” de labView contiene herramientas eficientes y versátiles para programar aplicaciones orientadas al control eléctrico, como funciones de transferencia en tiempo continuo y discreto, y compensadores PID`s.
- c.** Los indicadores y controladores del panel frontal de labView son instrumentos útiles para el despliegue de información en aplicaciones de simulación de procesos.
- d.** El PLC Modicom utilizado es un dispositivo especializado para el control de sistemas en tiempo real, con módulos AVI eficientes en el manejo de señales analógicas, y una UPC con suficiente memoria para el manejo y procesamiento de datos.
- e.** Con la realización del proyecto la empresa quedó muy beneficiada, pues se elaboró uno de los módulos (el gobernador) que forma parte del simulador total de las plantas hidroelectricas, ahorrando tiempo y dinero.

- f. El protocolo de comunicación Modbus es un lenguaje especializado en la transmisión de datos entre dos o más elementos, como lo son el computador y el PLC.

### **8.1.2 Conclusiones acerca del gobernador**

- g. El gobernador se utiliza para controlar, ante cualquier perturbación en la carga del sistema, la velocidad del eje del rotor en un valor preestablecido.
- h. La frecuencia del sistema es inversamente proporcional de la carga. Si la carga aumenta, disminuye la frecuencia, y si la carga disminuye, aumenta la frecuencia del sistema.
- i. La inercia de la turbina se opone a los cambios de frecuencia producidos por la carga. Si la constante de inercia del sistema es grande, se tendrá desviaciones de frecuencia menores.
- j. El estatismo permanente relaciona los cambios de frecuencia con los cambios de potencia. A medida que este sea más pequeño, mayor serán los cambios de frecuencia.
- k. Las constantes de tiempo del gobernador y la turbina, modifican considerablemente la respuesta dinámica del sistema. A medida que se incrementan las constantes de tiempo, la respuesta es más oscilatoria.
- l. Se tiene una buena regulación de frecuencia en sistemas de alta inercia y una baja constante de aceleración del agua. (Referirse a gráfico 6.3)

## **8.2 Recomendaciones:**

- a.** Trasladar el diseño del simulador del gobernador desarrollado en Windows a otra plataforma más estable como Linux o Unix.
- b.** Traspasar el diseño de las funciones de transferencia de cada parámetro del gobernador de tiempo continuo a tiempo discreto, en donde se tiene un mayor control en el tiempo de muestreo del sistema.
- c.** Adicionar al simulador del gobernador la etapa de arranque y paro de la Turbina-Generador, y la etapa de sincronización con la frecuencia del sistema, para que el proyecto desarrollado se complemente.



## Bibliografía

EPRI, Power system dynamic tutorial, USA 2002

R Quesada, G Arroyo, D Romero, Seminario/ taller sobre determinación de parámetros de regulación de velocidad y voltaje, Parseica, CA 1998

K Astrom, T Hagglund, PID controllers: theory design and tuning, Instrument of America, USA 1995, 2<sup>da</sup> editions

National Instruments Corporate, LabView getting started with LabView, USA 2000

National Instruments Corporate, LabView User Manual, USA 2000

National Instruments Corporate, LabView PID control toolset manual, USA 2000

National Instruments Corporate, Datalogging and supervisory control module developer's manual, USA 1997

Schneider Automation, Modicon Serie de automatización Quantum, guía de referencia del hardware, USA 1996

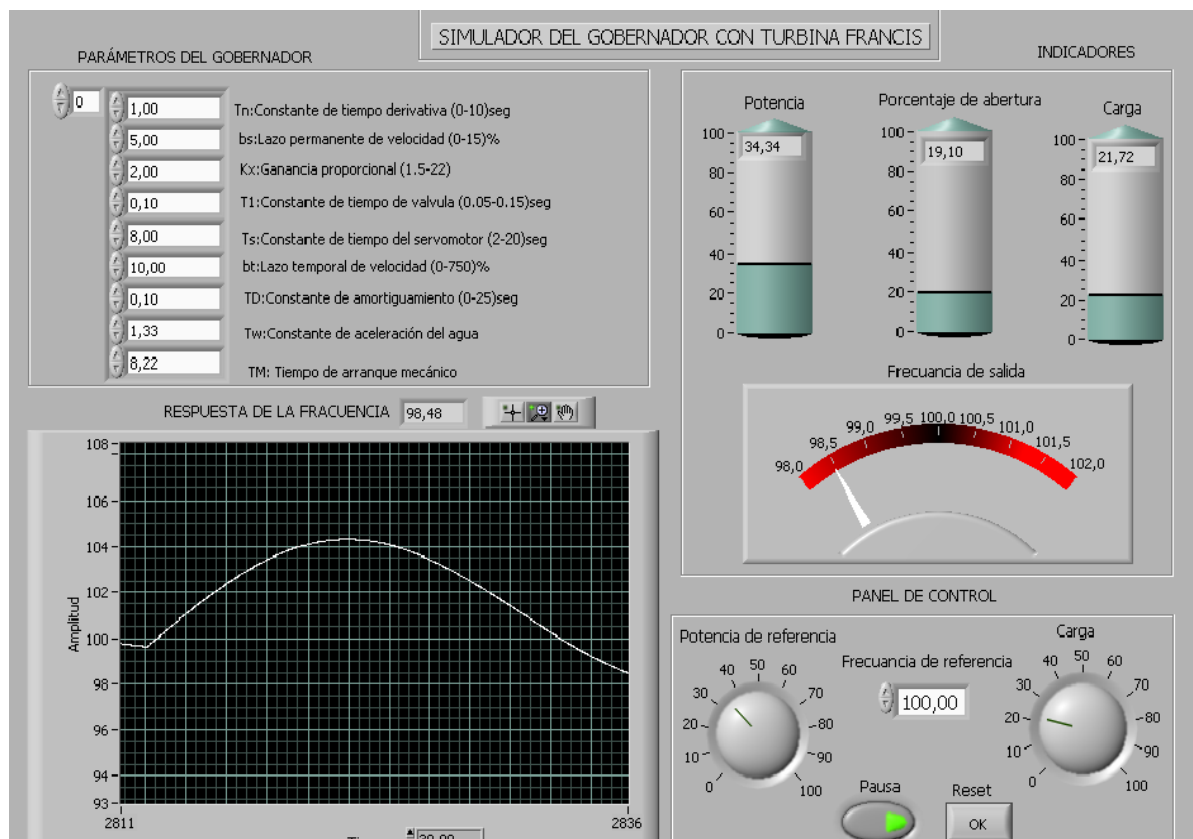
Schneider Automation, Modicon concept, user manual, USA 1996

“Todo acerca del protocolo Modbus RTU”, <http://www.modicon.com/techpubs/intr7.ht>

## **APÉNDICES Y ANEXOS**

## Apéndice A.1: interfaz del simulador del gobernador

La siguiente figura muestra la interfaz del simulador del gobernador realizada en labView:



**Figura A1** interfaz del simulador del gobernador

En la figura anterior se puede apreciar los indicadores de la potencia de generación, el porcentaje de abertura de los álabes y la carga del sistema. Adicionalmente se gráfica la respuesta de la frecuencia del sistema aislado.

En el panel de control se manipula la potencia de referencia y la frecuencia de referencia. Además de todos los parámetros del gobernador son variables y pueden ser modificados por el operador.

