

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

### **MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE REGULACIÓN DE VELOCIDAD DE LAS UNIDADES DE LA FASE C DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA PAUTE-MOLINO Y CONTRASTACIÓN CON PRUEBAS DE COMISIONAMIENTO**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**LUIS EDUARDO LUCERO AMAY**

**DIRECTOR: JESÚS AMADO JÁTIVA IBARRA**

**Quito, enero 2022**

# **AVAL**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Luis Eduardo Lucero Amay, bajo mi supervisión.

---

**DR. JESÚS AMADO JÁTIVA IBARRA**  
**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

# **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

Yo, Luis Eduardo Lucero Amay, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

---

**LUIS EDUARDO LUCERO AMAY**

# DEDICATORIA

Dedicado a mis padres

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por siempre estar a mi lado, en especial en los momentos más difíciles.

Agradezco a mi familia por ser mi soporte durante esta etapa de mi vida.

A la Escuela Politécnica Nacional, por los conocimientos impartidos que permitieron convertirme en un profesional.

Al Dr. Jesús Játiva, mi director del Proyecto de Titulación, por sus conocimientos compartidos, y por su paciencia para enseñar y por su amistad.

Al Dr. Hugo Arcos, por apoyarme en la elaboración de este proyecto de titulación.

Al Ing. Francisco Marín, por su amistad y adecuada dirección de este proyecto dentro de la central Paute-Molino. De igual manera a todo el personal de CELEC-EP, por la excelente acogida durante mi estancia en el desarrollo de las pruebas de campo.

A mi amiga, 劉麗娜, quien ayudó en la investigación y traducción de nueva bibliografía.

A los doctores Fabián Pérez, René Pérez, Carlos Jerez y a los ingenieros Paola Pineida y Esteban Ortiz; sin su ayuda no hubiese logrado culminar esta etapa.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	X
ABSTRACT.....	XI
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.1.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.2 ALCANCE .....	2
1.3 MARCO TEÓRICO .....	3
1.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA PAUTE MOLINO3	
1.3.1.1 Presa y embalse Amaluza .....	4
1.3.1.2 Túnel de Carga.....	4
1.3.1.3 Chimenea de Equilibrio .....	4
1.3.1.4 Tubería de Presión y Múltiple Distribuidor.....	5
1.3.1.5 Túnel de Descarga .....	5
1.3.1.6 Casa de máquinas .....	5
1.3.1.7 Turbina.....	5
1.3.2 TURBINAS HIDRÁULICAS .....	6
1.3.2.1 Turbinas de reacción.....	7
1.3.2.1.1 Turbinas Francis .....	7
1.3.2.1.2 Turbinas Kaplan.....	7
1.3.2.2 Turbinas de acción .....	8
1.3.2.2.1 Turbinas Pelton [10] .....	8
1.3.3 REGULADORES DE VELOCIDAD EN TURBINAS HIDRÁULICAS [11]	10
1.3.3.1 Regulador de velocidad mecánico-hidráulico.....	10
1.3.3.2 Regulador de velocidad electrohidráulico.....	13
1.3.3.3 Regulador de velocidad tipo PID .....	13
1.3.3.3.1 Control Proporcional.....	13
1.3.3.3.2 Control integral .....	14
1.3.3.3.3 Control derivativo.....	14
1.3.3.3.4 Control anticipativo [13].....	15
1.3.3.4 Regulador digital .....	16

1.3.4	REGULACIÓN DE VELOCIDAD.....	16
1.3.4.1	Regulación primaria [14],[15].....	16
1.3.4.1.1	Repartición de carga entre varios generadores.....	18
1.3.4.1.2	Efecto de la carga en la regulación.....	19
1.3.4.1.3	Regulación primaria en el Sistema Ecuatoriano [2].....	21
1.3.4.2	Regulación secundaria [15],[13].....	22
1.3.4.2.1	Control Automático de Generación.....	24
1.3.4.2.2	Regulación secundaria de frecuencia en el Sistema Ecuatoriano ..	25
1.3.5	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE REGULACIÓN DE VELOCIDAD DE LAS UNIDADES DE LA FASE “C” .....	26
1.3.5.1	Regulador de velocidad mecánico [16].....	26
1.3.5.1.1	Unidad motor-bomba.....	26
1.3.5.1.2	Tanque acumulador.....	26
1.3.5.1.3	Tanque de presión aire/aceite.....	27
1.3.5.1.4	Válvula de corte 20Q.....	27
1.3.5.1.5	Válvula de distribución principal DC.....	28
1.3.5.1.6	Bobina de inmersión.....	28
1.3.5.1.7	Válvula de paro de emergencia iQC1 .....	28
1.3.5.1.8	Inyectores .....	29
1.3.5.1.9	Deflectores.....	30
1.3.5.2	Regulador digital HyCon GC443R [17].....	30
1.3.5.2.1	CPU.....	31
1.3.5.2.2	Módulo de entradas y salidas digitales .....	32
1.3.5.2.3	Módulos de entradas y salidas analógicas .....	32
1.3.5.2.4	Medición de velocidad .....	33
1.3.5.3	Características y funciones del regulador.....	34
1.3.5.3.1	Regulación de velocidad .....	34
1.3.5.3.2	Regulación de apertura/caudal .....	35
1.3.5.3.3	Regulación de potencia .....	35
1.3.5.3.4	Conmutación suave.....	35
1.3.5.3.5	Detección de red aislada.....	35
1.3.5.3.6	Limitadores .....	35
1.3.5.3.7	Proceso de arranque con control de carga.....	36
1.3.5.3.8	Proceso de parada con control de carga .....	37
2	MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL SISTEMA DE REGULACIÓN DE VELOCIDAD.....	37
2.1	TEORÍA DE SISTEMAS DE CONTROL [18],[19].....	37
2.1.1	FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA .....	37

2.1.2	DIAGRAMAS DE BLOQUE.....	38
2.2	SISTEMA DE REGULACIÓN DE VELOCIDAD.....	40
2.2.1	MODELO DEL GENERADOR SINCRÓNICO [20].....	40
2.2.1.1	Respuesta de la carga a una desviación de frecuencia.....	42
2.2.2	MODELO DE LA TURBINA PELTON.....	42
2.2.2.1	Función de transferencia de la turbina hidráulica.....	43
2.2.2.1.1	Velocidad del agua.....	44
2.2.2.1.2	Potencia mecánica de la turbina.....	45
2.2.2.1.3	Aceleración de la columna de agua.....	45
2.2.2.1.4	Turbina no ideal.....	47
2.2.2.1.5	Características especiales de la turbina hidráulica.....	48
2.2.2.1.6	Modelo no lineal de la turbina con una columna de agua inelástica.....	49
2.2.2.1.7	Refinamiento del modelo de la turbina.....	52
2.2.2.1.8	Inclusión del efecto del deflector en la turbina.....	56
2.2.3	CONTROLADORES.....	57
2.2.3.1	Lazo de control de velocidad.....	57
2.2.3.2	Lazo de control de potencia.....	58
2.2.4	INYECTOR.....	59
2.2.5	DEFLECTOR.....	59
3	CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE REGULACIÓN DE VELOCIDAD EN EL PROGRAMA POWERFACTORY DE DIGSILENT.....	61
3.1	POWERFACTORY DE DIGSILENT [27].....	61
3.1.1	LENGUAJE DSL.....	61
3.1.1.1	Bloques de cálculo básico.....	61
3.1.1.1.1	Funciones básicas.....	62
3.1.1.2	Funciones especiales.....	62
3.1.1.3	Declaración de ecuación.....	64
3.1.1.4	Composite model (modelo compuesto).....	64
3.1.1.5	Composite frame (marco compuesto).....	65
3.2	METODOLOGÍA GENERAL DE LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL EN POWERFACTORY [28].....	65
3.2.1	RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	65
3.2.2	MODELAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	65
3.2.3	PROCESO DE CODIFICACIÓN.....	66
3.2.4	PROCESO DE PRUEBAS Y DOCUMENTACIÓN.....	66
3.2.4.1	Pruebas de estado estable.....	66
3.2.4.2	Variación del +/- 10% de la carga.....	66
3.2.4.3	Prueba de escalón en la velocidad de referencia.....	67



3.3	IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS DEL REGULADOR DE VELOCIDAD MEDIANTE EL MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN BASADA EN ENJAMBRE DE PARTÍCULAS.....	67
3.3.1	ELEMENTOS DEL PSO [30].....	68
3.3.2	PROCEDIMIENTO [32] .....	70
3.3.3	IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS [30].....	71
3.4	CONTRASTACIÓN CON PRUEBAS DE COMISIONAMIENTO.....	71
3.4.1	PRUEBAS DE PRECOMISIONAMIENTO.....	71
3.4.2	PRUEBAS DE COMISIONAMIENTO .....	72
3.4.2.1	Rechazos de carga [26] .....	73
3.4.2.2	Prueba de respuesta de generación en línea [13] .....	75
3.5	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA .....	76
3.5.1	RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	76
3.5.2	MODELAMIENTO DE LA INFORMACIÓN Y PROCESO DE CODIFICACIÓN.....	76
3.5.2.1	Construcción de un Common Model .....	77
3.5.2.2	Construcción de un Frame.....	79
3.5.2.3	Modelación de los diagramas de bloque .....	82
3.5.2.3.1	Controladores PID de velocidad y potencia.....	82
3.5.2.3.2	Inyectores .....	86
3.5.2.3.3	Deflector.....	88
3.5.2.3.4	Turbina Pelton .....	91
3.5.2.3.5	Sistema Completo .....	93
3.5.2.4	Sistema de prueba .....	94
3.5.3	Pruebas iniciales .....	95
3.5.3.1.1	Pruebas de estado estable.....	96
3.5.3.1.2	Variación del +/- 10% de la carga .....	96
3.5.3.1.3	Prueba de escalón en la velocidad de referencia.....	98
3.5.4	IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS APLICANDO EL ALGORITMO PSO 100	
3.5.5	CONTRASTACIÓN CON PRUEBAS DE COMISIONAMIENTO .....	105
3.5.5.1	Rechazos de carga .....	105
3.5.5.1.1	Deflectores.....	106
3.5.5.1.2	Inyectores .....	106
3.5.5.1.3	Velocidad .....	107
3.5.5.1.4	Criterios de análisis y valores MSE.....	107
3.5.5.2	Entrada escalón de potencia .....	112
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	114

4.1	CONCLUSIONES .....	114
4.2	RECOMENDACIONES.....	115
5	BIBLIOGRAFÍA.....	116
6	ANEXOS.....	118

## RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo fundamental crear un modelo del nuevo regulador de velocidad de las unidades de la fase C de la Central Paute Molino. Este modelo de regulador sirve para ejecutar estudios de estabilidad del Sistema Eléctrico Ecuatoriano.

Se presenta un desarrollo de las funciones de transferencia de la turbina al igual que su modificación para que refleje una respuesta adecuada de una turbina Pelton y el generador, incluyendo el efecto de la carga; diagramas de bloque de los controladores PID y del posicionamiento de los inyectores y deflectores provistos por el fabricante.

Una parte fundamental en la simulación de un nuevo regulador de velocidad es la identificación de parámetros ya que asegura una respuesta adecuada del modelo. En esta simulación se usa un método heurístico de parametrización denominado optimización de enjambre de partículas (PSO) porque dentro del sistema de regulación se tiene un modelo no lineal de la turbina y este método presenta una mayor flexibilidad para configurar las ganancias del controlador PID dentro de los límites establecidos.

Luego de realizar la identificación de parámetros se presenta un análisis en el tiempo para evaluar la respuesta ante variaciones de potencia y frecuencia.

Finalmente, se presentan los resultados de la contrastación con las pruebas de comisionamiento con el objetivo de validar los resultados de la simulación con los tomados en pruebas de campo.

**PALABRAS CLAVE:** sistema de regulación de velocidad, identificación de parámetros, PSO, modelo no lineal de la turbina, deflector.

## **ABSTRACT**

The main objective of this project is to create a model of the new speed regulator for the units of phase C of the Paute-Molino Power Plant. This regulator model is used to carry out stability studies of the Ecuadorian Electric System.

A development of the turbine transfer functions is presented as well as its modification to reflect an adequate response of a Pelton turbine and the generator, including the effect of the load; block diagrams of the PID controllers and the positioning of the injectors and deflectors provided by the manufacturer.

A fundamental part in the simulation of a new speed regulator is the parameters identification since it ensures an adequate response of the model. In this simulation, a heuristic parameterization method called particle swarm optimization (PSO) is used because there is a non-linear turbine model within the regulation system and this method has greater flexibility to configure the gains of the PID controller within the established limits.

After performing the parameters identification, an analysis is presented in time to evaluate the response to variations in power and frequency.

Finally, the results of the contrast with the commissioning tests are presented to validate the results of the simulation with those taken in field tests.

**KEYWORDS:** Speed regulation system, parameters identification, PSO, nonlinear turbine model, deflector.

# 1 INTRODUCCIÓN

La Central Paute-Molino es la generadora hidroeléctrica más importante del Ecuador, ya que contribuye con la mayor cantidad de energía eléctrica, actualmente el 30% de la demandada en el país [1]. Adicionalmente y de acuerdo con el CENACE, Paute-Molino es la única central encargada de realizar la regulación secundaria de frecuencia en el Sistema Eléctrico Ecuatoriano [2].

La Central Paute-Molino, cuya casa de máquinas en caverna alberga 10 unidades de generación eléctrica con turbinas tipo Pelton, tiene una capacidad total de 1075 MW. Consta de dos Fases AB y C. La fase AB se halla en operación desde 1983 y la Fase C desde 1992. Los sistemas de regulación de la Fase AB de la Central Paute Molino han estado en operación por más de 38 años y tienen una tecnología de los años 70. En el mismo sentido, las unidades de la Fase C tienen una vida operativa de alrededor de 30 años y fueron construidas con tecnología de la década de los 60 [3].

En agosto del 2016, se llevó a cabo la modernización de los sistemas de control de velocidad de la Central Paute-Molino, ya que debido a su antigüedad presentan problemas como: indisponibilidad de repuestos, obsolescencia de las partes mecánicas, y conocimiento restringido del personal nuevo. En dicha modernización se cambió el antiguo sistema de regulación de velocidad electrohidráulico Hydroart RE-100/A/PR por el sistema de regulación digital HyCon GC443R de la empresa Voith-Siemens.

Anteriormente se contaba con el modelo computacional del sistema de regulación de velocidad, Hydroart RE-100/A/PR. Sin embargo, dicho modelo ya no es válido para realizar estudios dinámicos ya que, luego de la modernización, se tiene un nuevo sistema de regulación de velocidad denominado HyCon GC443R.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 OBJETIVO GENERAL**

Modelar y simular el nuevo sistema de regulación de velocidad HyCon GC443R instalado en las unidades de la Fase C de la Central Paute Molino mediante el uso del software PowerFactory para su posterior contrastación con los resultados de pruebas de comisionamiento.

### **1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Obtener los valores de los parámetros correspondientes al sistema de regulación de velocidad HyCon GC443R.
- Obtener el diagrama de bloques y la función de transferencia del sistema de regulación de velocidad HyCon GC443R.
- Construir un modelo particular del sistema de regulación de velocidad de las unidades de la Fase C de la Central Paute-Molino en el Programa PowerFactory.
- Ejecutar simulaciones del sistema construido en PowerFactory y analizar sus resultados.
- Validar el modelo mediante la contrastación con pruebas de comisionamiento del sistema de regulación de velocidad HyCon GC443R instalado en las unidades de la Fase C.

## **1.2 ALCANCE**

La necesidad de contar con un modelo computacional del sistema de regulación de velocidad se da por lo siguiente:

- Debido a la gran importancia del sistema de regulación de velocidad en la generación de energía, ya que regula la velocidad de la turbina y, por lo tanto, la frecuencia y la potencia activa en respuesta a la variación de la carga.
- Al disponer un nuevo en el sistema de regulación de velocidad, se debe elaborar un modelo computacional que permita efectuar simulaciones de pruebas de desempeño y operación ante perturbaciones, tanto de pequeña señal como de estabilidad transitoria incluyendo la actuación de los reguladores de velocidad en el sistema eléctrico.

La modelación y simulación se realizará en el software PowerFactory, ya que se trata de una herramienta confiable y flexible para el modelado y análisis de sistemas eléctricos; también se toma en cuenta que los estudios del Sistema Nacional Interconectado se realizan usando este software.

La contrastación de los resultados de la simulación con las pruebas de comisionamiento, tiene el objetivo de validar el modelo. Los resultados de estas pruebas permitirán obtener parámetros más adecuados del sistema de regulación de velocidad HyCon GC443R, y esto a su vez repercutirá en una mayor confiabilidad del análisis de perturbaciones en el sistema eléctrico, cabe mencionar que las pruebas de comisionamiento las llevará a cabo la empresa Voith-Siemens en conjunto con el personal de CELEC Hidropaute.

### 1.3 MARCO TEÓRICO

#### 1.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA PAUTE MOLINO

El Complejo Hidroeléctrico Paute está ubicado a 125 km al noreste de la Ciudad de Cuenca, entre las provincias del Azuay, Cañar y Morona Santiago. Se encuentra conformado por las centrales Mazar, Molino, Sopladora, Estas centrales se ubican en cascada a lo largo de la cuenca del río Paute como se muestra en la Figura 1.1. Ubicación geográfica de la Central; dentro de este complejo se encuentran también los reservorios Mazar, Amaluza y Marcayacu [3]. La Central Paute-Molino tiene una capacidad de 1100 MW, es considerada la más importante del Ecuador ya que genera alrededor del 35% de la energía demandada en el país.



Figura 1.1. Ubicación geográfica de la Central

### 1.3.1.1 Presa y embalse Amaluza

La presa de Amaluza se construyó como parte de las obras de las fases A y B, es del tipo arco-gravedad, tiene una longitud de coronación de 420 m y una altura de 170 m [4]. La presa da origen al embalse Amaluza que tiene una capacidad para almacenar 120 Hm<sup>3</sup> cuyo volumen útil es de 100 Hm<sup>3</sup> y los niveles de fluctuación del agua son 1991 msnm y 1935 msnm como niveles máximo y mínimo respectivamente. La presa y embalse se muestran en la Figura 1.2.

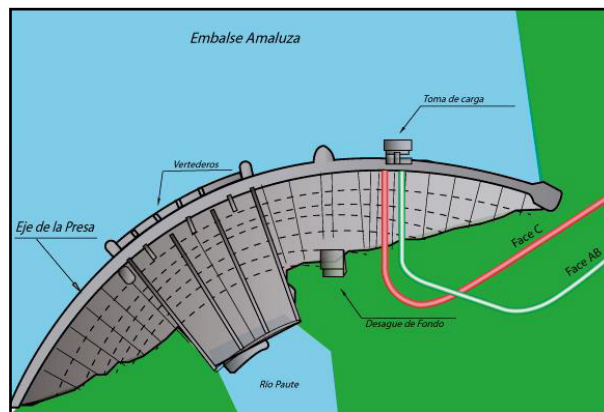


Figura 1.2. Disposición de la central

### 1.3.1.2 Túnel de Carga

Los túneles de carga del tipo sección circular se encuentran revestido de concreto y tienen una altura de 5 metros para la fase AB y 6,9 metros para la Fase C. La longitud del túnel para la fase AB es de 6070 m y de 6024 m para la fase C. El túnel de la fase C está ubicado de forma paralela al túnel de carga de la fase AB y a una distancia media de 80 m [4]. Estos túneles se diseñaron para conducir un caudal máximo de 100 m<sup>3</sup>/s para la fase AB y 105 m<sup>3</sup>/s para la C, desde el embalse hasta la Chimenea de equilibrio donde se inicia la tubería de presión.

### 1.3.1.3 Chimenea de Equilibrio

Cuenta con chimeneas de equilibrio del tipo orificio restringido con una altura de 170 m para la fase AB y 130 m para la C, y de un diámetro de 7 m. Están localizadas totalmente en la unión del túnel de carga con la tubería de presión [3]. Su función es la de amortiguar las sobrepresiones producidas por las maniobras de operación, reduciendo de esta forma el efecto del golpe de ariete que se produce en las tuberías y galerías [5].



### 1.3.1.4 Tubería de Presión y Múltiple Distribuidor

Las tuberías de presión junto con los distribuidores se encuentran en el último tramo de la conducción. Están conectados con cada una de las turbinas. La longitud de la tubería es de 850 m y 3,75 m de diámetro interno para la fase AB y de 950,58 m de longitud y 4,2 m de diámetro interno para el tramo inferior de la Fase C.

### 1.3.1.5 Túnel de Descarga

El agua turbinada en la Central Molino es devuelta al río Paute mediante túneles de descarga de una altura igual a 8m y 400m de longitud para la fase AB y 405m para la fase C. El túnel de descarga está revestido de hormigón y está diseñado para una descarga máxima de 100 m<sup>3</sup>/s. para la fase AB y 105 m<sup>3</sup>/s. para la C [4].

### 1.3.1.6 Casa de máquinas

La casa de máquinas de la Central Molino se encuentra en Guarumales, en los límites de las provincias de Azuay, Cañar y Morona Santiago. Constituye una caverna subterránea de 23,4 m de ancho, 184 m de longitud y 42,5 m de altura que acomodan los grupos turbina-generador, así como los transformadores de la fase AB y fase C. En la fase AB se encuentran las unidades 1 a 5 de 100 MW, cada una están conectadas al sistema al nivel de 138 kV a través de transformadores elevadores de 114 MVA, 13,8/138 kV, de 12,23% de impedancia. En la fase C están las unidades 6 a 10 de 115 MW, cada una conectadas al sistema al nivel de 230 kV a través de transformadores elevadores de 134 MVA, 13,8/230 kV, de 13% de impedancia [3].

### 1.3.1.7 Turbina

Las turbinas hidroeléctricas para las dos fases son de tipo Pelton y tienen las características dadas en la Tabla 1.1 [6].

**Tabla 1.1.** Características turbina Pelton

Turbina		
Tipo	Pelton eje vertical	
Velocidad	360 rpm	
Número de inyectores	6	
Rendimiento	91,83%	
Potencia	AB	116 MW

	C	122 MW
Caída neta	AB	650 m
	C	657 m

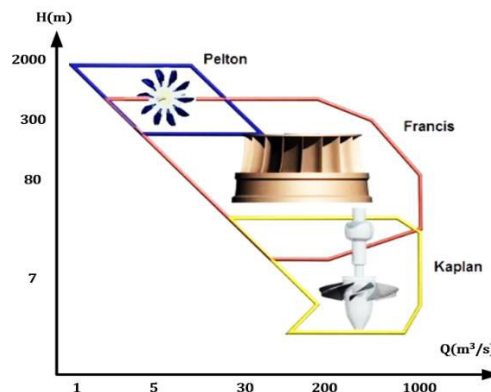
### 1.3.2 TURBINAS HIDRÁULICAS

Las turbinas hidráulicas son elementos mecánicos que se encargan de transformar la energía potencial y cinética en energía mecánica. Esta energía se transfiere mediante un eje al generador y posteriormente se transforma en energía eléctrica [7].

Según la manera en que el agua ejerce una fuerza sobre la turbina, las turbinas pueden ser de acción y de reacción. Dentro de las de acción las principales turbinas son las turbinas Pelton y las turbinas Turgo. En las turbinas de reacción se encuentran las turbinas Francis y Kaplan. A continuación, se detalla de una mejor forma la clasificación de las turbinas.

- Acción
  - Flujo tangencial
    - ◆ Turbinas Pelton
- Reacción
  - Flujo diagonal
    - ◆ Turbinas Francis
  - Flujo axial
    - ◆ Turbinas hélice de álabes orientables
    - ◆ Turbinas Kaplan

La turbina que se utilice dependerá del caudal y de la altura de la caída de agua como se lo muestra en la Figura 1.3.



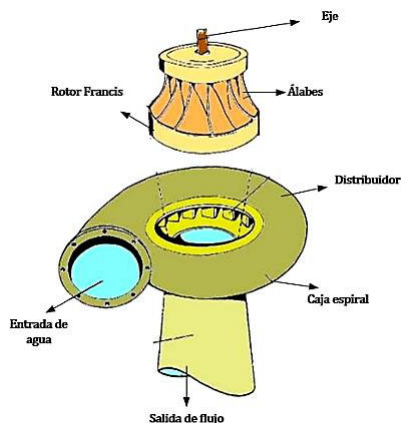
**Figura 1.3.** Rango de utilización según el tipo de turbina [8]

### 1.3.2.1 Turbinas de reacción

En las turbinas de reacción la energía potencial del salto se transforma en energía cinética y energía de presión. En estas turbinas el flujo de agua circula por el distribuidor y el rodete a una presión menor a la presión que se tiene a la salida del rodete; esta presión de salida es menor a la atmosférica [7].

#### 1.3.2.1.1 Turbinas Francis

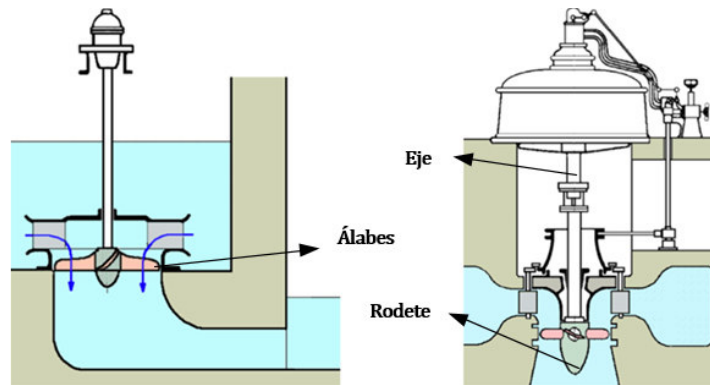
Generalmente son usadas para saltos de una altura intermedia es decir de hasta 200 m, y para caudales entre 2 y 20 m<sup>3</sup>. En esta clase de turbinas el agua va desde el conducto de presión hasta el sistema de distribución, atravesando un caracol que se encuentra en el contorno del sistema distribuidor. Los principales componentes de la turbina Francis son: caracol, anillo fijo, álabes fijos y móviles, rodete, eje de la turbina y tubo de aspiración. En la Figura 1.4 se detallan los elementos de una turbina Francis.



**Figura 1.4.** Diagrama de una turbina Francis [8]

#### 1.3.2.1.2 Turbinas Kaplan

Este tipo de turbinas son usadas para alturas de salto de 1 m a 90 m y con altos caudales (15 m<sup>3</sup>/s). En estas turbinas el agua fluye de forma axial. Poseen una hélice con álabes que se los pueden ajustar a conveniencia, de manera que el agua choque con el borde del álabe y se produzca un mayor rendimiento de la turbina [9]. En la Figura 1.5 se aprecia los componentes de la turbina Kaplan.



**Figura 1.5.** Turbinas Kaplan [10]

### 1.3.2.2 Turbinas de acción

Las turbinas de acción o también denominadas turbinas de impulso trabajan a una presión atmosférica, aprovechando la velocidad del agua que se produce en el instante de su acción en la turbina. Debido a esta velocidad, la mayor parte de la energía producida por el agua es energía cinética [7].

#### 1.3.2.2.1 Turbinas Pelton [10]

Las turbinas del tipo Pelton son usadas cuando se tienen saltos de gran altura. Se caracterizan por poseer una gran confiabilidad, alta eficiencia (alrededor del 90%) y bajo costo de mantenimiento. Estas turbinas constan de una o más boquillas fijas, por las cuales sale un chorro de agua que, al incidir sobre las paletas móviles de un rodete, producen energía cinética.

A continuación, se presentan los principales componentes de la turbina Pelton:

**Válvula esférica:** Consta de una compuerta del tipo válvula esférica encargada de controlar que el flujo del agua, que va desde el distribuidor hacia la turbina, sea uniforme. Esta acción se logra mediante la apertura y cierre de un mecanismo hidráulico que está controlado por el regulador de la turbina.

**Rodete:** Su función principal es la de transformar la energía hidráulica en energía mecánica.

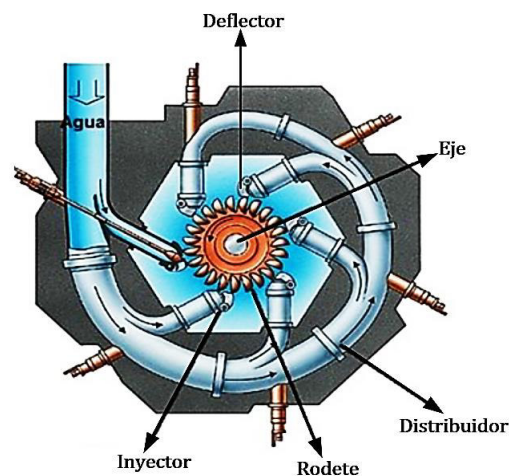
**Distribuidor:** Es una tubería que conecta la válvula esférica con los inyectores. Este conducto, en forma de anillo, se encuentra ubicado alrededor del rodete.

**Inyectores:** Se encargan de conducir el chorro de agua, sobre los álabes o cucharas, de forma tangencial. El inyector es un elemento regulador del caudal y para ello cuenta con una válvula de aguja cuyo recorrido determina su apertura o cierre. Su funcionamiento es similar al de un cilindro hidráulico de efecto simple. Los inyectores se encuentran comandados por servomotores individuales.

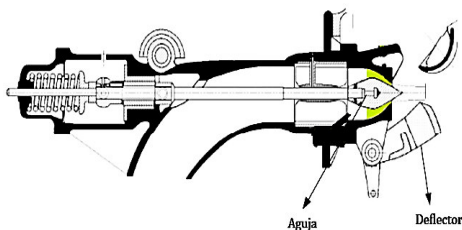
**Deflector:** Es una pantalla que actúa para evitar que la turbina se embale cuando el inyector mantiene una apertura mayor a la requerida por la carga. Para ello, el deflector se antepone al chorro de agua y lo desvía. Generalmente, los deflectores están controlados con un único servomotor.

**Eje:** Es el elemento encargado de transmitir la potencia producida por la turbina hacia el generador.

En la Figura 1.6 y Figura 1.7 se muestran los componentes de la tubería Pelton.



**Figura 1.6.** Componentes turbina Pelton [8]



**Figura 1.7.** Inyector y deflector

### **1.3.3 REGULADORES DE VELOCIDAD EN TURBINAS HIDRÁULICAS [11]**

El objetivo principal de un regulador de velocidad es mantener, en un rango adecuado, la frecuencia y la potencia activa en respuesta a la variación de la carga. Esto se logra variando la velocidad del sistema turbina-generador.

La operación del sistema regulador de velocidad se realiza mediante la coordinación de equipos tanto mecánicos como eléctricos. Estos equipos pueden ser relés de protección, bombas de lubricación, servomotores, control de la excitación, supervisión del generador, sincronizador, interruptor principal del generador y otros elementos de control hidráulico y oleodinámico.

Las principales funciones de un sistema de regulación de velocidad son:

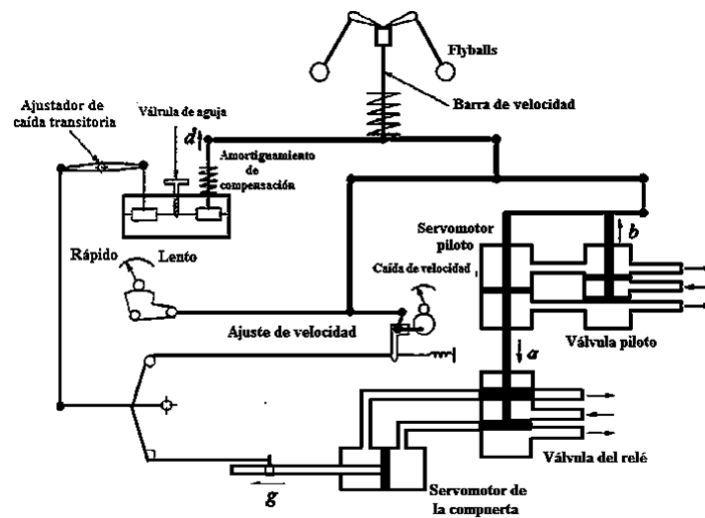
- Ajustar y mantener la velocidad de la unidad antes y después de la sincronización.
- Ajustar la potencia mecánica de salida de la turbina para mantener la frecuencia del sistema después de la sincronización.
- Responder de forma adecuada a los diferentes comandos y señales de supervisión con el fin de ajustar la potencia eléctrica entregada al sistema.
- Cuando opera en paralelo con otras unidades del sistema, debe permitir compartir cambios de carga de acuerdo con su característica de regulación de velocidad (estatismo) en respuesta al error de frecuencia del sistema.
- Incrementar la eficiencia de la turbina con base en la operación adecuada del número de inyectores (turbinas Pelton).

#### **1.3.3.1 Regulador de velocidad mecánico-hidráulico**

Antiguamente se realizaba el control de la velocidad con elementos mecánicos e hidráulicos, es así cómo se desarrolló el regulador de Watt. Este regulador es un sensor de velocidad desarrollado por el escocés James Watt en 1788, consta de poleas en los ejes del rotor. Su funcionamiento está basado en el desplazamiento de una varilla en el eje axial, debido al movimiento centrífugo de las masas giratorias, que acciona un pistón de la válvula piloto. Este regulador tiene una baja precisión y bandas muertas que aumentan por el desgaste de los componentes mecánicos, lo cual representa una desventaja.

El regulador de Watt requiere de un medio adicional para la estabilización que permita mejorar el efecto de regulación para controlar de manera adecuada la velocidad. Para conseguir la estabilización es necesario realimentar la posición del servomotor con un mecanismo que

amortigua sus movimientos, de esta forma se restablece de manera temporal la válvula de control hacia una posición nula. En la Figura 1.8 se muestran las partes del regulador de Watt.



**Figura 1.8.** Regulador de velocidad mecánico hidráulico

La Ecuación 1.1 muestra la función de transferencia del servomotor de la válvula de relé y de la compuerta.

$$\frac{g}{a} = \frac{K_1}{s} \quad (1.1)$$

La función de transferencia del servomotor piloto y la válvula se expresa en la Ecuación 1.2.

$$\frac{a}{b} = \frac{K_2}{1 + sT_p} \quad (1.2)$$

En la Figura 1.8 se observa el esquema de un regulador mecánico-hidráulico para una turbina, donde  $K_2$  representa la relación existente en la palanca de realimentación, y el coeficiente  $T_p$  se lo halla con base en las zonas portuarias de la válvula piloto y  $K_2$ .

$$\frac{g}{b} = \frac{K_1 K_2}{s(1 + sT_p)} = \frac{K_s}{s(1 + sT_p)} \quad (1.3)$$

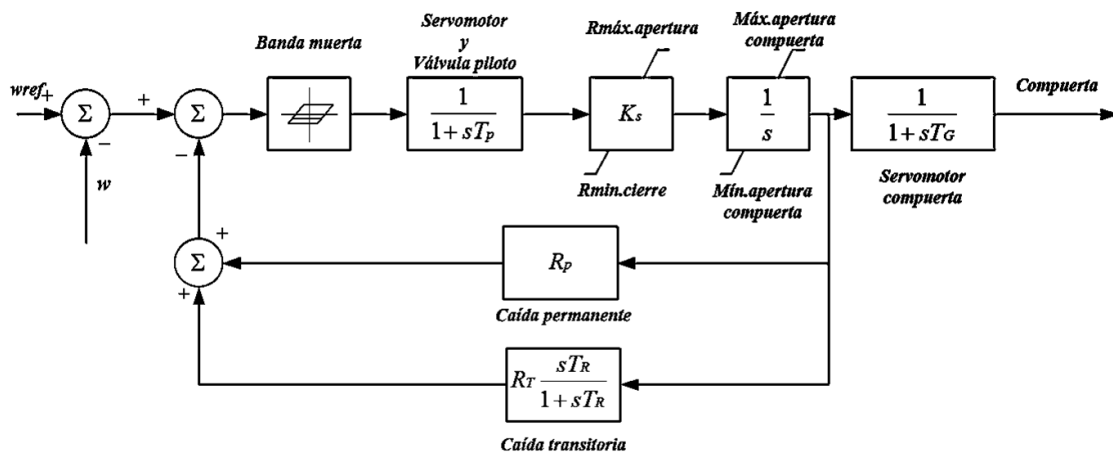
El parámetro  $K_s$  expresado en la Ecuación 1.3, representa la ganancia del servomotor y  $T_p$  representa la constante de válvula/servomotor piloto. La ganancia del servomotor  $K_s$ , se determina por la relación de realimentación de la palanca de la válvula piloto. Suponiendo que el líquido del amortiguador hidráulico que circula por la válvula del inyector es directamente proporcional a la presión del amortiguador hidráulico, la Ecuación 1.4 indica la función de transferencia relacionada al amortiguador hidráulico.

$$\frac{d}{g} = R_T \frac{sT_R}{1 + sT_R} \quad (1.4)$$

El tiempo de restablecimiento o de caída se lo calcula con base en el ajuste de la válvula del inyector y la caída temporal  $R$  se determina por la relación de palanca.

El agua no es un fluido muy compresible; por lo tanto, si la compuerta se cierra demasiado rápido, el conducto de carga podría reventarse debido a la elevada presión resultante. En consecuencia, el desplazamiento de la compuerta es el límite máximo.

En la Figura 1.9 se muestra un diagrama de bloques del sistema de regulación utilizados en estudios de estabilidad del sistema. Este diagrama representa el modelo completo de una turbina hidráulica y su sistema regulador de velocidad, los parámetros asociados al diagrama del regulador se muestran en la Tabla 1.2.



**Figura 1.9.** Diagramas de bloques del regulador mecánico-hidráulico

**Tabla 1.2.** Parámetros del regulador mecánico-hidráulico

Parámetro	Descripción
$T_p$	Válvula piloto y constante de tiempo del servomotor
$K_s$	Ganancia del servomotor
$T_G$	Constante del tiempo del servomotor principal
$R_p$	Caída permanente
$R_T$	Caída transitoria
$T_R$	Tiempo de reinicio

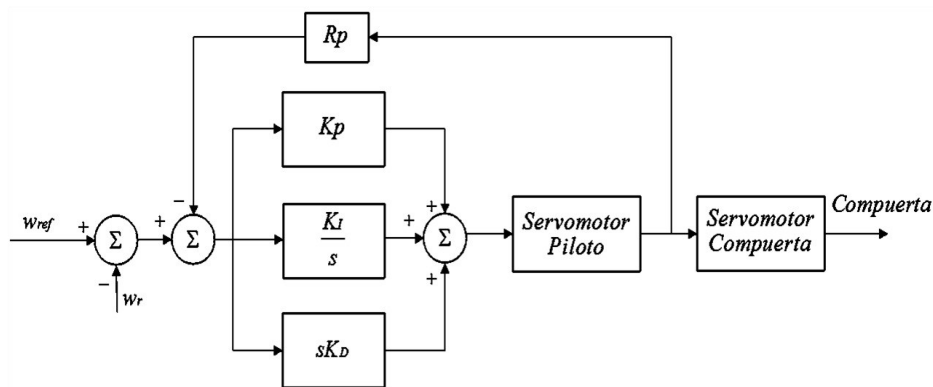


### 1.3.3.2 Regulador de velocidad electrohidráulico

Estos reguladores tienen un funcionamiento similar a los del tipo mecánico-hidráulicos y son los más usados en las turbinas hidráulicas. En este tipo de reguladores la medición de velocidad, caídas transitoria y permanente entre otras funciones, se realizan eléctricamente. La medición eléctrica provee de mayor flexibilidad y rendimiento, mejora las bandas muertas y los tiempos de retardo [11].

### 1.3.3.3 Regulador de velocidad tipo PID

En la actualidad es común utilizar controladores PID (Proporcional, Derivativo, Integral) ya que mediante el uso de estos controladores es posible obtener una respuesta más rápida, reducir la ganancia transitoria y aumentar la ganancia en estado estable. Generalmente las constantes proporcionales oscilan en los valores  $K_p = 3, K_I = 0,7, K_D = 0,5$ . En la Figura 1.10 se presenta el diagrama de bloque de un regulador PID.



**Figura 1.10.** Diagramas de bloque del regulador PID

La fórmula del regulador PID está dada por la Ecuación 1.5.

$$c(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{\partial e(t)}{\partial t} \quad (1.5)$$

#### 1.3.3.3.1 Control Proporcional

La fase proporcional del regulador consiste en el producto entre la constante proporcional y la señal de error. Con esto se consigue reducir el error de estado estacionario a un valor cercano a cero. Los valores de la constante proporcional serán óptimos solamente en un intervalo determinado ya que de estar fuera de lo indicado se produciría una sobreoscilación

en dicho sistema. Al aumentar la constante proporcional  $K_p$  se aumenta la velocidad a la cual responde el sistema. La Ecuación 1.6 describe el control proporcional [12].

$$c(t) = K_p e(t) \quad (1.6)$$

#### 1.3.3.3.2 Control integral

El objetivo principal de este control es eliminar el error en estado estacionario proveniente del lazo de control proporcional. Este control actúa cuando hay una desviación entre la medición de la señal y el valor deseado. Al combinar con la parte proporcional se obtiene una respuesta sin error estacionario. Los principales efectos cuando se aumenta la constante integral  $K_i$  son: el aumento en pequeña cantidad de la velocidad del sistema, la disminución del error en régimen permanente y el aumento de la inestabilidad del sistema. En la Ecuación 1.7 se describe el control integral [12].

$$c(t) = K_i \int e(t) dt \quad (1.7)$$

#### 1.3.3.3.3 Control derivativo

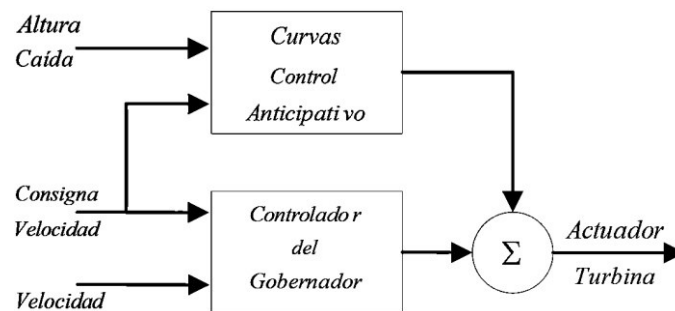
El control derivativo actúa cuando existe una variación en el valor absoluto del error del lazo derivativo. Se ejerce una corrección que es proporcional a la velocidad que se produce el error y como resultado el error se reduce al mínimo. Se debe tener muy en cuenta la asignación de los tiempos de la acción derivativa ya que si es un valor grande habrá una inestabilidad en la señal de salida y por el contrario si es un valor pequeño se producirán varias oscilaciones con relación al valor deseado.

La ganancia derivativa tampoco puede ser alta porque se producirían grandes oscilaciones, lo cual conlleva a la inestabilidad del sistema, cuando el generador esté conectado a la red. Esta acción tiene un mayor beneficio cuando la máquina opera en modo aislado, en especial, cuando la constante de tiempo del agua  $T_w$ , en la turbina, es mayor o igual a 3s; por estas razones la ganancia derivativa normalmente se establece en 0. Al incrementar la constante  $K_d$  se debe tomar en cuenta que este aumento tendrá incidencia en la velocidad del sistema ya que se disminuirá, la estabilidad del sistema se aumentará y, finalmente el error en régimen permanente permanecerá igual. La Ecuación 1.8 describe el control derivativo [12].

$$c(t) = K_d \frac{\partial e(t)}{\partial t} \quad (1.8)$$

#### 1.3.3.3.4 Control anticipativo [13]

El control anticipativo (feedforward) es una estrategia de control predictivo que se puede utilizar junto con cualquier controlador de lazo cerrado, en este caso PID, para lograr una respuesta más rápida a un cambio en el punto de ajuste sin comprometer la contribución del controlador del gobernador de la unidad a la estabilidad general del sistema. La Figura 1.11. muestra cómo se utiliza el controlador anticipativo en conjunto con el controlador en lazo cerrado. En este caso el controlador actúa con la variación de velocidad.



**Figura 1.11.** Controlador de gobernador típico con retroalimentación de velocidad y avance del punto de ajuste

Es importante tener en cuenta que se debe diseñar una estrategia de control de anticipo para que funcione solamente mientras la unidad esté conectada en paralelo con el sistema interconectado. La función de alimentación anticipada generalmente se desactiva cuando la unidad está aislada del sistema interconectado.

Si las curvas de generación versus apertura de las compuertas de una unidad no están influenciadas por la altura de la caída de agua, la función anticipativa podría simplificarse eliminando la entrada de la caída de agua.

Sin embargo, si las características de generación versus posición de compuerta de la unidad están significativamente influenciadas por otros parámetros operativos, como el flujo a través de otras unidades que comparten el mismo paso de agua, estas condiciones deben ser acomodadas por las curvas de alimentación hacia adelante para lograr un desempeño aceptable por parte del controlador del gobernador.

Si los factores que influyen en las características de generación versus apertura de las compuertas de la unidad se vuelven demasiado complejos, puede ser más conveniente eliminar la función de alimentación anticipada depender de las ganancias del controlador del

governador para proporcionar la respuesta en línea deseada al punto de ajuste del gobernador.

#### **1.3.3.4 Regulador digital**

Dentro de la última generación se encuentran los reguladores digitales los cuales contienen un número mayor de funciones de control en comparación con los antiguos reguladores de velocidad. Dentro de los principales lazos de control que se incluyen están, velocidad, caudal, potencia, flujo, entre otros. Los reguladores de velocidad digitales poseen una HMI en donde se pueden observar varias gráficas como la potencia, velocidad, apertura y cierre de inyectores y deflectores.

### **1.3.4 REGULACIÓN DE VELOCIDAD**

Un objetivo básico en un sistema eléctrico de potencia es mantener el equilibrio entre generación y demanda. Un parámetro que indica que si se cumple este objetivo es la frecuencia del sistema. Además de operar a una frecuencia estacionaria, es necesario que el sistema opere a una frecuencia nominal, que en el caso del Ecuador es 60 Hz.

#### **1.3.4.1 Regulación primaria [14],[15]**

El principal objetivo de la regulación primaria es corregir las variaciones instantáneas de frecuencia, que se producen por el desequilibrio entre generación y demanda de energía. Para lograr este objetivo se varía la potencia de los generadores. Cada generador realiza regulación primaria, dentro de un tiempo de acción limitado por la inercia de los generadores, turbinas, y motores. Este tiempo se encuentra en un intervalo de 2 a 20 segundos.

Los reguladores de velocidad instalados en los generadores se encargan de la regulación de frecuencia primaria. Esto se logra comparando la velocidad de referencia con la velocidad medida del rotor para posteriormente corregir las posibles desviaciones que se presenten. Para corregir estas desviaciones de velocidad, el regulador aumenta o disminuye la potencia mecánica hasta que la energía producida en un sistema sea igual a la energía consumida (incluyendo pérdidas); y de esta manera se tiene una frecuencia constante.

Un factor importante dentro de la regulación primaria es la cantidad de reserva, que representa el valor que se requiere aumentar o disminuir para corregir una desviación de frecuencia de 200 mHz. Es por esto por lo que una unidad de generación funciona con una potencia de salida inferior al valor nominal máximo, con el objetivo de contribuir al



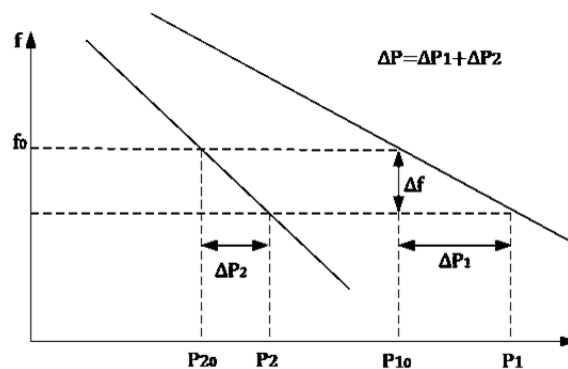
Si la regulación de velocidad tendría una característica lineal, la Ecuación 1.9 sería igual a la Ecuación 1.10, pero en la realidad la regulación no sucede en línea recta, debido a las anomalías en la operación que presentan las válvulas de admisión de combustible y de agua.

Si a un generador, con un valor de regulación  $R_s = 5\%$ , funcionando inicialmente en vacío se le aplica una carga del 100% de potencia nominal, la frecuencia final a la cual se estabilizará la máquina después del aumento será 57 Hz. Es decir 5% menos de la frecuencia de estado inicial (60 Hz). Los valores de regulación de velocidad se encuentran en un intervalo que va del 2% al 6%.

#### 1.3.4.1.1 Repartición de carga entre varios generadores

Cuando operan en paralelo varios generadores la asignación del incremento de carga entre las unidades está determinada por la necesidad que tienen las máquinas de operar de acuerdo con sus características de regulación y a una misma frecuencia.

La Figura 1.13 establece las características de regulación de dos unidades en paralelo. Inicialmente las máquinas están operando con cargas  $P_{10}$  y  $P_{20}$  a una frecuencia  $f_0$  (60 Hz), luego de una variación de carga  $\Delta P$ , las nuevas condiciones de operación serán  $P_1$ ,  $P_2$  y  $f$ .



**Figura 1.13.** Característica de regulación de unidades en paralelo

Analizando la Figura 1.13 se puede concluir que

- Los generadores con una menor regulación toman una carga mayor.
- La frecuencia final es menor a la frecuencia medida al inicio. En el caso que estuviese funcionando un solo generador, la frecuencia final tendría un valor inferior para un mismo incremento de carga  $\Delta P$ .
- La repartición de carga  $\Delta P$  entre las dos unidades se basa estrictamente en sus características de regulación.

Además, se puede encontrar una característica equivalente de las dos máquinas mediante la Ecuación 1.11, ya que:

$$\frac{1}{R_1} = \frac{\Delta P_1}{\Delta f} * \frac{1}{R_2} = \frac{\Delta P_2}{\Delta f} * \frac{1}{R_{eq}} = \frac{\Delta P}{\Delta f} \quad (1.11)$$

Además, se conoce que

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 \quad (1.12)$$

Sustituyendo la Ecuación 1.11 en la Ecuación 1.12 se tiene:

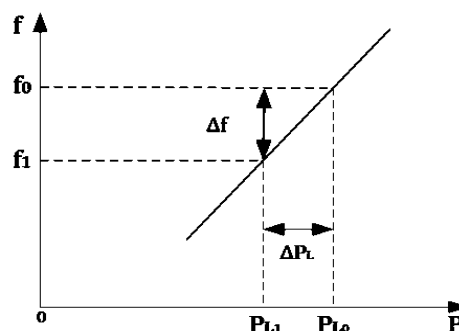
$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{\Delta P_1 + \Delta P_2}{\Delta f} = \frac{\frac{\Delta f}{R_1} + \frac{\Delta f}{R_2}}{\Delta f} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{\Delta P}{\Delta f}$$

Generalizando para  $n$  unidades que operen en paralelo la regulación equivalente está dada por la Ecuación 1.13.

$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \quad (1.13)$$

#### 1.3.4.1.2 Efecto de la carga en la regulación

La carga disminuye si la frecuencia baja y viceversa, es decir, que la carga es directamente proporcional a las variaciones de frecuencia. Esta característica se la puede aprovechar para regular la generación, ya que si se añade una carga  $\Delta P$  al generador, la frecuencia disminuirá. Debido a esta característica la frecuencia varía en un valor igual a  $\Delta f'$  que es menor a  $\Delta f$ , ( $\Delta f$  es el cambio en la frecuencia que se tendría en el caso de que la carga fuese insensible a la frecuencia). El incremento de carga en realidad tendrá el valor de  $\Delta P'$  en vez de  $\Delta P$  ( $\Delta P' > \Delta P$ ). Este efecto es conocido como el amortiguamiento de la carga. La característica f-p de la carga se indica en la Figura 1.14.



**Figura 1.14.** Característica frecuencia-potencia de la carga

Al relacionar la disminución de carga  $\Delta P_L$  con la disminución de la frecuencia ( $\Delta f$ ) se halla una variable denominada amortiguamiento  $D$  de la carga que se expresa como la Ecuación 1.14. Los valores típicos para  $D$  en *p.u.* son 0,5 a 2,0 *p.u.*

$$D = \frac{\Delta P_L}{\Delta f} \quad (1.14)$$

Entonces si se aplica una carga  $\Delta P$  a un generador el cambio final de frecuencia por la acción de la regulación del generador estaría dado por la Ecuación 1.15.

$$\Delta f = \Delta P * R \quad (1.15)$$

Debido al efecto de la carga el cambio efectivo de frecuencia será  $\Delta f'$ , ya que la carga habría disminuido un valor dado por la Ecuación 1.16.

$$\Delta P_L = D * \Delta f' \quad (1.16)$$

El cambio efectivo de carga se expresa en la Ecuación 1.17.

$$\Delta P' = \Delta P - \Delta P_L = \Delta P - D * \Delta f' \quad (1.17)$$

En consecuencia, la desviación de frecuencia que se produce en el generador incluido el efecto de la carga está definido por la Ecuación 1.18.

$$\Delta f' = \frac{R}{\frac{1}{R} + D} * \Delta P \quad (1.18)$$

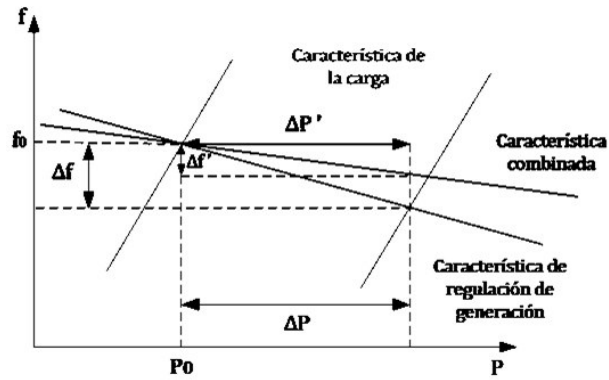
La característica de regulación combinada entre generación y carga  $R'$  se describe en la Ecuación 1.19.

$$\Delta f' = \Delta P' * R' \quad (1.19)$$

$$R' = \frac{1}{\frac{1}{R} + D}$$

La Figura 1.15 explica gráficamente lo descrito.





**Figura 1.15.** Característica combinada generación-carga

Con base en lo establecido, se puede extrapolar a un sistema de potencia que tenga  $n$  generadores, cada uno con una característica de regulación  $R_1, R_2 \dots R_n$ . Si la carga tiene una característica de amortiguamiento  $D$  y se produce un incremento de carga  $\Delta P$  [MW].

La desviación final de frecuencia estará dada por la Ecuación 1.20:

$$\Delta f = \frac{\Delta P}{\frac{1}{Req} + D} \text{ Hz} \quad (1.20)$$

Donde

$$R_i = \frac{\Delta f}{\Delta P_{G1}} \frac{\text{Hz}}{\text{MW}}$$

$$D = \frac{\Delta P_L}{\Delta f} \frac{\text{Hz}}{\text{MW}}$$

La Ecuación 1.21 describe el valor de carga que toma cada generador es:

$$\Delta P = \sum \Delta P_{G1} + D * \Delta f \text{ MW} \quad (1.21)$$

#### 1.3.4.1.3 Regulación primaria en el Sistema Ecuatoriano [2]

De acuerdo con los Procedimientos de Despacho y Operación emitidos por el ARCONEL se tienen los siguientes criterios para la regulación primaria.

Primero se establecen los rangos de frecuencia de operación permitidos que son:

- Cuando no actúan los relés de desconexión instantánea el intervalo de operación permitido está entre 57,5 y 62 Hz.

- Para un período mínimo de 10 s. entre 57,5 y 58 Hz, y entre 61,5 y 62 Hz.
- Para un período mínimo de 20 s. entre 58 y 59 Hz, y entre 61 y 61,5 Hz.
- Sin límite de tiempo, un intervalo de 59 y 61 Hz.

A continuación, se presentan los requerimientos para participar en la regulación primaria de frecuencia del sistema nacional interconectado.

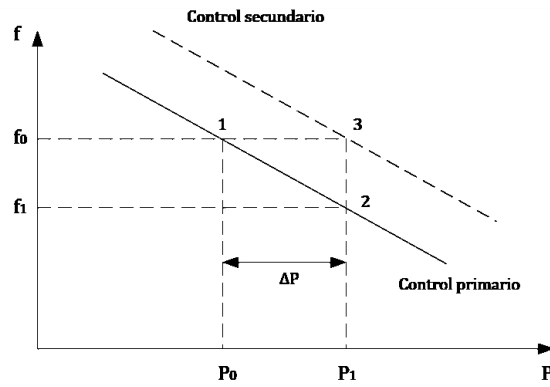
- El estatismo permanente debe estar configurado en un valor entre 4 y 7%.
- La banda muerta se debe ajustar en un valor menor al 0,1% (+/-0,025 Hz).
- El tiempo de establecimiento deberá ser 60 s para máquinas hidráulicas y 30 s para máquinas térmicas.
- El generador determinará el tiempo de establecimiento mínimo tomando en cuenta que este tiempo no debe afectar la estabilidad del sistema.
- La regulación primaria debe actuar dentro de una banda de la frecuencia igual a +/- 0,15 Hz.

#### **1.3.4.2 Regulación secundaria [15],[13]**

Cuando se produce un cambio en la carga, la regulación primaria se encarga de que el sistema recobre el balance entre generación y demanda. Sin embargo, en el sistema se presentan los siguientes efectos no deseados:

- Los flujos de potencias entre las áreas no se cumplirán ya que el reparto de carga de los generadores está afectado por los estatismos.
- La frecuencia no alcanza el valor de referencia.

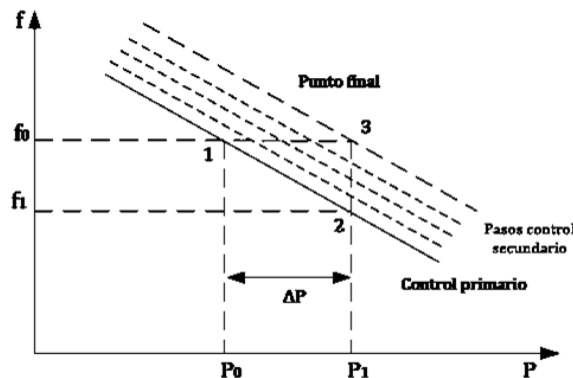
Para comprender de mejor manera como se realiza la regulación suplementaria, se presenta un ejemplo de un generador alimentando al sistema entregando una potencia  $P_0$  con una frecuencia  $f_0$  como se muestra en la Figura 1.16. Luego de transcurrido un tiempo se produce un incremento de carga y esta unidad toma el incremento. Gracias a la regulación primaria, el controlador enviará la consigna de apertura a las válvulas de entrada con el objetivo de incrementar la potencia mecánica de la turbina y por consecuencia se incrementará la potencia eléctrica del generador hasta un valor  $P_1$ . La frecuencia se estabilizará a un valor inferior  $f_1$ . En la Figura 1.16 se puede apreciar que el generador va del punto (1) y se estabiliza en el punto (2), es por esto por lo que se requiere una acción adicional.



**Figura 1.16.** Característica de regulación secundaria

Para retornar la frecuencia al valor original  $f_0$ , se necesita un control secundario. Como se observa en la Figura 1.17, al aplicar el control secundario se desplaza la característica de regulación de forma paralela y se estabiliza la frecuencia en el punto (3). Para conseguir este resultado el generador ha tomado el incremento de carga  $\Delta P$ .

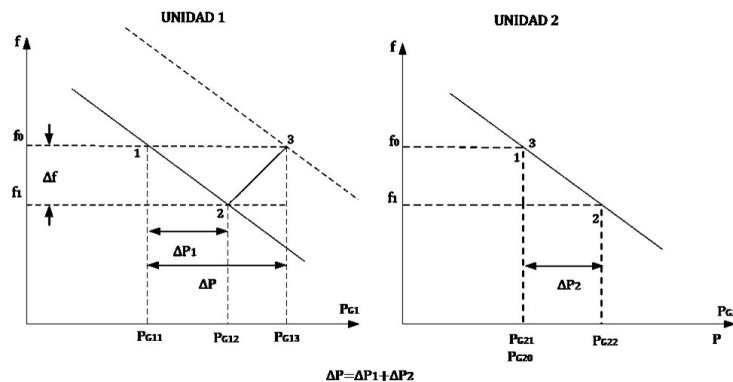
La señal de control secundario hará que las válvulas de admisión se abran, incrementando de esta manera la potencia de salida del generador y como consecuencia se produce un desbalance generación-demanda. Para corregir este desbalance la regulación primaria actúa de nuevo para volver a la potencia inicial, pero a una energía cinética mayor y así sucesivamente, como se ilustra en la Figura 1.17.



**Figura 1.17.** Proceso de regulación de velocidad

Ahora se considera que se tienen dos generadores entregando potencia a un sistema, cuyas condiciones iniciales están definidas por el punto (1). Suponiendo que se realiza un incremento de carga  $\Delta P$  y que por motivos del tipo operativo o económico el incremento de carga  $\Delta P$  puede ser tomado solamente por la unidad 1. Al aumentar una carga  $\Delta P$  al sistema, los dos generadores toman las cargas  $\Delta P_1$  y  $\Delta P_2$  ( $\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2$ ) respectivamente. Debido

a la regulación primaria la frecuencia, las unidades 1 y 2 se estabilizan en el punto (2) de la Figura 1.18 el cual no es una condición de funcionamiento deseado. Para evitar esta condición se requiere una acción secundaria con el fin de redistribuir la carga  $\Delta P$  entre los generadores y llegar a la frecuencia  $f_0$ .



**Figura 1.18.** Características de regulación de unidades conectadas el mismo sistema

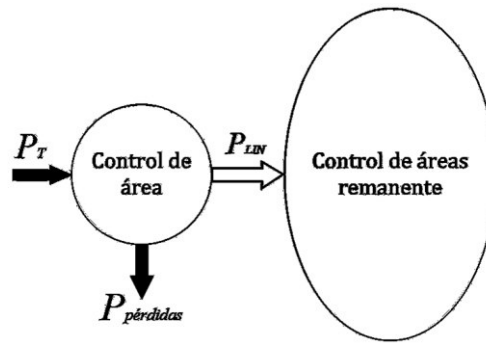
Si se aplica una acción secundaria en el generador 1 la frecuencia se desplazará en forma paralela, y debido a que la operación del sistema debe estar una misma frecuencia para todos los generadores, el generador 2 irá reduciendo su carga por cada paso de regulación secundaria de la máquina 1 hasta que el punto final de operación, sea el punto (3). En conclusión, debido a la regulación secundaria, la máquina 1 toma todo el incremento de carga  $\Delta P$  en tanto que la máquina 2 regresa a su punto inicial de operación.

#### 1.3.4.2.1 Control Automático de Generación

Actualmente, la regulación secundaria se coordina desde un centro de control del sistema. Desde este lugar se mandan señales a los reguladores de velocidad con el fin de corregir la frecuencia y la distribución de carga entre generadores mediante despacho económico.

Dentro de los sistemas interconectados, el AGC es implementado para que cada área tenga su propio regulador central. Como se muestra en la Figura 1.19, el sistema de potencia está en equilibrio si, para cada área, la potencia total de generación  $P_T$ , la potencia de demanda y la potencia neta de líneas que conectan al sistema  $P_{LIN}$  satisface la condición de la Ecuación 1.22. Adicionalmente, cabe mencionar que no todas las unidades de generación en un sistema que realiza AGC necesitan participar en el control secundario. La Ecuación 1.22 se puede ver reflejada en la Figura 1.19.

$$P_T - (P_{LIN} + P_{p\acute{e}rdidas}) = 0 \quad (1.22)$$



**Figura 1.19.** Balance de la potencia en un control de área

El control de frecuencia secundario es mucho más lento que el primario. La activación de toda la gama de reserva secundaria debe hacerse dentro de 15 minutos. La velocidad de regulación depende del tipo de unidad y es necesario que la velocidad de regulación no sea inferior a:

- Generadores de gas o petróleo: 8% de la potencia nominal/minuto;
- Generadores de carbón y lignito: 2–4% de la potencia nominal/minuto;
- Generadores nucleares: 1–5% de la potencia nominal/minuto;
- Generadores hidráulicos: 30% de la potencia nominal/minuto.

#### 1.3.4.2.2 Regulación secundaria de frecuencia en el Sistema Ecuatoriano

El tiempo en el que debe intervenir la regulación de frecuencia secundaria en el sistema ecuatoriano se encuentra dentro del intervalo de 20 a 30 s luego de que ha ocurrido la contingencia. Cuando se quiere determinar la regulación secundaria se deben hacer simulaciones dinámicas, tomando en cuenta un despacho de generación que incluya un porcentaje óptimo de reserva regulante. En estas simulaciones se provoca una contingencia que ocasiona la pérdida de generación. Como consecuencia se tendrá una disminución en la frecuencia del sistema.

Se debe repartir la reserva entre todas las unidades habilitadas para este control, siempre y cuando se cuente con todo el equipamiento requerido para este fin; mientras tanto, se realizará la regulación secundaria desde la Central Hidroeléctrica Paute [2].

## 1.3.5 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE REGULACIÓN DE VELOCIDAD DE LAS UNIDADES DE LA FASE “C”

### 1.3.5.1 Regulador de velocidad mecánico [16]

El sistema de regulación, al que se hace referencia, tiene un conjunto de componentes tanto hidráulicos como mecánicos, estructurados de acuerdo con determinados principios básicos de funcionamiento y los mismos que tienen dos modos de operación dependientes de las condiciones de servicio. En el Anexo G se detallan la disposición de los elementos que conforman el regulador mecánico.

#### 1.3.5.1.1 Unidad motor-bomba

El sistema cuenta con dos grupos motor bomba de eje horizontal y que tienen la capacidad de funcionamiento individual o en conjunto. El motor es de tipo asíncrono trifásico a 460 V. y con una capacidad de 20,5 KW. Está acoplado a una bomba de tipo de engranaje Fase AB y bomba de tornillo Fase C.

#### 1.3.5.1.2 Tanque acumulador

El tanque acumulador del sistema de regulación, que tiene una forma rectangular, tiene una capacidad total de 2,6 m<sup>3</sup> Fase AB y 3 m<sup>3</sup> Fase C. En su interior existe una división en dos secciones que se encuentran separadas por un filtro cubierto de malla y un serpentín de enfriamiento. En la primera sección está el depósito del aceite al cual se conectan las unidades de bombeo y la segunda sección recibe el aceite de retorno y drenaje del circuito oleodinámico. El tanque se puede observar en la Figura 1.20.



**Figura 1.20.** Tanque acumulador

#### 1.3.5.1.3 Tanque de presión aire/aceite

Este tanque consiste en un cuerpo cilíndrico de extremos convexos. Sus dimensiones son 800 mm diámetro interior para la Fase AB y 1100 mm para la Fase C. Tienen una altura de 2500 mm lo que permite un volumen útil de 1,15 m<sup>3</sup> para la fase AB y altura de 2700 mm con un volumen de 2,35m<sup>3</sup> para la Fase C. Están diseñados para soportar una presión de prueba de 45 Kg/cm<sup>2</sup>.

Cada tanque de presión está provisto de tres válvulas principales. La primera válvula sirve para el circuito de alimentación de aire hacia la parte superior desde el tanque auxiliar. La segunda válvula se utiliza para el drenaje del aceite desde la parte inferior del tanque. La tercera válvula es la que va hacia el circuito general a través de la válvula 20Q. El tanque de presión se muestra en la Figura 1.21.



**Figura 1.21.** Tanque de presión aire/aceite

#### 1.3.5.1.4 Válvula de corte 20Q

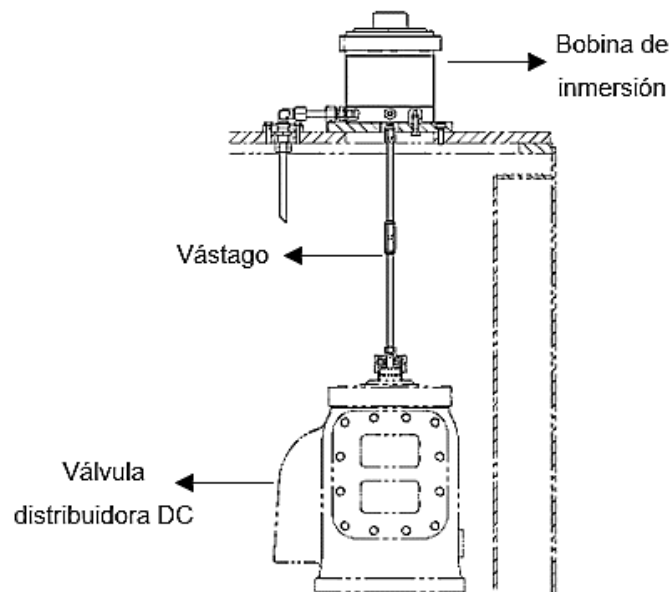
Esta válvula se encuentra ubicada en la salida del tanque de aceite a presión y puede permitir o bloquear el paso de aceite a presión. Tiene un comando hidráulico dado por la válvula solenoide 20GO. La válvula solenoide puede actuarse manualmente en caso de pruebas o mantenimiento.

#### 1.3.5.1.5 Válvula de distribución principal DC

Mediante la válvula de distribución principal DC se realiza la regulación de presión en el rango de 0 a 28 kg/cm<sup>2</sup> y se controla el posicionamiento del servomotor de los deflectores de la turbina. La válvula de distribución opera cuando se producen variaciones que al ser censadas por la bobina de inmersión mueven su actuador que está mecánicamente conectado al pistón piloto que controla la posición de la válvula DC.

#### 1.3.5.1.6 Bobina de inmersión

Esta bobina permite el control de la posición de los inyectores y deflectores. Actúa sobre la válvula de distribución principal DC con el objetivo de mantener a la unidad girando a una velocidad de 360 rpm. En la Figura 1.22 se observa la bobina de inmersión con sus partes.



**Figura 1.22.** Bobina de inmersión y válvula distribuidora DC

#### 1.3.5.1.7 Válvula de paro de emergencia iQC1

Esta válvula es de emergencia y va unida a la válvula de distribución principal DC. Su función es controlar el paso de aceite hacia el servomotor de los deflectores permitiendo así su operación. La válvula iQC1 está controlada por la válvula iQC4. A su vez la válvula iQC4 es accionada por la apertura de la válvula solenoide 20TBS siempre y cuando no se haya presentado una anomalía en la válvula de sobrevelocidad 12i. A través de la presión de aceite sobre la cámara superior de la válvula iQC1 se logra superar la presión que ejerce el



resorte que se encuentra en la cámara inferior. De esta forma se logra que se logra la apertura permitiendo así el paso del aceite hasta el servomotor de accionamiento de los deflectores.

#### 1.3.5.1.8 Inyectores

Los inyectores tienen un pistón accionado por un servomotor que funciona de acuerdo con la presión ejercida. Esta presión crea una fuerza contraria a la resistencia del resorte para poder mantener cerrados los inyectores. Los inyectores poseen una aguja cuya posición va en concordancia con la posición de los deflectores.

El recorrido de la aguja va desde una longitud de 0 a 130 mm. Los inyectores están controlados por la válvula Rexroth de Bosch que se encuentra dispuesta en cada uno de ellos y mediante su accionar permite un control independiente de cada inyector. La Figura 1.23 muestra la disposición de las válvulas en los inyectores.



**Figura 1.23.** Válvula control para cada inyector

La característica más relevante en el control de velocidad es la optimización individual del número de inyectores de acuerdo con el nivel de potencia de salida. Tomando en cuenta los inyectores disponibles y la simetría que deben tener los chorros de agua sobre el rodete, existen cuatro formas de operación que son: dos, tres, cuatro y seis inyectores. Estas secuencias de operación permiten un equilibrio y simetría de fuerzas que actúan sobre el rodete. En cada forma de operación se tienen varias opciones de combinación, esto permite que los inyectores se desgasten uniformemente. En la Tabla 1.3 se observan las posibles alternativas de funcionamiento de la turbina. Estos datos corresponden a los datos típicos de

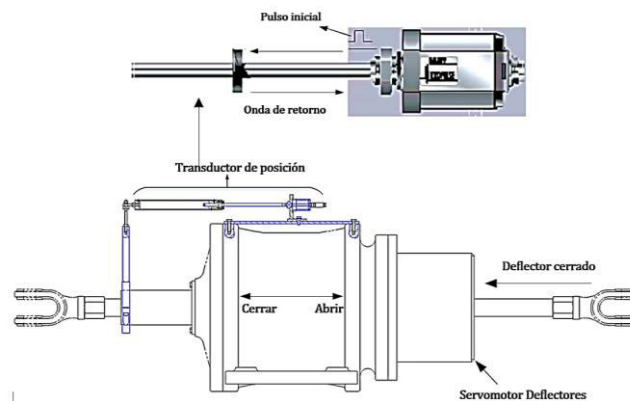
las turbinas Pelton obtenidos en otras centrales, pero en un futuro se debe realizar un estudio particular para la turbina de la unidad 7.

**Tabla 1.3.** Configuración típica del funcionamiento de los inyectores

Número de Inyectores	Alternativas	Inyectores activos	Eficiencia
2	3	1 y 4; 2 y 5; 3 y 6	8% - 30%
3	2	1, 3 y 5; 2, 4 y 6	31% - 42%
4	3	1, 2, 4 y 5; 1, 3, 4 y 6; 2, 3, 5 y 6	43% - 59%
6	1	1, 2, 3, 4, 5 y 6	60% - 100%

### 1.3.5.1.9 Deflectores

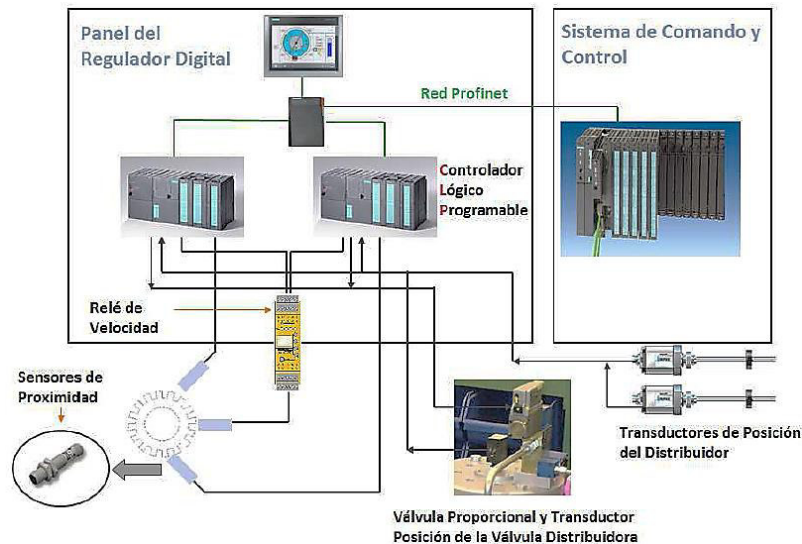
Los deflectores poseen un pistón de accionamiento doble, su posición va de acuerdo con la presión variable generada en la válvula DC. La presión varía de 0 a 28 kg/cm<sup>2</sup>, y el pistón tiene una carrera de 0 a 230 mm. En la Figura 1.24 se indica la posición en la que se instalan el transductor de los servomotores.



**Figura 1.24.** Servomotor de control de los deflectores

### 1.3.5.2 Regulador digital HyCon GC443R [17]

El hardware del controlador digital HyCon GC443R consta de: controladores lógico-programables, paneles HMI que permiten la interacción de manera local, equipos de medición y conversión de señales y los amplificadores de las salidas. En la Figura 1.25 se detallan los componentes del regulador HyCon GC443R.



**Figura 1.25.** Regulador digital HyCon GC443R

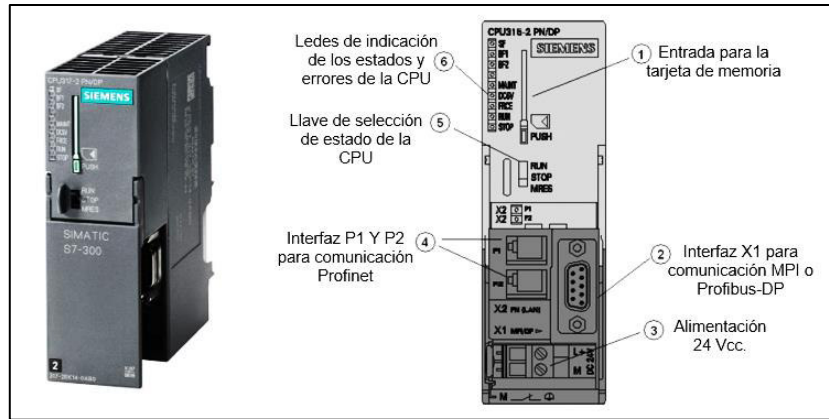
El controlador lógico programable consiste en componentes estándares, de una alta calidad industrial, los cuales se citan a continuación:

- Fuente de alimentación redundante
- Procesador, con programa y memoria de datos
- Módulos de entrada / salidas binarias
- Módulos de entrada / salidas analógicas con contador

El regulador no emplea elementos de almacenamiento que tienen partes móviles debido a la alta seguridad que debe existir. El usuario almacena el software en una memoria de almacenamiento no volátil que funciona como una memoria ROM pero que se puede borrar y reprogramar (EEPROM). Esto garantiza que no se pierda el programa si existiera un fallo de tensión. Los principales componentes del regulador de velocidad son:

#### 1.3.5.2.1 CPU

Se encarga de almacenar el software del regulador de velocidad, así como de la comunicación con la HMI, comunicación que se la hace utilizando los protocolos Profibus-DP o MPI. En la Figura 1.26 se indican las principales partes del CPU.



**Figura 1.26.** CPU del regulador de velocidad.

*1.3.5.2.2 Módulo de entradas y salidas digitales*

Este módulo tiene como objetivo recibir y enviar respuestas de comando. El módulo de entrada y salida digital tiene como función el recibimiento/respuesta de comandos mediante las conexiones entre el mando y el control. También tiene como función enviar el comando para el cambio entre el PLC principal y el de respaldo.

*1.3.5.2.3 Módulos de entradas y salidas analógicas*

**SM 331:** La función de esta tarjeta de entrada del tipo analógica es recibir las señales de los transductores para posteriormente procesarlos en la CPU.

**SM 332:** Se encarga del mando de la válvula proporcional, así como del envío del software para el mando y control.

**FM 350:** Este módulo es un contador el cual recibe las señales del sensor de velocidad registrando así la frecuencia de rotación. Los tres módulos tienen la forma de la Figura 1.27.



**Figura 1.27.** Módulos de entrada y salida

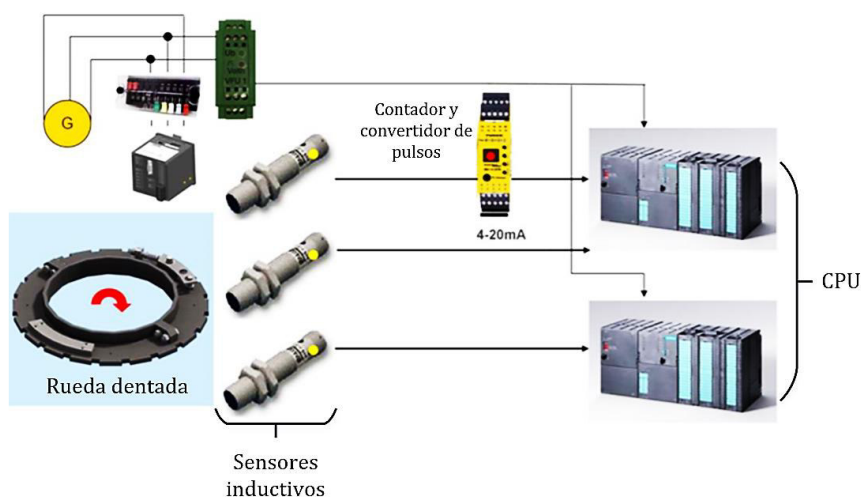
#### 1.3.5.2.4 Medición de velocidad

Los elementos utilizados en la medición de velocidad son los siguientes:

- Rueda dentada
- Sensores inductivos
- Contador y convertidor de pulsos
- Entrada contadora

Para medir la velocidad se usan tres sensores inductivos de proximidad los cuales se encuentran ubicados en una rueda dentada en el generador. Estos sensores crean una señal cuadrada, cuya amplitud es independiente de la velocidad de la turbina. Posteriormente, se utiliza un contador para convertir la onda en una señal de corriente de 4 mA (posición cerrada) y 20 mA (posición abierta), a su equivalente en velocidad cuya escala es de 0% a 200% y de 90% a 110% de la velocidad nominal. Para asegurar la redundancia en el sistema adicionalmente incluye dos sensores que van conectados a la entrada del contador del PLC. La posición del distribuidor es medida por un transductor ultrasónico.

**Detección de velocidad:** En la detección de la velocidad se usan 3 sensores inductivos de proximidad que se instalan en el eje del generador, específicamente en la rueda dentada. Estos sensores generan una señal de onda cuadrada en la salida cuya velocidad es independiente de la velocidad de la turbina; esta onda es convertida en una señal de corriente de 4 a 20 mA. El regulador cumple con la característica de redundancia, para que esto se cumpla se conectan dos sensores a la entrada del tipo contadora del PLC. Los componentes implicados en la medición de velocidad se muestran en la Figura 1.28.



**Figura 1.28.** Componentes del regulador digital

**Transductor de potencia:** Se cuenta con un transductor, con una precisión de 25%, que recibe la señal de potencia y corriente y la convierte en una señal proporcional de 2 a 10 VCC o de 2 a 4 a 20 mA; este transductor está instalado en el panel del regulador.

**Panel de operación local:** Este panel es utilizado para operar el regulador de la turbina. Cuenta con un panel de operación con pantalla táctil (HMI) como el mostrado en la Figura 1.29. El panel de operación (HMI) está conectado con el canal del regulador de turbina digital a través de una interfaz Profinet. El panel de operación local del regulador de velocidad está instalado en la puerta del tablero del regulador. En la Figura 1.29 se indica el panel de control descrito.



**Figura 1.29.** Panel de control siemens

### 1.3.5.3 Características y funciones del regulador

#### 1.3.5.3.1 Regulación de velocidad

Se cuenta con un controlador del tipo PID en el que están considerados tres conjuntos de parámetros: para marcha en vacío, operación interconectada y funcionamiento aislado. El regulador de velocidad puede actuar en tres casos:

- Cuando funciona en una red aislada, el valor real de la velocidad corresponde al valor de consigna de la señal.
- En red interconectada, la regulación de velocidad contribuye a la regulación de frecuencia de la red. Esto se logra a través del estatismo permanente y de las características dinámicas del sistema regulado.
- En el caso de que la máquina esté funcionando en marcha en vacío (antes de la sincronización y después de la desconexión de la red), la velocidad real corresponde a la señal de consigna o a la frecuencia existente en la red.

#### *1.3.5.3.2 Regulación de apertura/caudal*

Esta forma de funcionamiento es posible cuando la máquina se encuentra conectada a la red es decir cuando se ha producido la sincronización. El valor de la consigna de apertura se compara con el límite de apertura mediante una compuerta de valores mínimos. El valor resultante de esta comparación se envía al lazo que regula la posición de las compuertas. Esta regulación tiene como objetivo mantener constante el nivel, la apertura o el caudal.

#### *1.3.5.3.3 Regulación de potencia*

Este lazo de control es incluido con el objetivo de que la turbina garantice la respuesta rápida a los cambios de potencia. El valor de la potencia sigue a la consigna de referencia a una velocidad determinada por el controlador PID y los elementos de regulación. Esta velocidad es relativamente lenta.

El regulador posee la opción de incluir la influencia de la frecuencia al mismo tiempo que se controla la potencia. De esta manera se logra también, mantener la frecuencia de la red dentro de los límites adecuados. Esto se consigue con la inclusión de un bloque sumador que permite la unión de los lazos de regulación de velocidad y potencia. Este funcionamiento es típico cuando se trabaja con redes débiles.

#### *1.3.5.3.4 Conmutación suave*

Se realiza un seguimiento de los elementos de regulación que no se encuentran activos para poder garantizar una conmutación suave cuando se requiera.

#### *1.3.5.3.5 Detección de red aislada*

Cuando el generador se encuentra conectado al sistema el regulador revisa constantemente la banda de velocidad. Cuando el generador no se encuentra dentro de la banda de velocidad adecuada el regulador cambia al modo de control de velocidad y los parámetros cambian al funcionamiento de red aislada.

#### *1.3.5.3.6 Limitadores*

*Limitación de apertura:* La limitación de apertura (caudal) puede ajustarse a discreción, p. ej. a fin de limitar temporalmente la potencia del generador, pero se suele ajustar la misma a 100%. La limitación de apertura (Caudal) es efectiva bajo todos los modos de regulación incluso durante el proceso de arranque.

*Apertura máxima:* La apertura de los inyectores puede delimitarse mediante una limitación máxima invariable (puede alterarse a través de la entrada de parámetros) para evitar aperturas mayores.

*Apertura mínima:* Adicionalmente es posible una limitación mínima, que es operativa una vez se haya conectado el interruptor del generador.

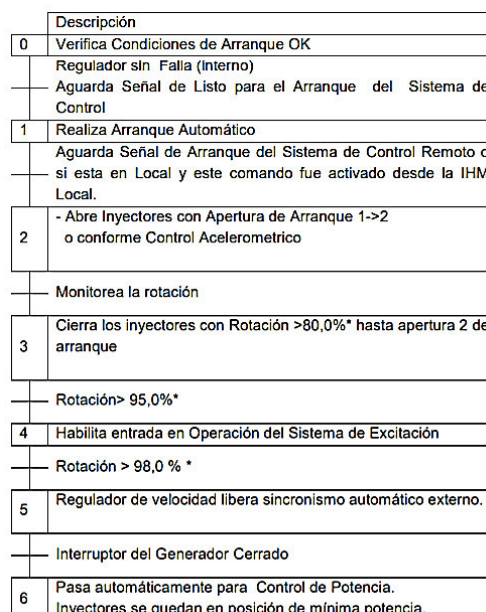
### 1.3.5.3.7 Proceso de arranque con control de carga

La turbina tiene dos formas de arranque que son:

- Apertura programada de los inyectores
- Control de la aceleración de la turbina.

Cuando se realiza un arranque acelerométrico el regulador controla la aceleración desde que el generador se encuentra en reposo hasta que alcanza la velocidad nominal. Luego de un tiempo en que se ha alcanzado un límite de velocidad el regulador emite una señal para que se conecten el sincronizador y la excitatriz. Una vez sincronizado el generador, el regulador activará automáticamente el lazo que controla la potencia.

En la Figura 1.30 se presenta la secuencia en la que ocurre el arranque del generador. Los valores marcados con asterisco se refieren a valores parametrizados vía HMI y pueden ajustarse en el comisionamiento.



**Figura 1.30.** Secuencia de arranque del regulador de una turbina Pelton.



### 1.3.5.3.8 Proceso de parada con control de carga

Cuando se realiza una parada normal los inyectores se cierran hasta que alcanzan la posición de marcha en vacío. Luego de alcanzar esta posición, se envía una señal para que se desconecte el interruptor del generador, finalmente, los inyectores son cerrados en un 100%. Cuando se produce un fallo, los deflectores se cierran inmediatamente y los inyectores se cierran después de un tiempo adecuado para que no se presenten anomalías en el conducto. En la Figura 1.31 se muestra el proceso de parada.

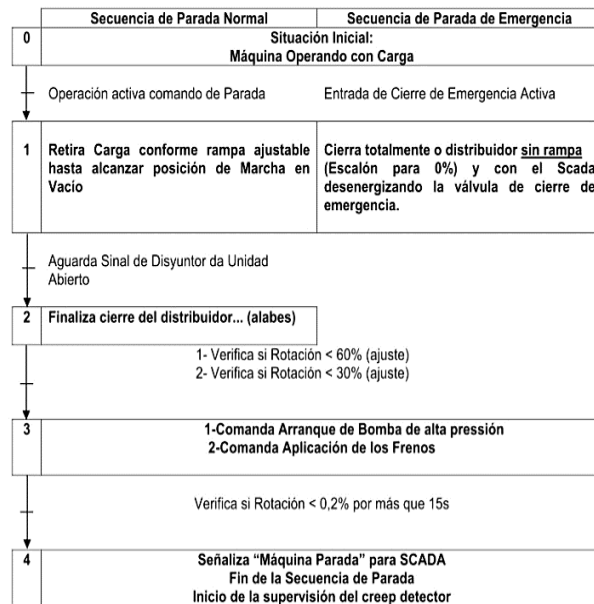


Figura 1.31. Procedimiento de parada del regulador de velocidad para una turbina Pelton

## 2 MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL SISTEMA DE REGULACIÓN DE VELOCIDAD

### 2.1 TEORÍA DE SISTEMAS DE CONTROL [18],[19]

Para analizar y diseñar los sistemas de control primeramente se debe realizar un modelado matemático del proceso que se está regulando. Para ello se definen variables que interpretan y describen la dinámica del proceso en estudio. Los sistemas de control se encuentran conformados por objetivos de control, componentes del sistema de control y resultados.

#### 2.1.1 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

La función de transferencia de un sistema lineal que no varía en el tiempo está definida por la transformada de Laplace de la respuesta un impulso, considerando las condiciones iniciales

iguales a 0. Considerando que  $G(s)$  es la función de transferencia con entrada  $u(t)$  y salida  $y(t)$ , y respuesta del impulso  $g(t)$ . La función de transferencia  $G(s)$  se define como la Ecuación 2.1:

$$G(s) = \mathcal{L}[g(t)] \quad (2.1)$$

$G(s)$  está relacionada transformada de Laplace mediante la Ecuación 2.2

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (2.2)$$

Donde  $Y(s)$ ,  $U(s)$  son las transformadas de Laplace de  $y(t)$  y  $u(t)$ .

En la práctica, la relación entrada-salida de un sistema, está descrito por la ecuación diferencial por lo que conviene obtener la función  $G(s)$  desde la ecuación diferencial. Considerando que la relación entrada-salida de un sistema se representa a través de la siguiente ecuación diferencial de orden  $n$  y coeficientes reales y constantes  $a$  y  $b$  se tiene la Ecuación 2.3 :

$$\begin{aligned} \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) \\ = b_m \frac{d^m u(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} u(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{du(t)}{dt} + b_0 u(t) \end{aligned} \quad (2.3)$$

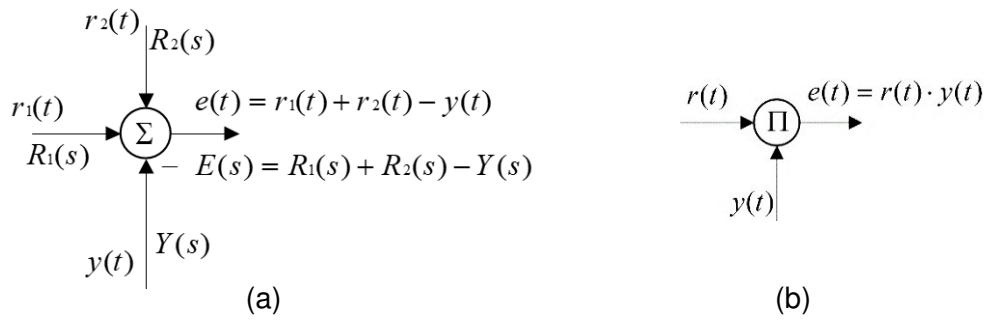
Estas ecuaciones diferenciales no suelen usarse para analizar y diseñar sistemas de control, en vez de estas ecuaciones se usan funciones de transferencia. Para obtener dichas funciones, se realiza, ambos lados de la Ecuación 2.3, la transformada de Laplace, dando como resultado Ecuación 2.4.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (2.4)$$

### 2.1.2 DIAGRAMAS DE BLOQUE

Los diagramas de bloques, junto con funciones de transferencia, se utilizan para describir las relaciones de causa y efecto en todo el sistema. Una vez conocida la relación matemática y funcional de los componentes del sistema, se utilizan diagramas de bloques para obtener la solución analítica del sistema.

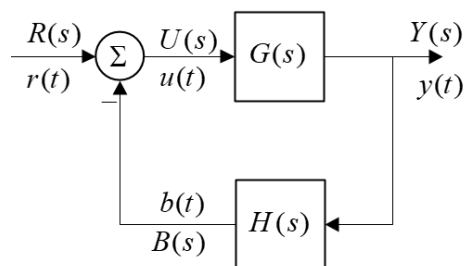
Uno de los elementos de gran importancia en un sistema de control es el dispositivo detector que funciona como un punto de unión para la comparación de señales. De manera general, los elementos detectores efectúan operaciones matemáticas como suma, resta, multiplicación, y combinaciones de ellas como se ilustra en la Figura 2.1.



**Figura 2.1.** Elementos básicos del diagrama de bloques(a) suma y resta (b) multiplicación.

La suma y la resta representan operaciones lineales, por lo que las variables de entrada y salida pueden ser variables en el dominio del tiempo y en términos de la transformada de Laplace como se indica en la Figura 2.1 (a). La operación de multiplicación indicada en la Figura 2.2 (b) es del tipo no lineal, por lo tanto, la relación entrada-salida tiene un significado solamente en el dominio del tiempo. En el dominio de Laplace se debe leer como:  $E(s) = R(s) * Y(s)$ . Donde el símbolo  $*$  representa la convolución entre  $R(s)$  y  $Y(s)$ .

Los sistemas de control lineal pueden ser representados por diagramas de bloques formados por puntos de suma, puntos de ramificación y bloques. Cuando se realiza una realimentación de la salida al punto de suma de tal forma que se compare con la entrada, se debe convertir la forma de la señal de salida de manera que tenga la misma forma de la señal de entrada. Esta conversión se consigue mediante el elemento de realimentación. La función del elemento de realimentación es modificar la señal de salida previo a ser comparada con la señal de entrada. Al comparar la salida del sensor con la entrada se genera una señal de error, como se indica en la Figura 2.2.



**Figura 2.2.** Sistema de control realimentado

Para el sistema que aparece en la Figura 2.2, la salida  $Y(s)$  y la entrada  $R(s)$  se relacionan del modo siguiente:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (2.5)$$

A la función de la Ecuación 2.5 se la denomina función de transferencia en lazo cerrado.

## 2.2 SISTEMA DE REGULACIÓN DE VELOCIDAD

### 2.2.1 MODELO DEL GENERADOR SINCRÓNICO [20]

A continuación, se desarrolla la función de transferencia de generador considerando el acoplamiento eje-turbina de un generador síncrono que gira bajo la influencia del par mecánico  $T_m$  proveniente de la turbina que acelera al eje y el par electromagnético  $T_e$  que frena el eje. Esto se indica en la Ecuación 2.6.

$$J \frac{d^2 \theta_r}{dt^2} = (T_m - T_e) \quad (2.6)$$

Siendo:

$J =$  momento de inercia

$\theta_r =$  ángulo del rotor

En la Ecuación 2.7 antes mencionada se puede reemplazar la segunda derivada

$$\frac{d^2 \theta_r}{dt^2} = \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{d(\omega_r - \omega_o)}{dt} = \frac{d\Delta\omega_r}{dt} \quad (2.7)$$

Donde

$\omega_r =$  velocidad del rotor

$\omega_o =$  velocidad de referencia

$\Delta\omega_r =$  desviación de velocidad

De esta forma la Ecuación 2.7 quedaría de la siguiente forma:

$$\frac{d\Delta\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (T_m - T_e)$$

Considerando a la potencia nominal del generador como la potencia base  $S_{base}$ , la frecuencia referencial como frecuencia base  $\omega_{base}$ , y el torque base se expresa como la Ecuación 2.8.

$$T_{base} = \frac{S_{base}}{\omega_{base}} \quad (2.8)$$

Se divide los elementos de la Ecuación 2.9 para obtener valores unitarios:

$$\frac{d\Delta\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H} (T_m - T_e) \quad (2.9)$$

Donde:

$$H = \frac{\frac{1}{2}J\omega_{base}^2}{S_{base}}$$

$H = \text{constante de inercia}$

La constante de inercia representa la energía cinética acumulada en el eje a la velocidad de sincronismo.

$$\frac{d\Delta\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H}(T_m - T_e) \quad (2.10)$$

Debido a que el sistema de control regula la potencia eléctrica, es conveniente expresar la Ecuación 2.10 en términos de potencia en vez de par. Para lograr esto es necesario recordar cómo se relaciona la potencia y el par  $P = \omega_r T$ . Considerando además una pequeña desviación de un estado inicial determinado por el subíndice "0", se tiene la Ecuación 2.11.

$$P_0 + \Delta P = (\omega_0 + \Delta\omega_r)(T_0 + \Delta T) \quad (2.11)$$

Si se toman sólo los incrementos, y se desprecian los de segundo orden se llega a la Ecuación 2.12.

$$\Delta P = (\omega_0 \Delta T + T_0 \Delta\omega_r) \quad (2.12)$$

Luego en el eje:

$$\Delta P_m + \Delta P_e = \omega_0(\Delta T_m - \Delta T_e) + (T_{m0} + T_{e0})\Delta\omega_r$$

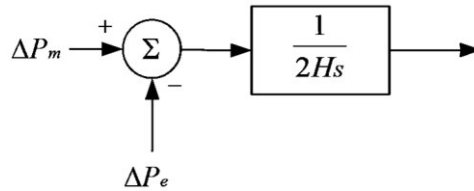
En régimen permanente  $T_{m0} = T_{e0}$ , y en por unidad  $\omega_0$ , por lo que queda la Ecuación 2.13.

$$\Delta P_m + \Delta P_e = \Delta T_m - \Delta T_e \quad (2.13)$$

Tomando en cuenta pequeñas variaciones alrededor del régimen permanente, la Ecuación 2.10 se puede escribir como la Ecuación 2.14.

$$\frac{d\Delta\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H}(\Delta P_m + \Delta P_e) \quad (2.14)$$

La Ecuación 2.14 es conocida como la Ecuación de Oscilación de la máquina síncrona, en la Figura 2.3 se presenta el diagrama de bloque asociado a esta ecuación:



**Figura 2.3.** Función de transferencia entre la potencia y la frecuencia

### 2.2.1.1 Respuesta de la carga a una desviación de frecuencia

La relación entre el aumento de demanda total  $\Delta P_e$  producido por cargas (como lámparas incandescentes para iluminación) y el aumento de frecuencia en un sistema (producido por cargas como grupos de ventiladores y bombas) puede expresarse en la Ecuación 2.15.

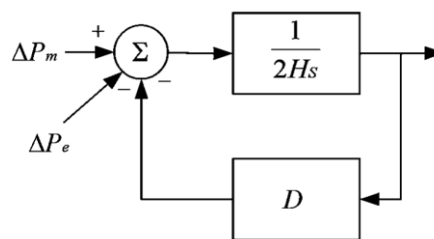
$$\Delta P_e = \Delta P_l + D\Delta\omega_r \quad (2.15)$$

Donde

$\Delta P_l$  = aumento de potencia independiente de la frecuencia,

$D$  = constante de amortiguamiento de la carga.

La constante  $D$  actúa como un mecanismo de amortiguamiento de la variación de frecuencia. El incremento de frecuencia  $\Delta\omega_r$  produce un aumento de la demanda  $D\Delta\omega_r$  que es opuesto al aumento de frecuencia inicial [11]. La Figura 2.4 representa la función de transferencia del generador con el efecto de la carga.



**Figura 2.4.** Función de transferencia de generador incluyendo la carga

### 2.2.2 MODELO DE LA TURBINA PELTON

Dentro de las características de la columna de agua que inciden en el rendimiento de una turbina hidráulica están: los efectos de la compresibilidad e inercia del agua, y la elasticidad de la pared del tubo la compuerta.

La inercia del agua provoca cambios en el flujo de la turbina, de tal forma que se ralentiza los cambios en la apertura de la compuerta de la turbina. La elasticidad en una turbina se puede ver reflejada en la formación de ondas viajeras de presión y flujo en el conducto; a este fenómeno se le conoce como golpe de ariete.

El modelado preciso de las turbinas hidráulicas requiere la inclusión de los reflejos de onda de las líneas de transmisión similares a las producidas en el conducto de las paredes elásticas. La velocidad a la cual se propagan estas ondas es de  $1200 \text{ m/s}$  por lo que los modelos de ondas viajeras son necesarios si las tuberías de presión tienen una longitud larga

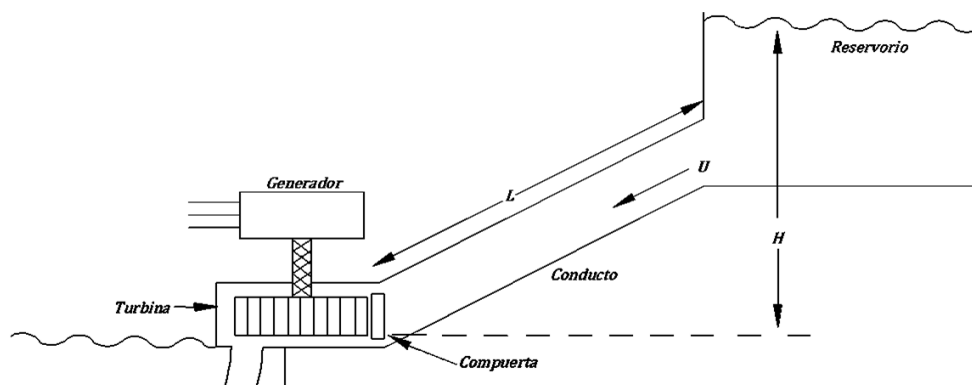
Primero se determinarán los modelos de la turbina hidráulica y el sistema de las compuertas sin considerar un embalse de compensación y eliminando el efecto de las ondas viajeras, en un segundo desarrollo se contempla los efectos del embalse de compensación y el golpe de ariete.

### 2.2.2.1 Función de transferencia de la turbina hidráulica

Para representar la turbina utilizada en los estudios de estabilidad es importante tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- La resistencia hidráulica tiene un valor cercano a cero, por lo que se puede despreciar.
- El conducto forzado carece de elasticidad y el agua no es compresible.
- La apertura de la compuerta es directamente proporcional a la velocidad del agua y a la raíz cuadrada de la altura de caída de agua.
- La potencia entregada de la turbina es directamente proporcional al producto del flujo de agua y la altura de la caída de agua.

En la Figura 2.5 se indican los componentes de la planta hidráulica.



**Figura 2.5.** Esquema de una planta hidroeléctrica

Las propiedades de la columna de agua y de la turbina se definen por las siguientes ecuaciones:

- Velocidad de agua en el conducto forzado
- Potencia mecánica de la turbina
- Aceleración de la caída del agua

### 2.2.2.1.1 Velocidad del agua

En la Ecuación 2.16 se determina la velocidad del agua en una tubería:

$$U = K_u G \sqrt{H} \quad (2.16)$$

Donde

$U$  =Velocidad del agua

$G$  =Posición del distribuidor

$H$  =Salto

$K_u$ =constante de proporcionalidad

Si se consideran pequeñas variaciones alrededor del punto de operación se tiene la Ecuación 2.17.

$$\Delta U = \frac{\partial U}{\partial H} \Delta H + \frac{\partial U}{\partial G} \Delta G \quad (2.17)$$

Reemplazando la Ecuación 2.17 con las derivadas parciales y realizando la división para  $U_0 = K_u G_0 \sqrt{H_0}$  queda:

$$\frac{\Delta U}{U_0} = \frac{\Delta H}{2H_0} + \frac{\Delta G}{G_0}$$

o

$$\Delta \bar{U} = \frac{1}{2} \Delta \bar{H} + \Delta \bar{G} \quad (2.18)$$

El subíndice "0" indica que se tratan de valores iniciales en estado estacionario, en tanto el prefijo indica pequeñas desviaciones, y finalmente el superíndice "-" indica que son cantidades referidas a la base.



### 2.2.2.1.2 Potencia mecánica de la turbina

Para hallar la potencia mecánica de la turbina se debe considerar que es directamente proporcional al producto del flujo y la presión; y se expresa en la Ecuación 2.19 de la siguiente manera:

$$P_m = K_p H U \quad (2.19)$$

Considerando pequeños desplazamientos, y dividiendo ambos lados por  $P_m = K_p H_0 U_0$  se tiene:

$$\frac{\Delta P_m}{P_{m0}} = \frac{\Delta H}{H_0} + \frac{\Delta U}{U_0}$$

o

$$\Delta \bar{P}_m = \Delta \bar{H} + \Delta \bar{U} \quad (2.20)$$

Sustituyendo la Ecuación 2.18 en la Ecuación 2.20 conducen a las Ecuaciones 2.21 y 2.22.

$$\Delta \bar{P}_m = 1,5 \Delta \bar{H} + 2 \Delta \bar{G} \quad (2.21)$$

$$\Delta \bar{P}_m = 3 \Delta \bar{U} - 2 \Delta \bar{G} \quad (2.22)$$

### 2.2.2.1.3 Aceleración de la columna de agua

Utilizando la segunda Ley de Newton, se determina la aceleración de la columna de agua como resultado del cambio en la caída de la turbina. Esto se expresa en la Ecuación 2.23.

$$(\rho LA) \frac{\partial \Delta U}{\partial t} = -A(\rho a_g) \Delta H \quad (2.23)$$

Donde:

$L$ =largo del conducto

$A$ =área de la tubería de presión

$\rho$ =densidad

$a_g$ = aceleración de la gravedad

$\rho LA$ = masa de agua en el conducto

$\rho a_g \Delta H$ = cambio incremental en la presión sobre el distribuidor

$t$ =tiempo en segundos

Dividiendo ambos lados para  $A(\rho a_g) H_0 U_0$ , la Ecuación 2.23 en forma normalizada se convierte en la Ecuación 2.24.

$$\frac{LU_0}{a_g H_0} \frac{d}{dt} \left( \frac{\Delta U}{U_0} \right) = -\frac{\Delta H}{H_0} \quad (2.24)$$

o se puede expresar a través de la Ecuación 2.25.

$$T_w \frac{d\Delta\bar{U}}{dt} = -\Delta\bar{H} \quad (2.25)$$

Donde por definición se tiene

$$T_w = \frac{LU_0}{a_g H_0}$$

El término  $T_w$  se refiere al tiempo requerido por una caída  $H_0$  para acelerar el agua en el conducto desde la parada de la unidad hasta alcanzar una velocidad  $U_0$ . Esto debería notarse cuando  $T_w$  varía con una carga. Típicamente  $T_w$  a una carga máxima se encuentra en un intervalo 0,5s y 4s.

A partir de las Ecuaciones 2.18 y 2.25, se puede determinar la relación que existe entre la variación en la velocidad y la variación en la posición de la compuerta como se muestra en la Ecuación 2.26.

$$T_w \frac{d\Delta\bar{U}}{dt} = 2(\Delta\bar{G} - \Delta\bar{U}) \quad (2.26)$$

Expresándose en términos del operador  $s$  (Laplace) se tendría la Ecuación 2.27.

$$T_w s \Delta\bar{U} = 2(\Delta\bar{G} - \Delta\bar{U}) \quad (2.27)$$

Ordenando la Ecuación 2.27 para poder expresar en términos de entrada y salida, se tendría la Ecuación 2.28.

$$\Delta\bar{U} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} T_w s} \Delta\bar{G} \quad (2.28)$$

Sustituyendo por  $\Delta\bar{U}$  de la Ecuación 2.18 en la Ecuación 2.22 se puede escribir la Ecuación 2.29.

$$\frac{\Delta\bar{P}_m}{\Delta\bar{G}} = \frac{1 - T_w s}{1 + \frac{1}{2} T_w s} \quad (2.29)$$

La Ecuación 2.29 es la función de transferencia de una turbina hidráulica. A partir de esta ecuación se deduce de qué manera cambia la potencia de la turbina, cuando se produce a una variación en la apertura de la compuerta para una turbina ideal.

#### 2.2.2.1.4 Turbina no ideal

Para hallar la función de transferencia de una turbina no ideal es necesario considerar las siguientes expresiones:

$$\Delta\bar{U} = a_{11}\Delta\bar{H} + a_{12}\Delta\bar{\omega} + a_{13}\Delta\bar{G} \quad (2.30)$$

$$\Delta\bar{P}_m = a_{21}\Delta\bar{H} + a_{22}\Delta\bar{\omega} + a_{23}\Delta\bar{G} \quad (2.31)$$

La Ecuación 2.30 se refiere a una perturbación en la velocidad del agua y la Ecuación 2.31 se refiere a una perturbación en la potencia de la turbina.

Donde  $\Delta\bar{\omega}$  representa las variaciones de velocidad expresada en un sistema por unidad. Las variaciones de velocidad se pueden despreciar debido a que son muy pequeñas, en especial si el generador está conectado a un sistema de gran tamaño; de esta manera se tendrían las Ecuaciones 2.32 y 2.33.

$$\Delta\bar{U} = a_{11}\Delta\bar{H} + a_{13}\Delta\bar{G} \quad (2.32)$$

$$\Delta\bar{P}_m = a_{21}\Delta\bar{H} + a_{23}\Delta\bar{G} \quad (2.33)$$

Donde

$$a_{11} = \frac{\partial U}{\partial H} \quad a_{12} = \frac{\partial U}{\partial \omega} \quad a_{13} = \frac{\partial U}{\partial G} \quad a_{21} = \frac{\partial P_m}{\partial H} \quad a_{22} = \frac{\partial P_m}{\partial \omega} \quad a_{23} = \frac{\partial P_m}{\partial G}$$

Estos coeficientes dependen de la carga de la máquina y se pueden evaluar desde las características de la turbina en el punto de operación. Con las Ecuaciones 2.32 y 2.33 sustituyendo las Ecuaciones 2.18 y 2.21, la función de transferencia entre  $\Delta\bar{P}_m$  y  $\Delta\bar{G}$  se convierte en la Ecuación 2.34.

$$\frac{\Delta\bar{P}_m}{\Delta\bar{G}} = a_{23} \frac{1 + \left(a_{11} - \frac{a_{13}a_{21}}{a_{23}}\right) T_w s}{1 + a_{11} T_w s} \quad (2.34)$$

Los coeficientes varían considerablemente de un tipo de turbina a otra. Para la turbina sin pérdidas del tipo Francis ideales:

$$a_{11} = 0,5 \quad a_{13} = 1,0 \quad a_{21} = 1,5 \quad a_{23} = 1,0$$

En la Tabla 2.1 se muestran los valores de la turbina con base en mediciones hechas.

**Tabla 2.1.** Valores típicos de los coeficientes para una unidad de 40 MW con turbina Francis

Nivel de carga	a11	a13	a21	a23
Cargada al 100%	0,58	1,1	1,40	1,5
Sin carga	0,57	1,1	1,18	1,5

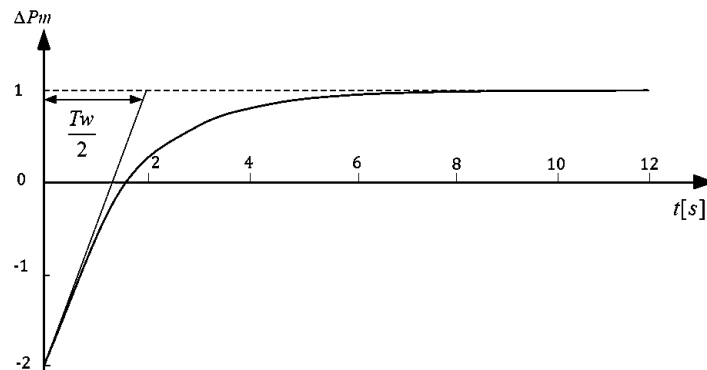
### 2.2.2.1.5 Características especiales de la turbina hidráulica

La función de transferencia dada por la Ecuación 2.29 o 2.34 representa un sistema de "fase no mínima", la característica especial de la función de transferencia puede ser ilustrada considerando la respuesta a una variación en la posición de la compuerta como se expresa en la Ecuación 2.35.

$$\Delta \bar{P}_m(0) = \lim_{s \rightarrow \infty} s \frac{1 - T_w s}{s(1 + 0,5T_w s)} = -2,0 \quad (2.35)$$

Y el teorema de valor final da la Ecuación 2.36.

$$\Delta \bar{P}_m(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1 - T_w s}{s(1 + 0,5T_w s)} = 1,0 \quad (2.36)$$



**Figura 2.6.** Variación de la potencia mecánica de la turbina en respuesta a una entrada paso en la posición de la compuerta.

El tiempo completo de respuesta está dado por la Ecuación 2.37.

$$\Delta \bar{P}_m(t) = \left[ 1 - 3e^{-\left(\frac{2}{T_w}\right)t} \right] \Delta \bar{G} \quad (2.37)$$

Con  $T_w = 4,0$ .

La Figura 2.6 muestra un gráfico de la respuesta de un modelo de turbina ideal, ante una respuesta de la unidad a la entrada paso en la posición de la compuerta, la potencia mecánica primero disminuye en 2,0 por unidad y luego aumenta de forma exponencial a un valor estacionario de 1 con una constante de tiempo de  $\frac{T_w}{2}$ .

El incremento inicial de la potencia es opuesto a la dirección del cambio de posición de la compuerta. Esto se debe a que, si bien la compuerta es abierta en un instante, el flujo no cambia de inmediato debido a la inercia del agua; sin embargo, la presión a través de la turbina se reduce, causando una reducción en la potencia.

#### 2.2.2.1.6 Modelo no lineal de la turbina con una columna de agua inelástica

El modelo lineal descrito en la Ecuación 2.34 hace referencia al rendimiento de una pequeña señal de la turbina. Este modelo da una idea de las características básicas del sistema hidráulico. Sin embargo, este modelo es inadecuado para estudios con grandes variaciones en la salida de potencia y frecuencia. A continuación, se describe un modelo más apropiado para realizar simulaciones de dominio de tiempo de gran señal.

Asumiendo un conducto rígido y un fluido incompresible las ecuaciones quedan de la siguiente manera:

$$U = K_u G \sqrt{H} \quad (2.38)$$

$$P = K_p H U \quad (2.39)$$

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{a_g}{L} (H - H_0) \quad (2.40)$$

$$Q = AU \quad (2.41)$$

Dónde

$U =$  velocidad del agua

$Q =$  tasa de flujo de agua

$G =$  apertura de la puerta ideales

$A =$  Área de la tubería

$H =$  carga hidráulica en la puerta

$L =$  Longitud del conducto

$H_0 =$  valor de estado estacionario inicial  $H$

$a_g =$  aceleración debido a la gravedad

$P =$  potencia turbina

$t =$  tiempo en segundos

Debido a que se evaluará el desempeño de gran señal, se normalizan las Ecuaciones 2.38 y 2.39.

$$\frac{U}{U_r} = \frac{G}{G_r} \left( \frac{H}{H_r} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{P}{P_r} = \frac{U}{U_r} \left( \frac{H}{H_r} \right)$$

El subíndice “r” se refiere a valores nominales. Las ecuaciones anteriores escritas en notación por unidad son:

$$\begin{aligned}\bar{U} &= \bar{G}(\bar{H})^{\frac{1}{2}} \\ \bar{P} &= \bar{U}\bar{H}\end{aligned}\tag{2.42}$$

De la Ecuación 2.42 la constante de la altura del salto de agua lleva a la Ecuación 2.43.

$$\bar{H} = \left(\frac{\bar{U}}{\bar{G}}\right)^2\tag{2.43}$$

De manera similar, la Ecuación 2.40 se escribe:

$$\frac{d\bar{U}}{dt} = -\frac{1}{T_w}(\bar{H} - \bar{H}_0)\tag{2.44}$$

Y en notación de Laplace:

$$\frac{\bar{U}}{\bar{H} - \bar{H}_0} = \frac{-1}{T_w s}\tag{2.45}$$

Donde  $T_w$  es la constante de tiempo de agua para una compuerta de una turbina y está dada por la Ecuación 2.46.

$$T_w = \frac{LU_r}{a_g H_r} = \frac{LQ_r}{a_g A H_r}\tag{2.46}$$

La potencia mecánica de salida  $P_m$  es:

$$P_m = P - P_L$$

donde  $P_L$  representa la potencia de pérdidas que se da en la turbina.  $P_L$  se define como:

$$P_L = U_{nl} * H$$

En la Ecuación 2.47 se indica el valor de  $T_w$  a cualquier carga.

$$T_w = \frac{U_0 H_r}{U_r H_0}\tag{2.47}$$

Incluyendo  $U_{nl}$  que representa la velocidad del agua en vacío. En forma normalizada, se tiene:

$$\bar{P}_m = (\bar{U} - \bar{U}_{nl}) * \bar{H}\tag{2.48}$$

La Ecuación 2.48 se refiere al valor en por unidad de la potencia de la turbina. En los estudios de estabilidad del sistema, la solución de la Ecuación de Oscilación de la máquina requiere un torque mecánico de la turbina sobre expresado en una base igual a la del generador como lo indica la Ecuación 2.49.

$$\bar{T}_m = \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right) \bar{P}_m \left(\frac{P_r}{MVA_{base}}\right) \quad (2.49)$$

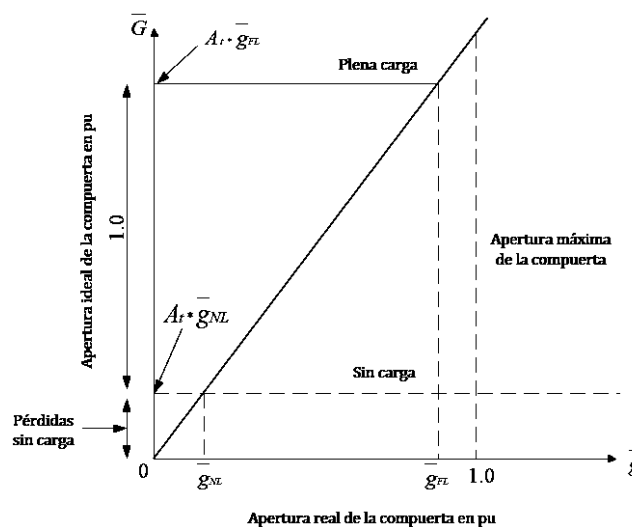
Donde

$\bar{\omega}$  = velocidad en por unidad

$MVA_{base}$  = valor del torque de la turbina

$\bar{P}_r$  = valor de la turbina en por unidad =  $\frac{\text{Valor en MW}}{MVA_{base}}$

En las ecuaciones anteriores, el parámetro  $G$  se refiere a la apertura ideal de la compuerta basado en la variación que se produce desde que la máquina marcha en vacío hasta que la máquina funciona a plena carga. Por otro lado, cuando se habla de apertura real de la compuerta, se refiere a la variación en la posición de la compuerta que se da entre una posición completamente cerrada (0 p.u) a otra posición completamente (1 p.u).



**Figura 2.7.** Relación entre las aperturas real e ideal de la compuerta

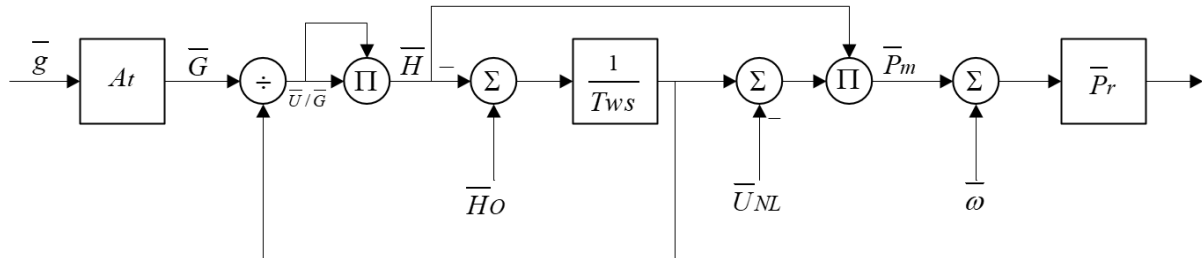
La apertura real de la compuerta está relacionada a la apertura ideal como se ve a como se observa en la Ecuación 2.50.

$$\bar{G} = A_t \bar{g} \quad (2.50)$$

Donde  $A_t$  es la ganancia dada por la Ecuación 2.51.

$$A_t = \frac{1}{\bar{g}_{fl} - \bar{g}_{nl}} \quad (2.51)$$

Las Ecuaciones 2.43 a 2.46 y de 2.32 a 2.34 detallan las propiedades de la columna de agua de la turbina y de la columna de agua. Estas ecuaciones se presentan en la Figura 2.8, en forma de diagrama de bloques.



**Figura 2.8.** Modelo de la turbina no ideal

De la Figura 2.8 se puede deducir la Ecuación 2.52 que se refiere al flujo activo.

$$\bar{U}_1 = \bar{U} - \bar{U}_{nl} \quad (2.52)$$

Expresando las Ecuaciones 2.48 y 2.49 en términos de flujo efectivo, se tendría las Ecuaciones 2.53 y 2.54.

$$Pm = \bar{U}_1 * H \quad (2.53)$$

$$\bar{T}_m = \frac{\bar{U}_1 * H}{\bar{\omega}} * \bar{P}_r \quad (2.54)$$

La Ecuación 2.55 es la expresión de la columna de agua:

$$\frac{d\bar{U}}{dt} = -\frac{1}{T_w} (\bar{H} - \bar{H}_0) = -\frac{1}{T_w} \left[ \left( \frac{\bar{U}}{A_t \bar{g}} \right)^2 - \bar{H}_0 \right] \quad (2.55)$$

Considerando condiciones en estado estable cuando no se tiene carga, se tendría la Ecuación 2.56.

$$\bar{U}_{nl} = A_t * \bar{g}_{nl} * (\bar{H}_0)^{\frac{1}{2}} \quad (2.56)$$

Con  $\bar{H}_0 = 1,0$

### 2.2.2.1.7 Refinamiento del modelo de la turbina

Para una mayor precisión en el resultado de la apertura de los inyectores según la potencia requerida, se añade una tabla que relaciona la apertura de los inyectores versus la potencia



mecánica. Es necesario este bloque ya que existe una relación no lineal entre la apertura de los inyectores y la potencia mecánica [21].

Esta relación no se debe confundir con la relación que existe entre la apertura independiente de cada uno de los inyectores y la potencia mecánica. Por lo tanto, se debe realizar previamente el cálculo del promedio de apertura de los 6 inyectores. Los datos de apertura de cada inyector se conocen a partir de los valores de la tabla de pruebas de rechazo de carga mostradas en el Anexo A.

Hay que tomar en cuenta que, para el caso de las unidades de la Fase C , cuando la máquina está funcionando a una potencia inferior a 45 MW, se encuentran trabajando 3 inyectores. Sin embargo, al momento de calcular el promedio de apertura se lo hará para 6 inyectores. Una vez obtenido el promedio de apertura de los 6 inyectores, se procede a encontrar la relación potencia mecánica vs apertura promedio de los inyectores. La relación no lineal se obtiene por un ajuste polinómico que tiene la siguiente forma:

$$Pm = a_n yn^n + a_{n-1} yn^{n-1} + \dots + a_3 yn^3 + a_2 * yn^3 + a_1 * yn + a_0 \quad (2.57)$$

donde  $a_n, a_{n-1}, a_3, a_2, a_1$  y  $a_0$ , son coeficientes polinómicos, y  $yn$  es la apertura promedio de los inyectores.

En la Tabla 2.2 se presentan los datos de aperturas de cada uno de los inyectores según diferentes niveles de potencia. Estos datos corresponden a mediciones realizadas en campo en la unidad 7 de la Fase C de la central Paute-Molino.

**Tabla 2.2.** Resultados de las aperturas de los inyectores según la potencia

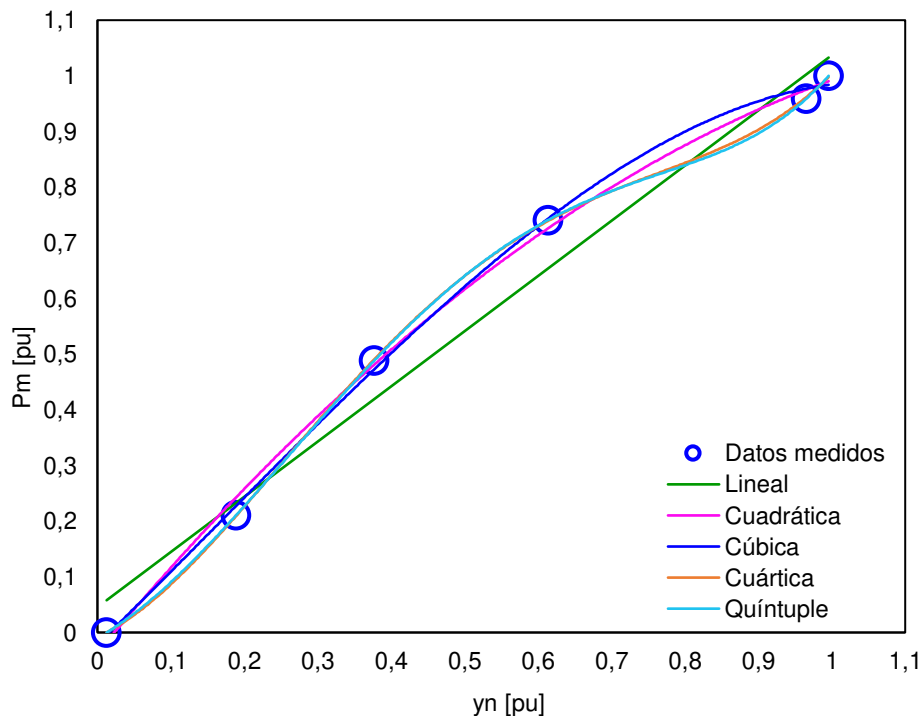
Potencia [MW]	Aperturas inyectores [%]						Promedio Apertura
	1	2	3	4	5	6	
<b>24,26</b>	36,90	0	38,51	0	37,84	0	18,875
<b>56,31</b>	36,89	37,45	38,04	38,51	37,85	37,52	37,710
<b>85,39</b>	60,18	60,78	62,53	62,15	61,04	61,57	61,375
<b>110,53</b>	94,51	95,00	97,80	97,64	97,45	94,84	96,207
<b>115,24</b>	98,44	100,0	99,01	100,0	100,0	100,0	99,575

En la Tabla 2.3 se indica el promedio de las aperturas de los inyectores correspondientes a los diferentes valores de potencia activa. Estos datos fueron transformados al sistema por unidad.

**Tabla 2.3.** Relación Potencia vs Apertura Inyector en por unidad

$Y_n$ [p.u]	$P$ [p.u]
0,0125	0
0,18875	0,210517
0,3771	0,488632
0,61375	0,740975
0,9654	0,959129
0,99575	1

Luego de obtener la Tabla de 2.3 se procede a realizar un ajuste polinomial para diferentes curvas, en este caso, como se tienen 6 pares de datos, se tendrá la posibilidad de hacer un ajuste polinomial hasta un  $n = 5$ . Para realizar los diferentes ajustes, se usará la herramienta computacional *cfTool* de MATLAB. Esta herramienta permite obtener la ecuación que describe la aproximación, el coeficiente de determinación, la sumatoria del error al cuadrado, entre otros. La Figura 2.9 muestra las gráficas de los ajustes polinomiales realizados en MATLAB.



**Figura 2.9.** Relación potencia mecánica y apertura del inyector

**Tabla 2.4.** Resultados de ajuste de la potencia y apertura de la compuerta

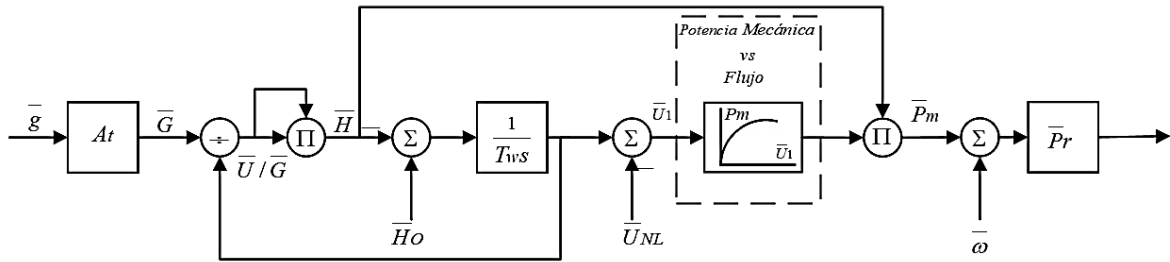
<b>Ajuste</b>	<b>Ecuación</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>SSE</b>
<b>Polinomial</b>			
Lineal	$0,9915 * yn + 0,04549$	0,9768	0,01917
Cuadrático	$-0,5527 * yn^2 + 1,581 * yn - 0,03621$	0,997	0,00179
<b>Cúbico</b>	<b><math>-0,5594 * yn^3 + 0,2795 * yn^2 + 1,286 * yn - 0,02167</math></b>	<b>0,9986</b>	<b>0,001147</b>
Cuártico	$3,773 * yn^4 - 7,659 * yn^3 + 4,317 * yn^2 + 0,5805 * yn - 0,00756$	1	2,2e-5
Quíntuple	$1,709 * yn^5 - 0,3703 * yn^4 - 4,139 * yn^3 + 3,085 * yn^2 + 0,7317 * yn - 0,009621$	1	2e-31

**SSE=Sumatoria de errores al cuadrado**

Con el objetivo de evaluar los ajustes polinomiales, en la Tabla 2.4 se muestran, las ecuaciones de los ajustes polinomiales, el coeficiente de determinación  $R^2$  y la sumatoria del error al cuadrado  $SSE$ . El coeficiente de determinación podría tomar un valor entre 0 y 1 y para que sea válido el ajuste polinomial se requiere que el valor de  $R^2$  sea cercano a 1. El valor de  $R^2$  aumentará si se incrementa el número de coeficientes en el ajuste, es decir si aumenta el grado de ajuste polinomial. En el caso de índice  $SSE$  se requiere que se tenga un valor cercano a 0 lo que indicaría que el ajuste tendrá una mayor validez.

Tomando en cuenta los resultados de la Tabla 2.4, particularmente los valores de  $R^2$  y  $SSE$ , se podría concluir que las mejores aproximaciones se dan con los ajustes de cuarto y quinto orden ya que en estos ajustes  $R^2$  es 1 y  $SSE$  prácticamente 0. Sin embargo, se observan en las gráficas de la Figura 2.10 que los ajustes de orden cuarto y quinto presentan una tendencia creciente lo cual no es un efecto deseado. Además, se conoce que entre mayor sea el orden del ajuste polinomial, mayor será la complejidad de la aproximación y es más probable que se reduzca el efecto de ajuste debido a pequeñas variaciones con respecto a los puntos obtenidos en la medición. Por otra parte, el ajuste cúbico es relativamente sencillo, y en la gráfica se ve que se presenta una tendencia decreciente. Por lo tanto, el ajuste cúbico es el más adecuado, en términos de operabilidad y precisión, para describir la relación entre la apertura del inyector y la potencia mecánica [22].

Al incluir el bloque de apertura de la compuerta vs. potencia en el modelo se tendrá en cuenta, dentro de la tabla, los efectos debido al flujo sin carga y la ganancia fija de la turbina, y, de esta manera, ya no será necesario incluir los parámetros  $qnl$  y  $At$  en el modelo de la turbina o ingresar valores igual a 1 para  $At$  y 0 para  $qnl$ . La Figura 2.10 muestra el modelo de turbina no lineal con las mejoras realizadas.



**Figura 2.10.** Modelo de turbina incluido la relación  $P_m$  vs  $y_n$

### 2.2.2.1.8 Inclusión del efecto del deflector en la turbina

La turbina de tipo Pelton posee un elemento para realizar un corte rápido en caso de emergencia, este dispositivo actúa para proteger el generador de una sobrevelocidad. El deflector se cierra de forma inmediata con el objetivo de disminuir la descarga efectiva en la turbina, y como resultado, la salida de potencia mecánica es reducida rápidamente. En algunos casos el deflector funciona de acuerdo con una relación de apertura en función del inyector. En el caso del regulador HyCon 443 el deflector permanece completamente abierto cuando la máquina está actuando en condiciones normales, impidiendo de esta manera, el funcionamiento del mismo cuando ocurran pequeños cambios de carga [23].

Para añadir el efecto del deflector en la simulación de la turbina Pelton se incluirá un bloque que permite multiplicar la entrada del deflector  $yd$  con el flujo; de esta manera, se simulará el paso e interrupción del flujo del agua a la turbina. Esto se ve reflejado en la Ecuación 2.58, ya que cuando la turbina esté funcionando en condiciones normales el valor de  $yd$  será uno, lo que significa que el flujo de agua estará pasando en un 100% a la turbina, mientras que si el valor de  $yd$  es igual a cero quiere decir que se ha producido un cambio repentino de velocidad, debido a un rechazo de carga. Durante el rechazo de carga la variable  $yd$  asociada al deflector, que tiene un valor de uno (abierto), cambia a cero (cerrado). Este cambio se produce en un tiempo determinado por el PID que controla el deflector [24]. La Ecuación 2.58 incluye el efecto del deflector, esta expresión es una modificación a la Ecuación 2.52.

$$U_1 = (\bar{U} - \bar{U}_{nl}) * y_d \quad (2.58)$$

Por último, se añade el efecto de amortiguación debido a la fricción, que es directamente proporcional a la desviación de la velocidad del rotor [25]. La Figura 2.11 muestra la inclusión del efecto de amortiguación.

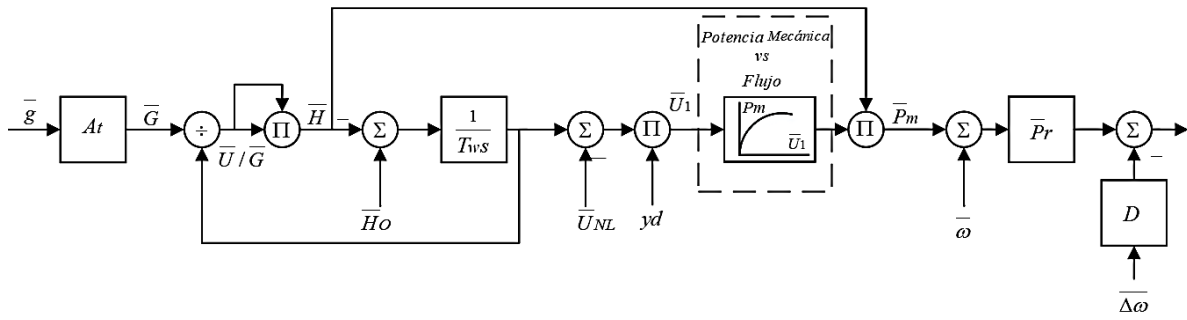


Figura 2.11. Diagrama de bloques de la turbina no lineal

## 2.2.3 CONTROLADORES

En esta sección se analizarán los diagramas de bloques del sistema de regulación de velocidad, obtenidos de los documentos proporcionados por CELEC y Voith-Siemens.

### 2.2.3.1 Lazo de control de velocidad

En el caso del controlador PID para la etapa de velocidad, se incluye el estatismo permanente  $bp$  cuyo efecto está descrito en el subcapítulo 1.3.5.1 sobre regulación primaria. El regulador también toma en cuenta el flujo presente en la turbina cuando la máquina se encuentra funcionando sin carga. Los valores típicos para la constante proporcional  $Kp$  están entre 0,6 y 10, para el tiempo  $Tn$  son entre 0 y 20 s y entre 0 s 1,4 para  $T1v$  [26]. El valor típico de la constante  $kv$  puede ser igual al valor de  $Kp$  o, como en nuestro caso, igual a 0. La Figura 2.12 muestra el lazo de control de velocidad.

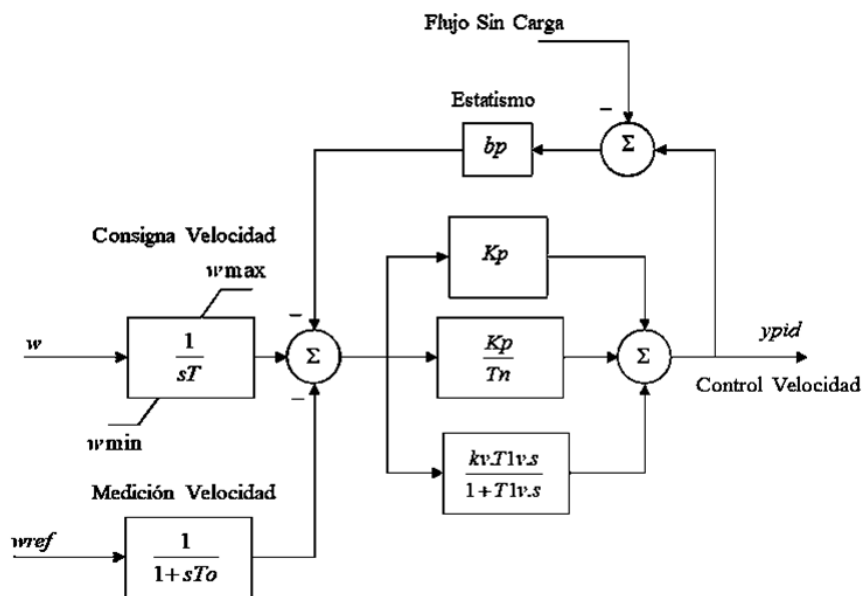


Figura 2.12. Controlador de velocidad

La función de transferencia que describe al controlador PID se presenta en la Ecuación 2.59.

$$G(s) = K_p + \frac{K_p}{T_n * s} + \frac{k_v * T_{1v} * s}{1 + T_{1v} * s} \quad (2.59)$$

### 2.2.3.2 Lazo de control de potencia

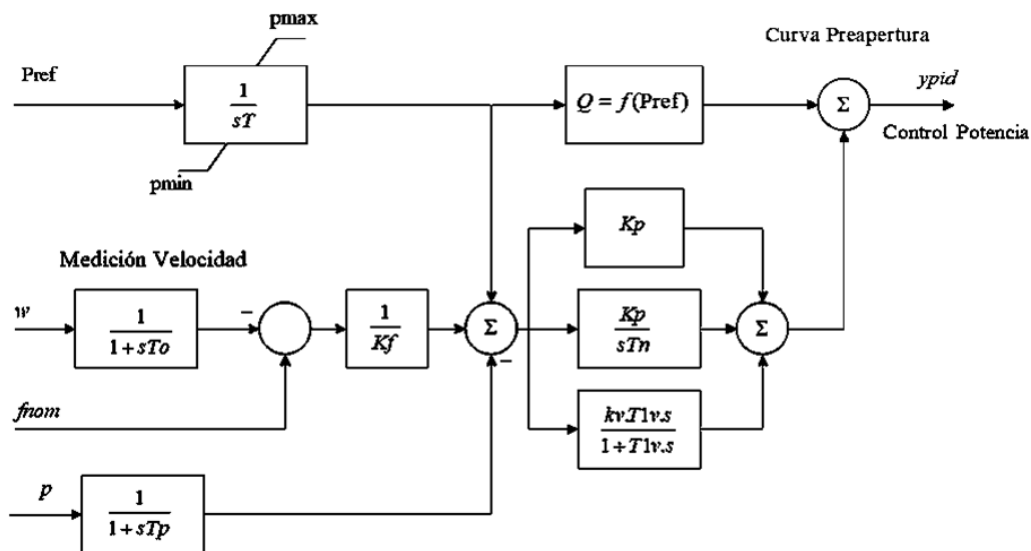


Figura 2.13. Controlador de potencia

En el lazo de control de potencia al igual que en el control de velocidad, se incluye un retardo en la medición determinado por un tiempo  $T_o$ , un tiempo de rampa en la consigna definido por la variable  $T$ . Para la etapa de control se observan que se utilizan dos estrategias de control:

- PID el cual es un tipo de control de realimentación o control en lazo cerrado, en cuya acción está descrita en la Ecuación 2.60
- Anticipativo o feedforward el cual es un controlador en lazo abierto. En este control se miden las variaciones de potencia presentes en el sistema antes de que afecte a la salida y de esta manera se tendrá un menor error que corregir por el lazo PID. El control Feedforward facilita la reducción del error permanente a un pequeño porcentaje del que se tendría sin la inclusión de este control.

Con la combinación de estas dos estrategias de control, se consigue aumentar la estabilidad del sistema, reducir el error, y aumentar la velocidad de respuesta ante perturbaciones en el sistema.

La función de transferencia del controlador de potencia está dada por la Ecuación 2.60 a diferencia del lazo de velocidad, aquí se incluye un control anticipativo descrito por  $Q =$

$f(ref)$ . Los valores típicos para la constante proporcional  $Kp$  están entre 0,2 y 1 [26]. Los valores típicos de  $Tn$  y  $T1v$  son iguales a los presentados en el lazo de control de velocidad.

$$G(s) = Kp + \frac{Kp}{Tn * s} + \frac{kv * T1v * s}{1 + T1v * s} + (Q = f(ref)) \quad (2.60)$$

## 2.2.4 INYECTOR

El lazo de posicionamiento del inyector se los representa por una constante proporcional  $Kp$  un bloque de retardo que simboliza la válvula proporcional.  $VELopen$  y  $VELclose$  son los límites de la velocidad de la válvula proporcional que son iguales en magnitud pero de diferente signo y un bloque integrador que representa el servomotor con sus respectivos límites de apertura máximo  $Ynmax$  y apertura mínima  $Ynmin$ .

En la entrada del lazo de posicionamiento se tiene una tabla que relaciona la apertura del inyector con el flujo cuya señal viene dada por  $ypid$  de la etapa de control ya sea de potencia o velocidad. Esta relación ayuda a corregir errores en el modelo ya que la relación Apertura ( $Op$ ) vs Flujo ( $Q$ ) no es lineal, para el caso en estudio se trata de una relación polinomial cúbica. El posicionamiento del inyector se indica en la Figura 2.14.

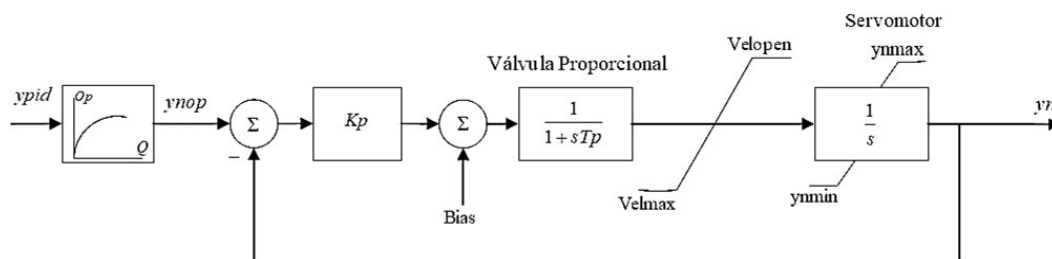


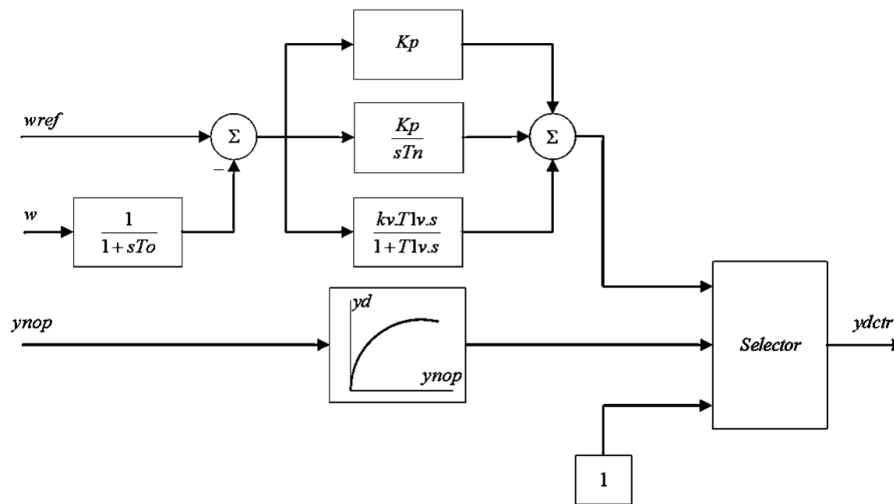
Figura 2.14. Inyector

## 2.2.5 DEFLECTOR

En el caso del deflector se tienen dos funciones de transferencia el primero relacionado al control y el segundo vinculado a su posicionamiento. El deflector tiene un controlador, que se muestra en la Figura 2.15 que funciona de la siguiente manera:

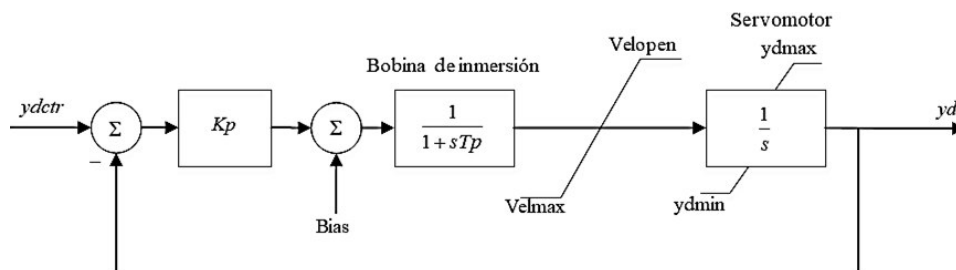
- El deflector está censado la velocidad de la unidad, y cuando se presentan variaciones bruscas de la velocidad como las que se dan cuando se produce un rechazo de carga, el lazo de control PID permite que el deflector actúe de una manera rápida. Es decir, en condiciones en las que la velocidad excede un valor  $w2$  el control de la posición lo realiza el lazo PID.

- En cambio, cuando la velocidad ha alcanzado un valor  $w_1$  inferior a  $w_2$  y cercano a  $1 p.u.$ , el lazo que controla el posicionamiento del deflector es el que representa la relación entre la apertura del inyector según la apertura del deflector. Esta relación se puede expresar en una tabla de datos que son tomados al momento que se realiza las pruebas de comisionamiento. En condiciones normales el deflector permanece abierto al valor de  $1 p.u.$



**Figura 2.15.** Control del deflector

La salida del control del deflector se conecta con el lazo de posicionamiento que es similar al inyector. En la Figura 2.16 se observa que la constante proporcional  $K_p$ , el bloque que representa en este caso la bobina de inmersión, las velocidades  $VELopen$  y  $VELclose$  que a diferencia del inyector son diferentes en magnitud. En el caso de este deflector la velocidad de cierre es mucho mayor que la velocidad de apertura. Se representa también el servomotor del deflector que en este caso tiene un pistón de doble accionamiento.



**Figura 2.16.** Posicionamiento del Deflector



# 3 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE REGULACIÓN DE VELOCIDAD EN EL PROGRAMA POWERFACTORY DE DIGSILENT

## 3.1 POWERFACTORY DE DIGSILENT [27]

El programa de PowerFactory, desarrollado por DlgSILENT, es un software de ingeniería utilizado para el análisis de sistemas de transmisión, distribución y sistemas energéticos de tipo industrial. Dentro de los principales lenguajes utilizados en PowerFactory están DPL y DSL. Mediante el uso de estos lenguajes se pueden modelar sistemas de control que luego son sujetos a pruebas que permitirán analizar su incidencia en sistemas interconectados, por ejemplo. Para la simulación del regulador de velocidad se utilizará PowerFactory 2021 SP3.

### 3.1.1 LENGUAJE DSL

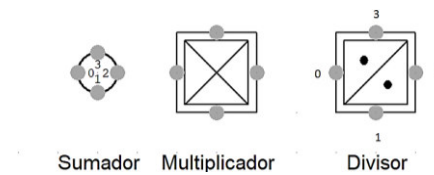
El lenguaje DSL se utiliza para programar modelos para los controladores eléctricos y otros componentes utilizados en los sistemas de energía eléctrica. Dentro del lenguaje DSL se pueden modelar las funciones de transferencia expresadas en diagramas de bloque que están conectados entre sí. Los principales componentes que permitirán ejecutar las simulaciones se detallan a continuación:

#### 3.1.1.1 Bloques de cálculo básico

Los bloques de cálculo utilizados en la construcción de los diagramas de bloque en DigSILENT son:

- *Bloque sumador:* Cada punto se puede utilizar como entrada para el punto de suma. El signo de las señales en los puntos de suma se puede cambiar ingresando al objeto. No existe la necesidad utilizar todos los puntos y el bloque solo puede tener una salida.
- *Bloque Multiplicador:* Cada punto que conforme el bloque se puede usar como entrada o salida del multiplicador. Al igual que el bloque sumador, no es necesario utilizar todos los puntos y solo se tiene una salida.
- *Bloque Divisor:* Cada punto se puede utilizar como entrada o salida. Las señales estarán dispuestas en orden horario comenzando por la izquierda. La primera entrada será el numerador y la segunda, y de existir una tercera, será el divisor. Solo se debe tener una salida

En la Figura 3.1 se presentan los diferentes bloques en el orden que se mencionaron:



**Figura 3.1.** Bloques de cálculo

### 3.1.1.1.1 Funciones básicas

Para el uso del programa es importante tener en cuenta las funciones básicas y especiales que ofrece. A continuación se detallan algunas de ellas:

- *sqrt* ( $x$ ): raíz cuadrada

Ejemplo:

$$y_n = Q_n / \text{sqrt}(H_0)$$

### 3.1.1.2 Funciones especiales

A continuación, se presentan las principales funciones usadas en la simulación de los diferentes diagramas del regulador de velocidad

- *lim* ( $x, min, max$ ): *Función de limitación no-lineal*. La señal asociada a esta función es igual a  $x$  cuando se encuentre dentro del límite inferior  $min$  y un límite superior  $max$ . Cuando la señal  $x$  sea menor que al límite mínimo, la salida será igual a  $min$ , y en caso de ser mayor que  $max$ , la señal de salida es igual al valor  $max$ .

Ejemplo:

$$y = \text{lim}(x1, wmin, wmax)$$

- *flipflop* (*boolset, boolreset*): *Función lógica flip-flop*. Devuelve el estado lógico interno: 0 o 1.

Valor devuelto:

El estado interno:

- cambia de 0 a 1, si *boolset* = 1 y *boolreset* = 0 (SET)
- cambia de 1 a 0, si *boolset* = 0 y *boolreset* = 1 (RESET)
- permanece inalterado en otras situaciones. (SOSTENER)

Valor inicial: *boolset*. La condición inicial *boolset* = *boolreset* = 1 provocará un mensaje de error.

Ejemplo:

```
yfip2=flipflop(yfip,0)
```

- *picdro* (*boolexpr*, *Tpick*, *Tdrop*): Función lógica de recogida y devolución útil para relés. Devuelve el estado lógico interno: 0 o 1.

Valor devuelto:

El estado interno:

- cambia de 0 a 1, si *boolexpr* = 1, por una duración de al menos *Tpick* segundos
- cambia de 1 a 0, si *boolexpr* = 0, después de *Tdrop* segundos
- permanece inalterado en otras situaciones.

Ejemplo:

```
ysubi=picdro(yi4>=w2,0,0)
```

- *select*(*boolexpr*, *x*, *y*): Devuelve *x* si *boolexpr* es verdadero, de lo contrario *y*.

Ejemplo:

```
x1=select(T1>0,xe/T1,0.0)
```

Con esta línea de instrucción se logra evitar la división por cero.

- *vardef* (*varnm*): Unidad y nombre de la variable *varnm*.

Ejemplo:

```
vardef(Ton)='s';'Pick up time for restart'
```

- *invlapprox* (*y*, *array\_iiii*): Inversa aproximada con datos en una matriz.

Ejemplo:

```
y=invlapprox(1.8,array_valve)
```

- *boolexpr* = Expresión lógica.

Relaciones lógicas: <, >, <> (desigualdades), = >, = <, =

Operadores binarios: and, or, nand, nor y eor.

Paréntesis: {Expresión lógica}

Ejemplo:

```
A={x1>0.and..not.x2>0.7}.or.T1=0.0
```

- *string* = Se refiere a la expresión que va dentro de comillas sencillas ' '.

Ejemplo:

```
A='éste es un string'
```

### 3.1.1.3 Declaración de ecuación

En las declaraciones de ecuaciones se asignan expresiones a los parámetros, de manera que se relacionan los parámetros con ecuaciones.

Sintaxis:

- $varnm = expr$ : Asignar expresión "expr" en la variable "varnm".

Ejemplo:

$$y = \sin(a) + 3 * x1$$

- $varnm. = expr$ : Asigna la expresión expr a la derivada de primer orden de la variable varnm.

Ejemplo:

$$x1. = (xe - x1) / 2 * T1$$

$$x2. = x1$$

### 3.1.1.4 Composite model (modelo compuesto)

El composite model contiene los diferentes modelos matemáticos de un sistema de potencia. En el caso del sistema de regulación de velocidad contendrá el modelo de los inyectores, deflectores, turbina y controladores PID. Este sistema junto con los elementos denominados PSS y VCO irán conectados al generador, el composite model permite administrar estos elementos. La Figura 3.2 muestra las conexiones típicas que se tienen en un generador sincrónico con elementos de regulación [28].

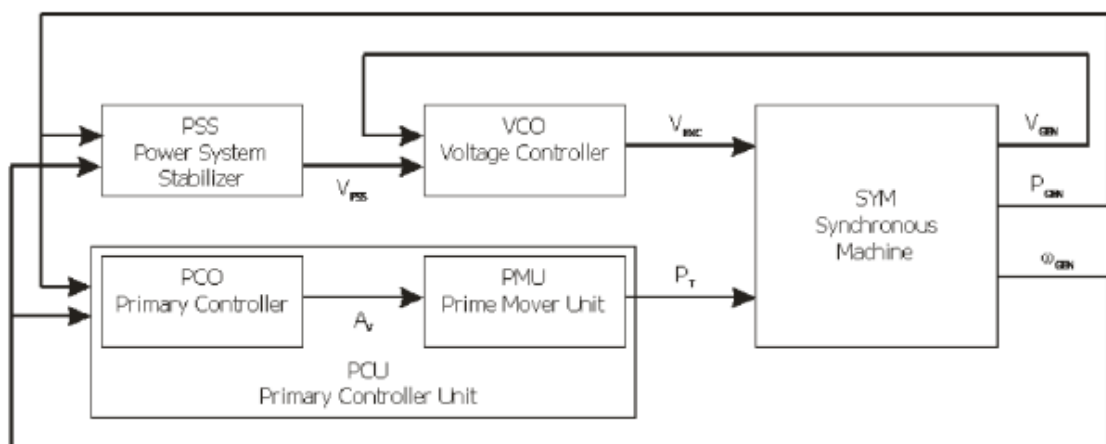


Figura 3.2. Composite model generador sincrónico

### 3.1.1.5 Composite frame (marco compuesto)

El Composite Frame se refiere a una estructura donde se indican las conexiones y ruta de comunicación de las señales de cada bloque o elemento que se define dentro del Composite Model. En la Figura 3.3 se indica la disposición típica de un Composite Frame.

Composite Type SVS:

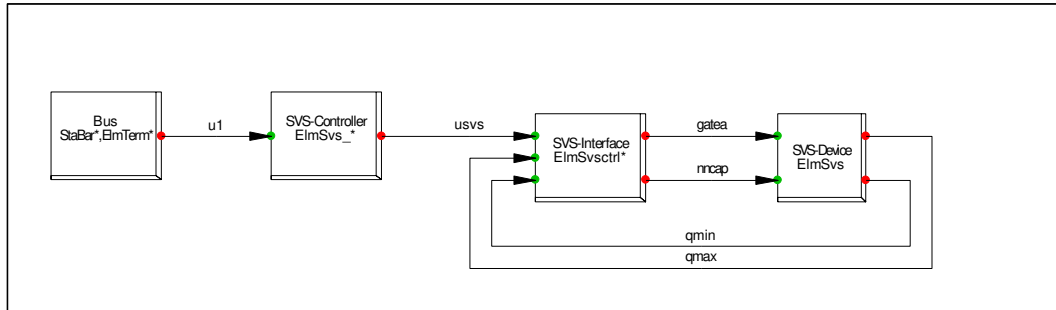


Figura 3.3. Composite Frame

## 3.2 METODOLOGÍA GENERAL DE LA MODELACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL EN POWERFACTORY [28]

En esta sección se indicará el método usado para construir los diferentes diagramas de bloque que conforman el sistema de regulación de velocidad de la Fase C, en PowerFactory. Se utilizará la metodología con la cual se modelan los sistemas de control del SNI ecuatoriano. A continuación, se presenta una breve descripción:

### 3.2.1 RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Usualmente la información de los modelos a simular es provista por el fabricante. Sin embargo, también puede ser obtenida de libros o artículos elaborados por equipos de investigación. Una gran fuente de consulta son los documentos elaborados a través de IEEE.

### 3.2.2 MODELAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Luego de haber obtenido la información de los modelos, típicamente, funciones de transferencia, se procede a construirlo a través de diagramas de bloque mediante el uso de lenguaje DSL. En caso de no contar con mucha experiencia en este campo se recomienda guiarse en los modelos presentes en la librería de PowerFactory.

### 3.2.3 PROCESO DE CODIFICACIÓN

Una vez que se tienen los diagramas de bloque con sus respectivas conexiones, se procede a ingresar la información particular en cada bloque. En este punto se realiza la verificación de la sintaxis y la compilación

### 3.2.4 PROCESO DE PRUEBAS Y DOCUMENTACIÓN

Después de haber concluido el proceso de codificación, se procede a comprobar el funcionamiento del modelo. Esto se hace con el objetivo de verificar una correcta conectividad entre el sistema y los elementos modelados, comprobar el adecuado funcionamiento de los dispositivos que se modelan y documentar su funcionamiento con el fin de proveer información a los usuarios que requieran utilizar la simulación para posteriores estudios.

#### 3.2.4.1 Pruebas de estado estable

Con el objetivo de constatar el correcto funcionamiento y estabilidad del sistema de regulación de velocidad, un paso previo que se debe ejecutar es la realización de las pruebas de estado estable. Esta prueba consiste en realizar la simulación del modelo sin incluir ningún evento. En esta simulación se observan diferentes variables del regulador como la apertura del deflector e inyector, la velocidad y la potencia de la unidad. Estas variables no deben presentar cambios mayores a  $1 \times 10^{-5}$  [28].

#### 3.2.4.2 Variación del +/- 10% de la carga

Para realizar esta prueba se debe realizar un aumento o disminución, según se necesite, de la carga que está conectada al sistema de prueba. Para realizar esta prueba se tienen dos opciones:

- Se crea un evento de carga en el cual se varía en un +/- 10% la potencia activa de la carga.
- Se tienen dos cargas del tipo resistivo, una principal y otra secundaria, esta última se la configura a un 10 % de la carga principal. Luego se crea un *Switch event* que permitirá conectar/desconectar la carga, según se requiera.

Para el caso del regulador de velocidad de Paute, las variables que se deberán graficar para analizar la respuesta serán: velocidad, potencia, apertura/cierre del deflector e inyector.

### 3.2.4.3 Prueba de escalón en la velocidad de referencia

Para esta prueba se varía la velocidad de referencia del sistema en un porcentaje igual a  $\pm 1\%$  de su valor inicial (1 p.u), mediante una entrada paso. Esto se consigue con la creación de un *Parameter Event* en la que se modifica la variable *wref*. En esta prueba se debe comprobar que la velocidad de la unidad siga la referencia y alcance el nuevo valor de *wref* en un tiempo límite [28].

## 3.3 IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS DEL REGULADOR DE VELOCIDAD MEDIANTE EL MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN BASADA EN ENJAMBRE DE PARTÍCULAS

Una vez que el modelo del sistema de regulación cumple con las pruebas iniciales se procede a realizar la identificación de los parámetros del regulador, con el objetivo de tener una respuesta de mayor precisión. Para ello se pueden usar varios procedimientos como Ziegler-Nichols, algoritmos genéticos, PSO (Optimización por enjambre de partículas), etc. En nuestro caso se utilizará PSO.

El método de optimización por enjambre de partículas se basa en el comportamiento de ciertos animales. Por ejemplo: el comportamiento de un cardumen de peces o el comportamiento de las aves al buscar alimento, todas las aves se mueven hacia donde alguna encontró alimento terminan esta comida y se dirigen hacia donde otra encuentre alimento y así sucesivamente [29].

En el algoritmo PSO se utiliza una población de soluciones que se dirigen hacia la mejor solución de un problema de optimización. La población consta de partículas que se encuentran moviéndose en el espacio al mismo tiempo que registran su mejor ubicación. El algoritmo PSO está basado en los conocimientos sociales y cognitivos vistos en los enjambres [30].

El conocimiento cognitivo, que ayuda a las partículas a explorar el espacio, la adquiere cada partícula mientras se realiza la búsqueda. Este conocimiento es representado por la mejor posición alcanzada por la partícula y constituye el mejor valor de la función objetivo. En cambio, el conocimiento social, que ayuda a las partículas a explotar el espacio de búsqueda, se refiere al mejor valor de la partícula del enjambre. A esta partícula se la denomina líder debido a que es la guía de las otras partículas. Basándose en estos dos conocimientos las partículas actualizan su posición en cada iteración.

### 3.3.1 ELEMENTOS DEL PSO [30]

**Partícula:** Comprende una posible solución que es expresada a través de un vector de cómo se indica a continuación:

$$X_j(t) = [x_{j,1}(t), x_{j,2}(t), \dots, x_{j,m}(t)]$$

Donde:

$X_j(t)$  = Partícula j-ésima

$t$  = Número de iteración

$m$  = Parámetros optimizados en cada partícula

$x_{j,m}(t)$  = Parámetro optimizado de cada partícula  $X_j$  de la posición j-ésima, respecto a la dimensión  $m$  de cada partícula.

**Población:** Este valor de población indica cuántas partículas se van a utilizar en cada iteración.

**Enjambre:** Es una población aparentemente desorganizada de partículas en movimiento.

**Velocidad:** Es la velocidad a la que las partículas se mueven por el espacio, y se la representa por el siguiente vector:

$$V_j(t) = [v_{j,1}(t), v_{j,2}(t), \dots, v_{j,m}(t)]$$

Donde:

$V_j(t)$  = Velocidad j-ésima

$t$  = Número de iteración

$m$  = Parámetros optimizados en cada partícula

$v_{j,m}(t)$  = componente de velocidad de la j-ésima partícula respecto a la m-ésima dimensión

**Peso de inercia:** El peso de inercia determina la tasa de contribución de la velocidad anterior de una partícula a su velocidad en el paso de tiempo actual. Un peso de inercia grande facilita una búsqueda global, mientras que un peso de inercia pequeño facilita una búsqueda local. El peso de inercia puede ser constante o variable, cuando es variable se debe tomar en cuenta ciertas fórmulas que se encuentran expresadas en [31]. En este documento se utilizará la fórmula de decrecimiento lineal como se indica en la Ecuación 3.1. Los valores de inercia mínimos y máximos serán 0,9 a 0,4, respectivamente [31].



$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{t_{max}} * t \quad (3.1)$$

Donde:

$w_{max}$  = Límite máximo del peso de inercia

$w_{min}$  = Límite mínimo del peso de inercia

$t_{max}$  = Máximo número de iteraciones

$t$  = Iteración actual

**Líder del enjambre:** Se considera el líder del enjambre a la partícula con que tenga el mejor valor propio. Para la selección del líder se debe comparar el valor de aptitud calculado en la función fitness con el del líder.

**Mejor Individual:** Es la mejor posición asociada con la mejor aptitud encontrada. Para cada partícula del enjambre, el mejor individual puede determinarse y actualizarse durante la búsqueda.

**Mejor global:** Corresponde a la mejor posición de entre todas las posiciones obtenidas en el mejor individual.

**Criterio de paro:** Es el criterio mediante el cual se interrumpe la búsqueda. En este caso el algoritmo PSO se detendrá cuando se alcance el número máximo de iteraciones establecida al principio de la búsqueda.

**Función objetivo:** La función objetivo que se debe minimizar es el error que existe entre la señal obtenida en las pruebas de comisionamiento y la señal obtenida en la simulación. En la Ecuación 3.2 se indica la función objetivo a minimizar.

$$f(x1, x2) = \sum_{i=1}^N (x1i - x2i)^2 \quad (3.2)$$

Donde:

$N$  = número de iteraciones

$i$  = iteración actual

$x1i$  = señal de las pruebas de comisionamiento

$x2i$  = señal obtenida luego de la simulación

### 3.3.2 PROCEDIMIENTO [32]

Generalmente el algoritmo de PSO se basa en el siguiente procedimiento:

- Ingresar los parámetros como los pesos inerciales máximo y mínimo, los factores de aprendizaje social y cognitivo  $c1$  y  $c2$  respectivamente, número de iteraciones, tamaño de la población y la dimensión de la partícula
- Hallar las condiciones iniciales de la posición y velocidad de las partículas de forma aleatoria. Estos valores se generan dentro de un rango preestablecido.
- Evaluar la función objetivo relacionada con las partículas. Una vez que se ha encontrado ese valor se debe realizar una comparación entre la función objetivo correspondiente a la posición actual de la partícula con la de la mejor posición preestablecida. Si la posición actual entrega un mejor resultado que la posición preestablecida entonces la mejor posición se la cambia por la actual.
- Realizar una comparación de la función objetivo correspondiente a la mejor posición actual con la función objetivo relacionada a la mejor posición global. Al igual que el paso anterior si la mejor posición actual entrega una mejor respuesta que la mejor posición global entonces la actual pasa a ser la mejor global.
- Si el peso inercial no es igual a una constante (usualmente  $w = 0,729$ ) entonces se debe actualizar el peso inercial según la ecuación que se haya escogido. En este caso para actualizar el peso inercial se utilizará la Ecuación 3.1.
- Luego se procede a actualizar la posición y velocidad de cada partícula. Para ello se utilizarán la Ecuación 3.3 para actualizar la posición y la Ecuación 3.4 para actualizar la velocidad.

$$x_{ik(t+1)} = x_{ik(t)} + v_{ik(t+1)} \quad (3.3)$$

$$v_{ik(t+1)} = wv_{ik} + c1rand_{1,ik}(p_{best,ik} - x_{ik(t)}) + c2rand_{2,ik}(g_{best,k} - x_{ik(t)}) \quad (3.4)$$

Donde:

$k = 1, 2, \dots, n$  = índices de las partículas.

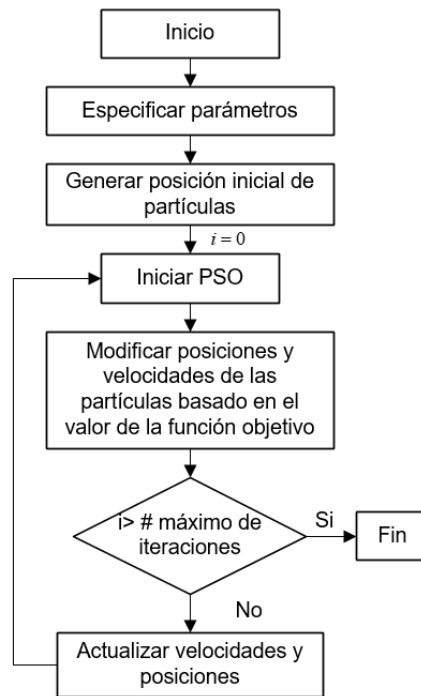
$w$  = peso inercial

$rand1, rand2$  = números aleatorios en el rango  $[0 \ 1]$ .

$c1, c2$  = factor de aprendizaje cognitivo y social, respectivamente

$t$  = número de iteración

- Si se llega al número máximo de iteraciones preestablecido entonces se detiene el algoritmo, caso contrario ir al segundo paso de este procedimiento.



**Figura 3.4.** Diagrama de flujo del algoritmo de PSO [32]

### 3.3.3 IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS [30]

Cuando se realiza la identificación de parámetros de los controladores, se busca hallar, principalmente, las ganancias y constantes de tiempo. Esta búsqueda se realiza con el objetivo de obtener una robustez en el controlador en los diferentes rangos de operación.

La identificación de parámetros, en el sistema de regulación de velocidad, definirá la mejor combinación de valores que hacen que la respuesta de la simulación, ante una perturbación predefinida, tenga una alta aproximación a la respuesta obtenida en las pruebas de comisionamiento. Esto se logra gracias a la inclusión de la función objetivo, la cual relaciona el error o la diferencia entre la señal obtenida en el comisionamiento y la señal simulada. A esta función objetivo se la optimizará con el fin de hallar el valor mínimo de dicho error.

Para la identificación de parámetros del regulador HyCon 443, la perturbación que se utilizará es el rechazo de carga a un nivel igual al 50%.

## 3.4 CONTRASTACIÓN CON PRUEBAS DE COMISIONAMIENTO

### 3.4.1 PRUEBAS DE PRECOMISIONAMIENTO

Las pruebas de suelen realizarse cuando se ejecutan proyectos de modernización de las centrales, estas pruebas se las realiza con el objetivo:

- Facilitar el registro de las verificaciones, ajustes, tendencias y resultados de pruebas en el regulador de velocidad, para promover una base de consulta para la puesta en marcha del nuevo regulador.
- Asegurar que el regulador de velocidad y los equipos del circuito de regulación (regulador hidráulico, sensores y actuadores) estén funcionando satisfactoriamente.

Los resultados de las pruebas de precomisionamiento se muestran en el Anexo B.

### **3.4.2 PRUEBAS DE COMISIONAMIENTO**

Las pruebas de comisionamiento se aplican en los casos de que se instalen nuevos equipos o se realice una modernización de estos. Los resultados obtenidos en las pruebas de comisionamiento permitirán obtener registro del comportamiento de la unidad y su regulador de velocidad, con respecto a las pruebas de precomisionamiento. El procedimiento para realizar las pruebas de comisionamiento fue elaborado por la compañía Voith-Siemens, de acuerdo con los requerimientos funcionales de la Central Paute-Molino y con base en varias normativas, principalmente:

- IEC 60308: "Turbinas hidráulicas-Pruebas de sistemas de control"
- IEC 60545: "Guía para la puesta en servicio, operación y mantenimiento de turbinas hidráulicas"
- IEC 61362: "Guía para la especificación de los sistemas de regulación de las turbinas hidráulicas"
- IEEE 125-2007: "Preparación del equipo. Especificaciones. para el control de velocidad de turbinas hidráulicas "
- IEEE 1207-2011: "Guía para la aplicación de sistemas de regulación de turbinas para unidades generadoras hidroeléctricas"
- ASME PTC 29: "Sistema de regulación de velocidad para unidades de turbina-generator hidráulico"

El principal objetivo de estas pruebas es asegurar las condiciones necesarias para la puesta en marcha. Para la realización de estas pruebas es necesario considerar los siguientes aspectos:

- Organizar las pruebas de forma de asegurar que el gobernador de velocidad solamente sea energizado después de verificación de su perfecto funcionamiento.

- Facilitar el registro de las verificaciones, ajustes, tendencias y resultados de los ensayos en el gobernador de velocidad de forma a proveer una base de consulta para la operación y el mantenimiento de este.
- Asegurar que el gobernador de velocidad funcionará de acuerdo con el proyecto para lo cual se concibió.

Las principales pruebas de comisionamiento que se realizaron en el regulador de velocidad y son:

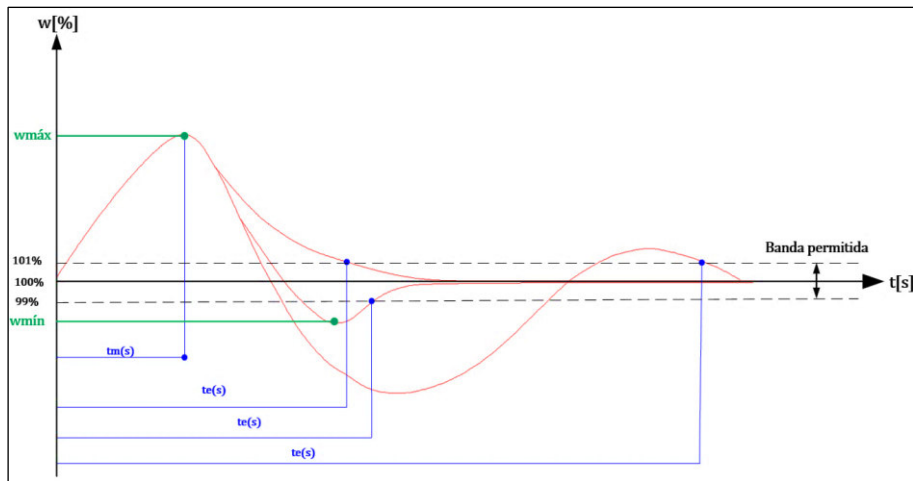
- Apertura y cierre de los inyectores
- Apertura y cierre de los deflectores
- Rechazos de carga
- Control de potencia
- Control de velocidad en red
- Control de apertura

Estas pruebas se utilizarán para realizar la contrastación con las pruebas del modelo simulado en PowerFactory. En el Anexo F se describen las pruebas típicas que se realizan en los reguladores de velocidad y las instrucciones para ejecutar cada una de ellas.

#### **3.4.2.1 Rechazos de carga [26]**

Esta prueba generalmente se realiza ajustando la generación de la unidad en el sistema interconectado a un nivel específico y luego disparando el interruptor de la unidad. El incremento de velocidad que se produce desde un rechazo de carga hasta el inicio de la fase de estabilización depende de varios aspectos como: el tiempo de cierre admisible (considerando el golpe de ariete), la inercia de rotación de la unidad y la inercia de la columna de agua. Luego del tiempo de estabilización, la curva de velocidad queda determinada por las características del regulador. La velocidad máxima permitida del generador después de un rechazo de carga viene determinada por la construcción del rotor del generador.

Las formas de onda típicas que se tienen luego de rechazo de cargo se muestran en la Figura 3.5.



**Figura 3.5.** Rechazo de carga

### Descripción

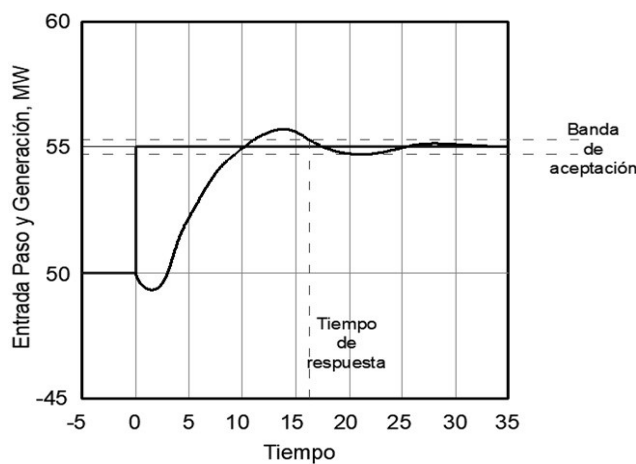
- Tiempo de estabilización ( $t_e$ ) = tiempo de estabilización considerando que el desvío de velocidad está dentro del 1%.
- Tiempo de máximo ( $t_m$ )= tiempo hasta la máxima velocidad después del rechazo.
- Velocidad máxima ( $w_{máx}$ ): velocidad máxima después de un rechazo de carga en un tiempo  $t_m$ .
- Velocidad mínima ( $w_{mín}$ ): velocidad mínima después de un rechazo de carga.

Realizando la contrastación con las pruebas de rechazo de carga se validará sistema de regulación de velocidad cuando esté activado la etapa de control de velocidad. Esta acción simulará un rechazo de carga cuando el sistema esté funcionando de manera aislada o cuando, el sistema funcionando en red interconectada se produzca un rechazo de carga. En ese instante la máquina se desconectará del sistema y el regulador evitará que en la máquina se produzca una sobrevelocidad no deseada. De esta manera la frecuencia de la unidad se mantendrá en 1 p.u. y la máquina estará lista nuevamente para la sincronización. En esta prueba, principalmente, se debe observar el comportamiento del deflector cuando se producen rechazos de carga y como afecta a la estabilidad del sistema, ya que este elemento ayuda a que no exista un exceso de velocidad en la unidad.

### 3.4.2.2 Prueba de respuesta de generación en línea [13]

La prueba de respuesta de generación en línea se utiliza para verificar la capacidad de respuesta del sistema de regulación de la turbina a un cambio de punto de ajuste cuando se sincroniza con el sistema interconectado. La respuesta de generación en línea de una unidad es importante para coordinar la acción del sistema AGC entre las unidades conectadas al sistema eléctrico interconectado. La respuesta de generación en línea generalmente se especifica como el tiempo requerido, desde el inicio del cambio del punto de ajuste, para que la generación de la unidad se establezca dentro de una banda especificada del punto de ajuste.

Si el sistema de regulación de la turbina utiliza un lazo de control anticipativo para la respuesta de carga en línea, esta función debe habilitarse y ajustarse para lograr la respuesta deseada. Generalmente, el punto de ajuste del sistema de regulación de la turbina y la generación de la unidad se registran para la prueba de respuesta en línea. La Figura 3.6 muestra una prueba típica de respuesta en línea.



**Figura 3.6.** Respuesta a la entrada paso de potencia

Tanto en las pruebas de generación en línea como en las de rechazo de carga, se evaluará el índice MSE (error medio cuadrado) para comprobar la validez del modelo simulado. Con este dato se cuantifica cuán cercano se encuentran los datos tomados en campo de los simulados. Este valor se halla como se muestra en la Ecuación 3.5.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.5)$$

Donde:

$N$  =número de datos

$y_i$  = valores de la medición

$\hat{y}_i$  =valores de la simulación

## **3.5 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA**

### **3.5.1 RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN**

La información de los diagramas de bloque de los reguladores de velocidad fue proporcionada por la empresa Voith-Siemens a través de CELEC Hidropaute. Los modelos de las turbinas se obtuvieron de artículos y libros descritos en la bibliografía.

### **3.5.2 MODELAMIENTO DE LA INFORMACIÓN Y PROCESO DE CODIFICACIÓN**

En esta sección se presenta la simulación del sistema de regulación de velocidad que se realiza luego de la recopilación de la información de los diagramas de bloque y de las funciones de transferencia.

El proceso que se sigue para la simulación se detalla a continuación:

- Crear un nuevo documento
- Graficar los bloques y los operadores.
- Asignar las funciones de transferencia a los bloques.
- Conectar los bloques
- Inicializar las variables en cada bloque
- Verificar la correcta inicialización de las variables mediante la herramienta Check Initialization de PowerFactory.
- Generar un Composite Model
- Agrupar los bloques en el Composite Model

A continuación, se detalla el proceso de la simulación en PowerFactory de los elementos de mayor relevancia en los diagramas de bloque. Este procedimiento se aplicará en todos los diagramas de bloques que se construyan. Para saber más detalles sobre la simulación, se recomienda revisar el documento “*Curso Avanzado de DigSILENT PowerFactory*” que es parte de la bibliografía de este trabajo de titulación.



### 3.5.2.1 Construcción de un Common Model

En primer lugar, se crea un nuevo archivo en el programa PowerFactory. Luego de haber creado el nuevo archivo se insertan los diagramas de bloque de la librería general que se encuentra dentro de PowerFactory. En esta librería se encuentran todas las funciones de transferencia. Luego se insertan los bloques de cálculo básico que se encuentran en la barra de las herramientas de dibujo. En la Figura 3.7 se indica el procedimiento.

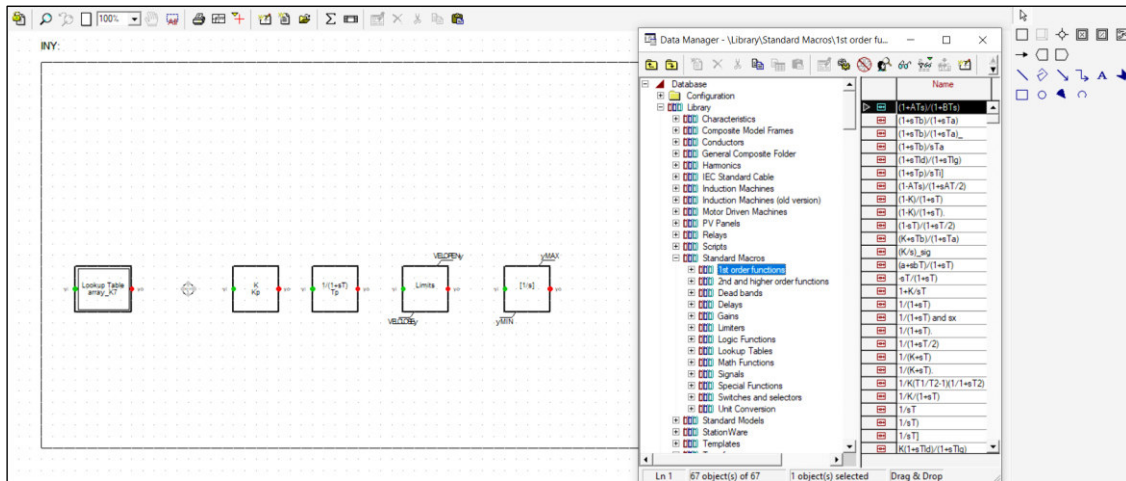


Figura 3.7. Construcción de los diagramas de bloques

Como siguiente paso se debe realizar la conexión de los diagramas de bloque y en el caso de requerir asignar un nombre específico que representaría las entradas y las salidas del diagrama de bloque como se muestra en la Figura 3.8. Esta asignación de nombres es muy importante ya que repercutirá más adelante tanto en la inicialización de las variables como en la conexión en el Composite Model.

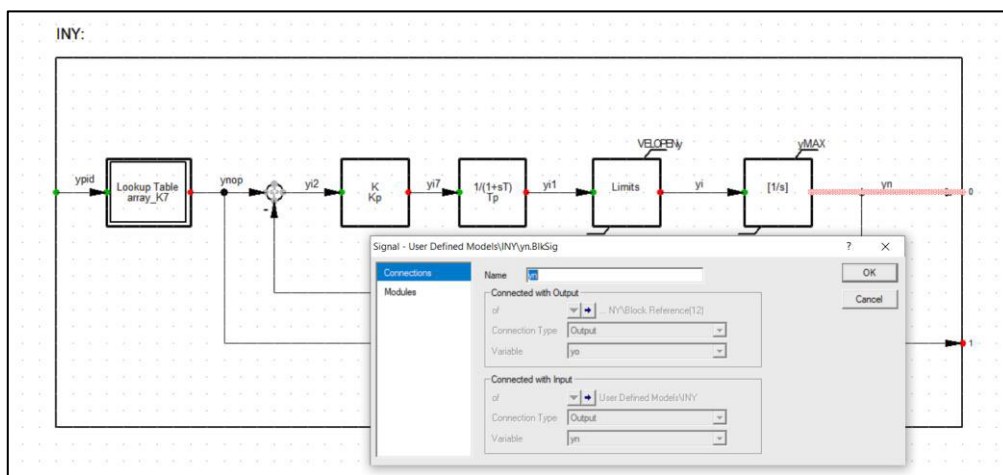
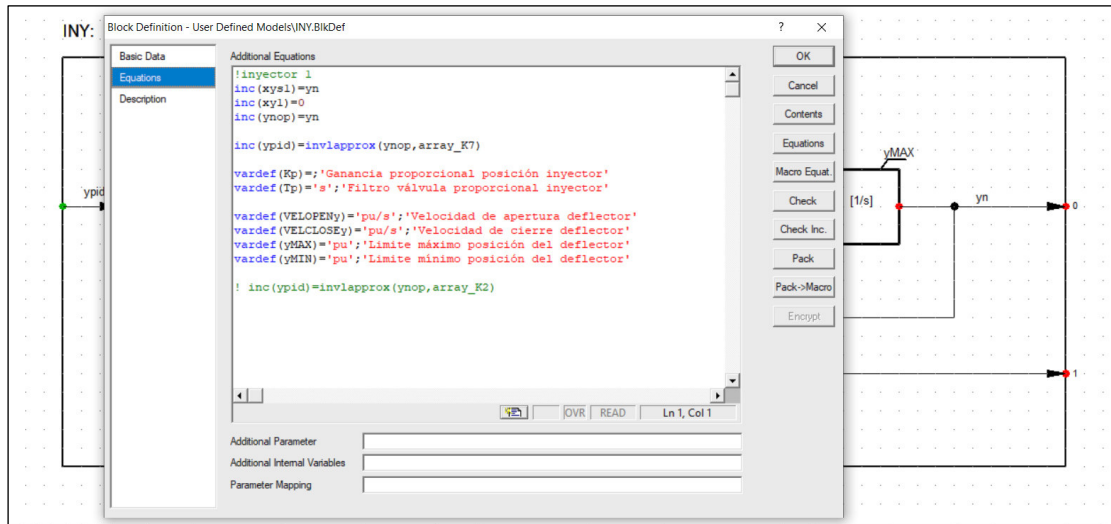


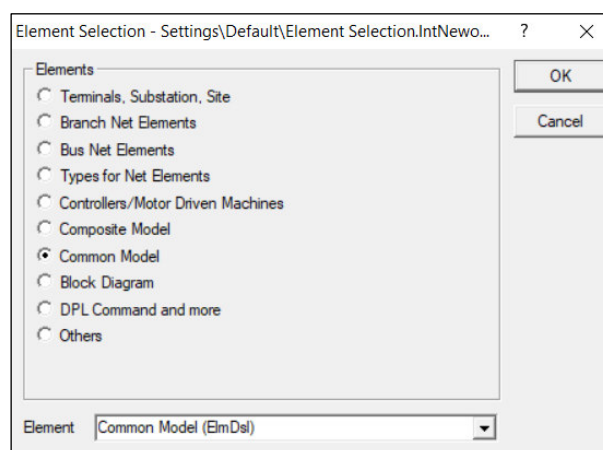
Figura 3.8. Asignación de las variables

El siguiente paso es inicializar las variables para ello se debe tomar en cuenta el tipo de diagrama de bloque implementado para saber cómo se comportan las entradas y salidas de cada bloque. Este paso es el más importante dentro de la simulación ya que de esto dependerá que el sistema no presente errores en la simulación. Una vez inicializadas todas las variables, se procede a la comprobación mediante la herramienta que posee PowerFactory, Check Inc. En el Anexo D se presenta la inicialización de los diagramas de bloque.

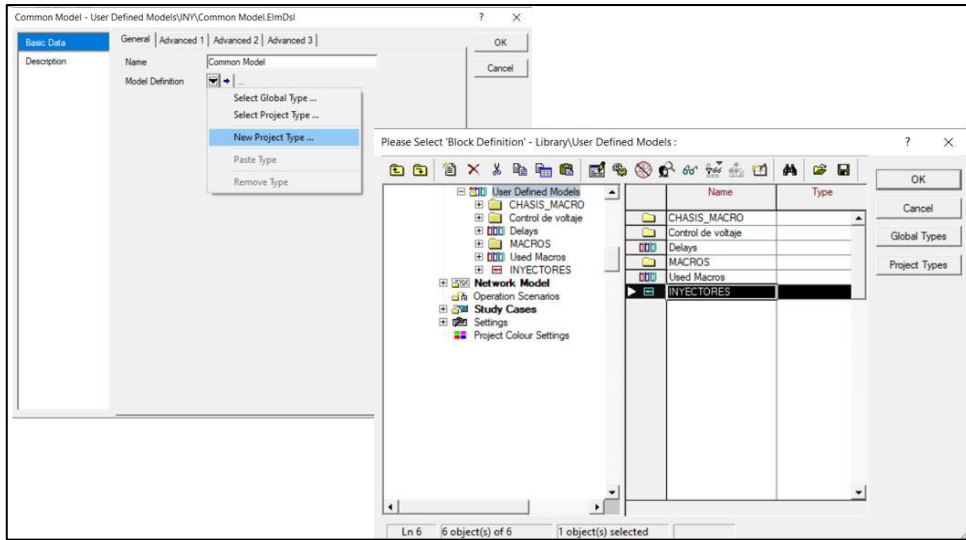


**Figura 3.9.** Inicialización de las variables

El siguiente paso consiste en crear un Common Model (ElmDsl) para cada diagrama de bloque del regulador de velocidad como: controladores PID, inyectores, deflectores, turbina y generador. Estos Common Models, permitirán ligar los bloques al generador sincrónico. La Figura 3.10 y la Figura 3.11 muestran el procedimiento para crear el Common Model.

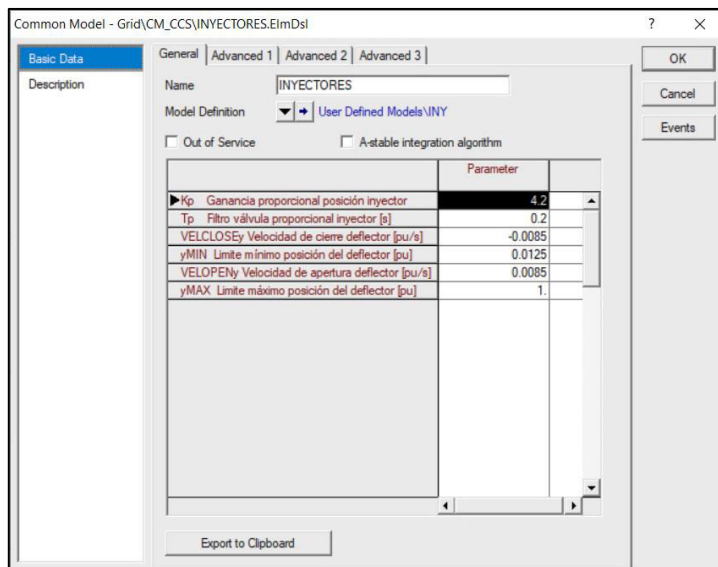


**Figura 3.10.** Creación Common Model



**Figura 3.11.** Selección del generador sincrónico al Composite Model

Finalmente se procede a asignar los valores a los parámetros de cada diagrama de bloque. Estos valores se asignan de acuerdo con las tablas indicadas por el fabricante y de acuerdo con los valores configurados en las pruebas de comisionamiento. En la Figura 3.12 se indica el método para la parametrización.

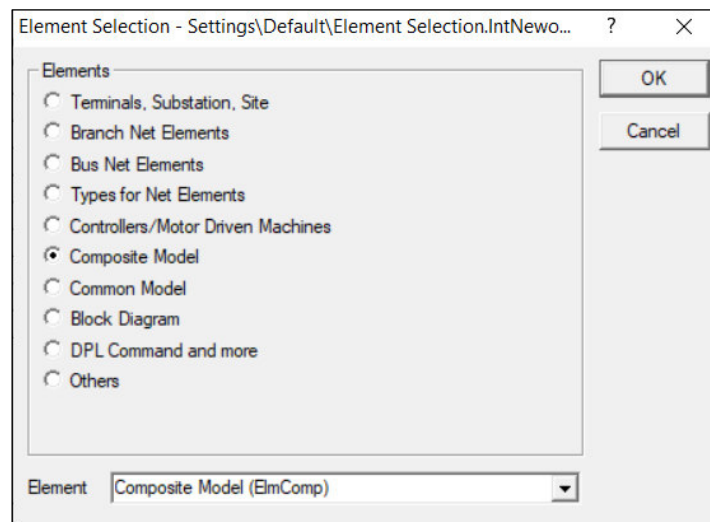


**Figura 3.12.** Parametrización de las variables

### 3.5.2.2 Construcción de un Frame

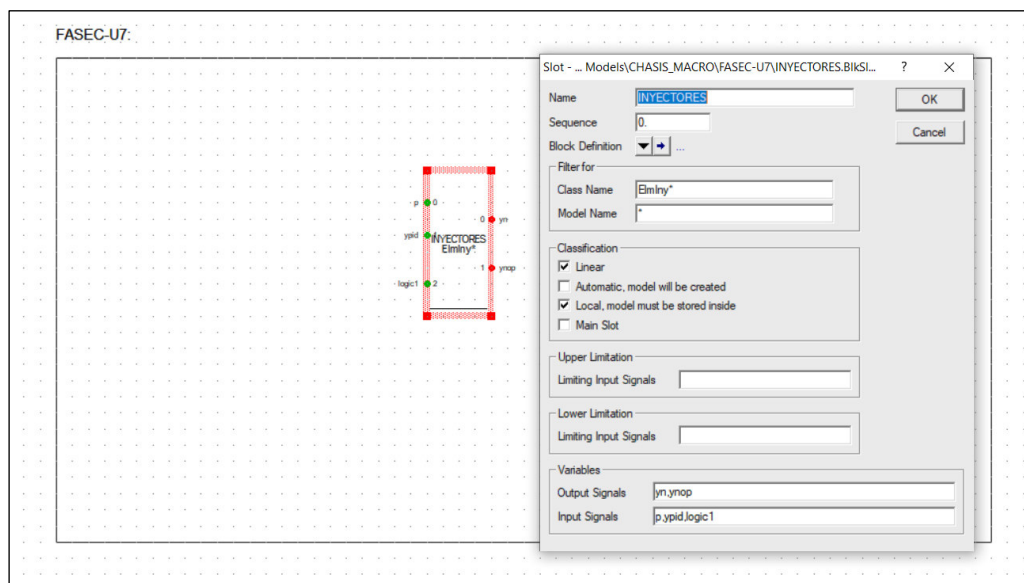
Se procede a crear el Composite Model mediante el cual se relacionan los diferentes diagramas de bloque. En el Composite Model se podrán realizar las conexiones de las

entradas y salidas según requiera su control. La Figura 3.13 muestra el primer paso para la creación del modelo.



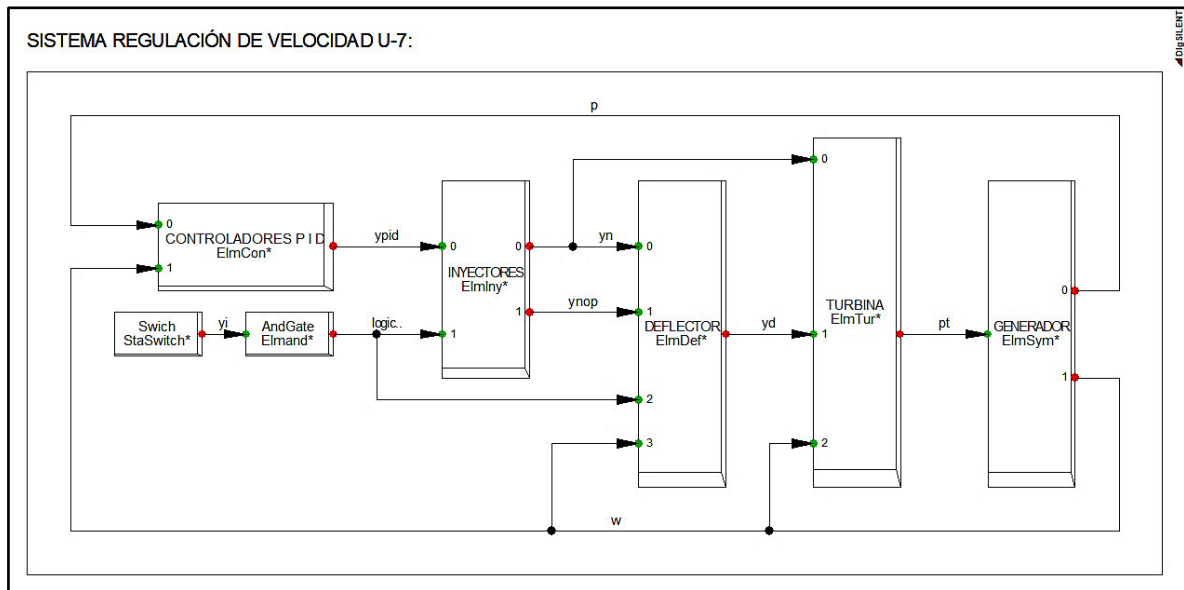
**Figura 3.13.** Selección del Composite Model

Previamente a la creación del Composite Model se debe crear el elemento Frame. Primero se añaden los Slots asociados a los elementos del sistema de regulación y luego se definen las entradas y salidas. Para definir estos parámetros se ingresan a cada uno de los slots, y aparecerá la interfaz para definir lo antes descrito como se muestra en la Figura 3.14.



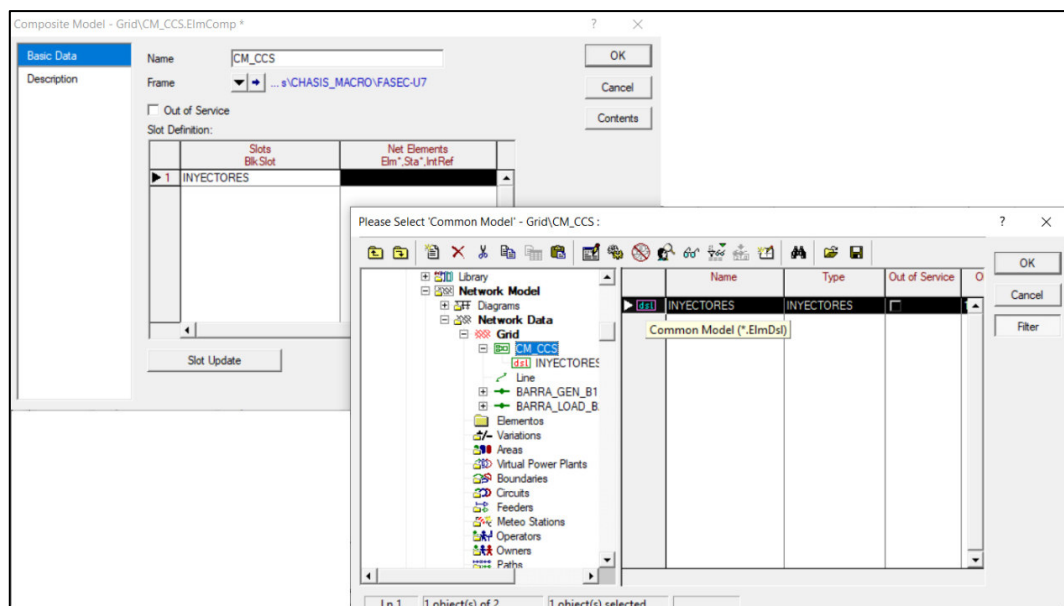
**Figura 3.14.** Creación de un slot en el Common Frame

Una vez definido cada uno de los Slots se realizan las conexiones correspondientes entre ellos, es importante recordar que las señales del generador sincrónico son conocidas; se procede a realizar las conexiones desde este elemento como se muestra en la Figura 3.15.



**Figura 3.15.** Common Frame del sistema de un regulación de velocidad

Después de haber creado el Frame del sistema de regulación de velocidad se genera el Composite Model asociado al regulador. Este Frame permitirá vincular cada uno de los bloques a los controles designados en el Common Model. Este proceso se muestra en la Figura 3.16.



**Figura 3.16.** Asignación del Common Model

De esta manera se procede a modelar los demás diagramas de bloque que forman parte del sistema de regulación de velocidad.

### **3.5.2.3 Modelación de los diagramas de bloque**

En cada diagrama se presentarán los bloques utilizados, las entradas, salidas y las variables de estado. Para una mejor visualización, se presentarán las variables, que requieren una inicialización, en color azul y se dividirá la simulación en diferentes bloques como lo son:

- Controladores PID de velocidad y potencia
- Inyectores
- Deflector
- Turbina Pelton

#### *3.5.2.3.1 Controladores PID de velocidad y potencia*

Como se indicó en anteriormente, el regulador HyCon consta de un lazo que controla la velocidad el cuál puede activarse cuando la unidad no se encuentra interconectada. De igual manera consta con un lazo de control de potencia que se activa cuando el generador sincrónico se encuentra conectado al sistema. Ambos lazos de control tienen un control del tipo PID.

Para unir estos dos lazos se ha incluido un selector a la salida de cada controlador. Este selector se lo programa de manera que cuando la variable  $T_{control}$  (variable booleana) sea igual a 0, funcione el lazo de control de velocidad y cuando su estado sea 1 trabaje el lazo de potencia. En la Figura 3.17 se muestra el diagrama de los controladores PID

Ctr\_PID:

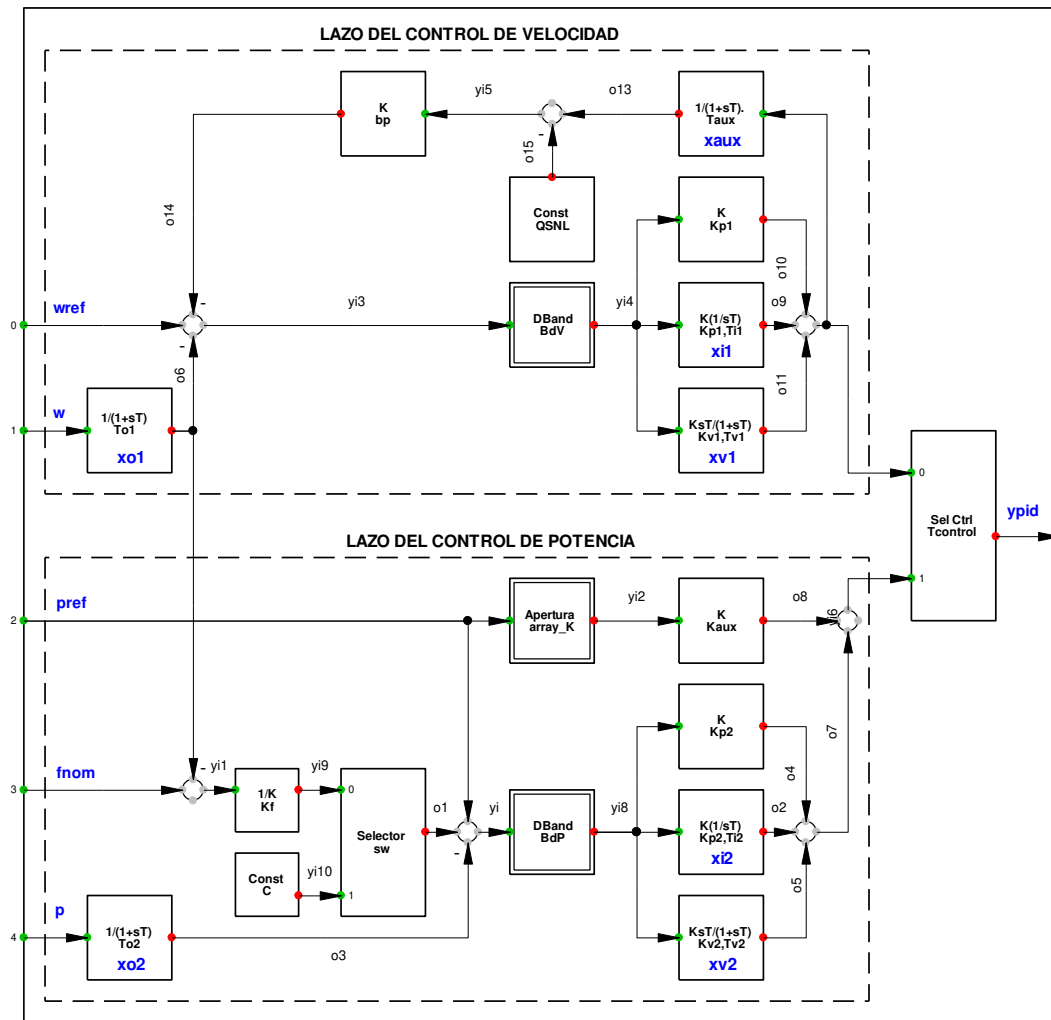


Figura 3.17. Simulación controladores PID velocidad y potencia

*Variable de estado*

Las variables de estado que se encuentran asociadas a los controles PID, presentes en el lazo de potencia y velocidad, se inicializan de la siguiente manera:

En la entrada del lazo de control de velocidad y en el lazo de control de potencia se tienen una etapa de medición representada por un bloque de retardo de primer orden, en este caso las variables de estado se inicializan como se muestra en la Ecuación 3.6 y 3.7.

$$\dot{x}o1 = w \tag{3.6}$$

$$\dot{x}o2 = p \tag{3.7}$$

La variable de estado del bloque integrador en el lazo de control de velocidad se indica en la Ecuación 3.8

$$\dot{x}i1 = \frac{ypid}{Kp1} \quad (3.8)$$

Luego se tiene el bloque derivador que se lo inicializa como se muestra en la Ecuación 3.9.

$$\dot{x}v1 = 0 \quad (3.9)$$

Para la inclusión del estatismo permanente  $bp$  en la etapa de velocidad, se debe incluir un bloque que permita generar una variable de estado auxiliar. En este bloque auxiliar la entrada debe ser igual a la salida, de manera que no se modifique la señal de realimentación  $ypid$ . Esta modificación se la realizó para evitar un error del tipo bucle algebraico que ocurre cuando una entrada es igual a la salida del mismo bloque debido a la existencia de una realimentación. Se debe inicializar como se indica en la Ecuación 3.10.

$$\dot{x}aux = ypid \quad (3.10)$$

Para la etapa de control de potencia, para cuando la unidad se encuentre interconectada, se tendrá una inicialización similar a la etapa de velocidad. En este caso hay que tomar en cuenta el controlador anticipativo reflejado en la matriz de apertura  $array\_K$ . Como se observa en la Figura 3.17 el efecto de este control se suma al del control PID. La variable  $Kaux$  (booleana) permitirá incluir ( $Kaux = 1$ ) o excluir ( $Kaux = 0$ ) el control anticipativo. La Ecuación 3.11 indica la inicialización de la variable de estado asociada al control integral de lazo de potencia y la Ecuación 3.12 se indica la inicialización de la variable de estado en del control derivativo.

$$\dot{x}i2 = \frac{ypid - lapprox(p, array\_K) * Kaux}{Kp2} \quad (3.11)$$

$$\dot{x}v2 = 0 \quad (3.12)$$

### Entradas

En las entradas que se deben inicializar son la velocidad de referencia  $wref$  la cual considera la medición de velocidad  $w$ , el estatismo  $bp$  y el flujo inicial que se lo podría igualar a cero, esta particularidad se lo explicará en simulación la turbina Pelton.

$$wref = w + bp * (ypid - QSNL) \quad (3.13)$$

Para incluir la influencia de la frecuencia cuando el lazo de control de potencia esté activado, se incluye una entrada  $fnom$  que servirá como referencia para la medición de velocidad. Esta variable se encuentra en por unidad por lo que se debe inicializar en 1, lo cual representa 60 Hz.

$$fnom = 1 \quad (3.14)$$



Se debe inicializar la referencia de potencia  $pref$ , en esta variable se incluye la influencia de la frecuencia. El lazo de potencia contiene un selector para escoger o no la influencia de la frecuencia con la máquina conectada a un sistema.

$$pref = p - (select(sw > 0.5, 0, (fnom - w) * \left(\frac{1}{K_f}\right)) \quad (3.15)$$

### Parámetros

En la Tabla 3.1 se indican los valores de los parámetros, y en la Tabla 3.2 contiene la relación de potencia vs apertura que se utiliza en el lazo de control de potencia, esta tabla refleja el control anticipativo.

**Tabla 3.1.** Parámetros y valores de los controladores PID de velocidad y potencia

Parámetros		Valor
<b>Taux</b>	Constante auxiliar estadismo lazo velocidad	0
<b>QSNL</b>	Flujo sin carga	0,025
<b>BdP</b>	Banda muerta de Potencia	0
<b>BdV</b>	Banda muerta de Velocidad	0
<b>Kp1</b>	Ganancia proporcional control PID velocidad	2,15
<b>Kaux</b>	Constante auxiliar estadismo lazo velocidad	1
<b>Kp2</b>	Ganancia proporcional control PID potencia	0,2
<b>To2</b>	Constante de Tiempo medición potencia	0,1
<b>Kf</b>	Constante proporcional influencia de la frecuencia	0,05
<b>Ti2</b>	Constante de Tiempo acción integral control PID potencia	7
<b>Ti1</b>	Constante de Tiempo acción integral control PID velocidad	7
<b>Kv1</b>	Ganancia derivativa control PID velocidad	0
<b>Tv1</b>	Constante de Tiempo acción derivativa control PID velocidad	1
<b>Kv2</b>	Ganancia derivativa control PID potencia	0
<b>Tv2</b>	Constante de Tiempo acción derivativa control PID velocidad	1
<b>Tcontrol</b>	Constante booleana para seleccionar el control w=1, p=0	0
<b>bp</b>	Estadismo permanente	0
<b>sw</b>	Activa influencia frecuencia sw=1 activa, sw=0 desactiva	0
<b>C</b>		0
<b>To1</b>	Constante de Tiempo medición velocidad	0,1

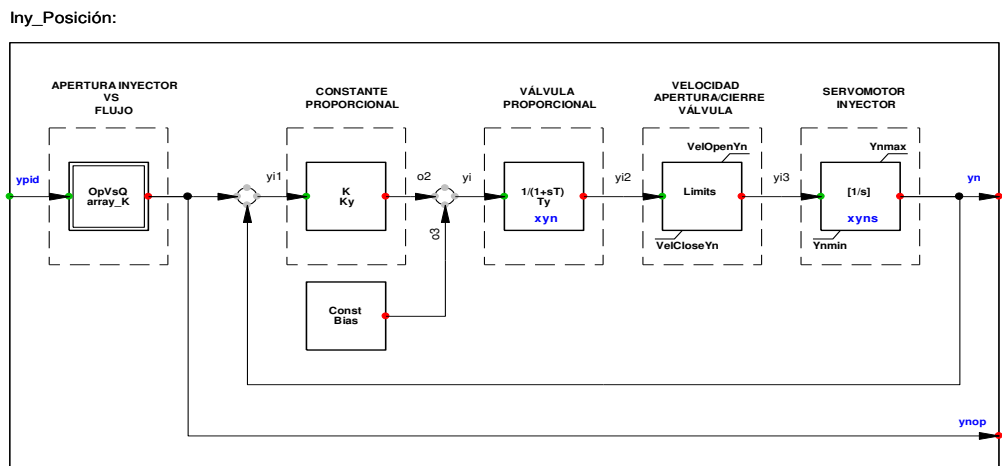
**Tabla 3.2.** Curva característica Apertura inyector vs Caudal inyector

Potencia	Apertura (Caudal)
0,0867754	0,083
0,173551	0,161
0,260326	0,243
0,347102	0,323

0,433877	0,408
0,520653	0,495
0,607428	0,575
0,694203	0,658
0,780979	0,739
0,867754	0,827
0,980562	0,951

### 3.5.2.3.2 Inyectores

Luego de los controladores se encuentra el diagrama de bloque que controla los inyectores que tiene la estructura que se muestra en la Figura 3.18.



**Figura 3.18.** Simulación de los inyectores

#### Variables de estado

En el inyector se tienen bloques de retardo y un integrador en los que se originan las variables de estado. La inicialización guarda relación con los diagramas de bloque mostrados en el Anexo C.

Las variables de estado que del bloque del servomotor (integrador) y de la válvula proporcional (retraso primer orden) se la inicializa como sigue:

$$\dot{x}_{yns} = y_n \tag{3.16}$$

$$\dot{x}_{yn} = 0 \tag{3.17}$$

### Entrada

La entrada  $ypid$  será la relación inversa de la apertura del inyector vs el flujo.

$ypid = \text{Relación Flujo vs Apertura inyector}$

$$ypid = invlapprox(ynop, array\_K) \quad (3.18)$$

### Salida

Como salidas se tiene  $yn$ , posicionamiento del inyector y  $ynop$  que proviene de la salida del  $array\_K$ . Esta señal servirá más adelante para el posicionamiento de los deflectores.

$$ynop = yn \quad (3.19)$$

### Parámetros

En la Tabla 3.3 se indican los parámetros relacionados al lazo del inyector.

**Tabla 3.3.** Parámetros y valores del inyector

	<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>
<b>Ky</b>	Ganancia proporcional de la posición del inyector	4,2
<b>Ty</b>	Constante de tiempo válvula proporcional	0,2
<b>Bias</b>	Posición de equilibrio del lazo de control	0
<b>VelCloseYn</b>	Velocidad de cierre del inyector	-0,0085
<b>Ynmin</b>	Límite mínimo de la posición del inyector	0,005
<b>VelOpenYn</b>	Velocidad de apertura del inyector	0,0085
<b>Ynmax</b>	Límite máximo de la posición del inyector	1

En la Tabla 3.4 se muestra la relación de apertura versus el caudal obtenida en las pruebas de comisionamiento del sistema de regulación.

**Tabla 3.4.** Relación apertura del inyector vs caudal

<b>Caudal Inyector</b>	<b>Apertura Inyector</b>
0	0
0,1	0,072
0,2	0,144
0,3	0,224
0,4	0,308
0,5	0,39
0,6	0,485

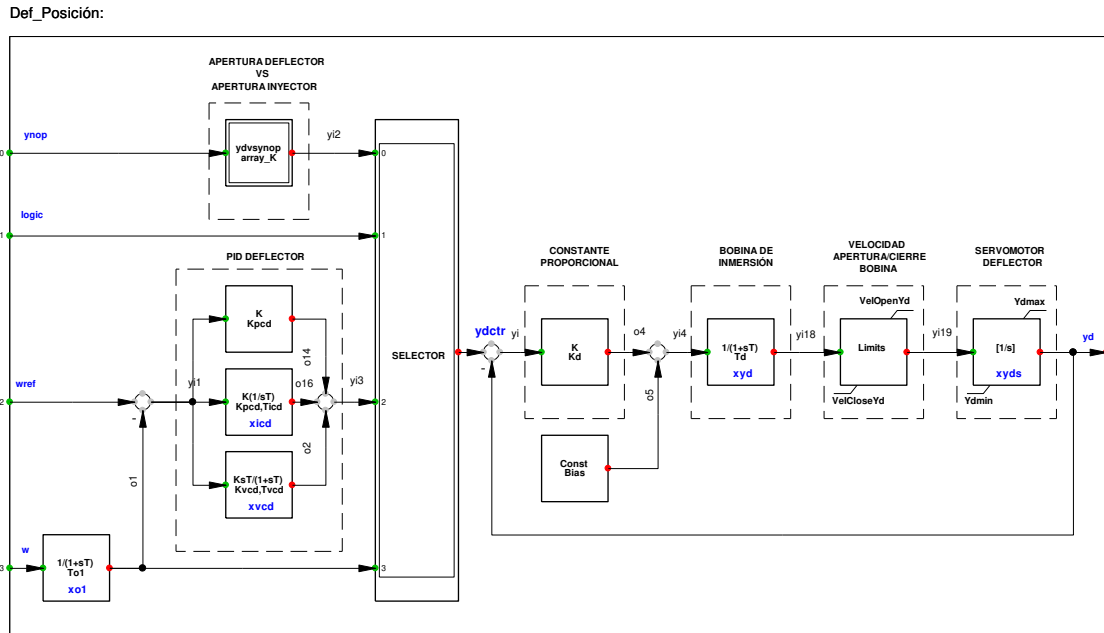
0,7	0,588
0,8	0,702
0,9	0,827
1,00	1,00

### 3.5.2.3.3 Deflector

En la parte izquierda del selector se ubican los bloques que controlan el sistema de posicionamiento del deflector, ubicado a la derecha, mediante la señal de salida *ydctr*. En condiciones normales la señal *ydctr* tendrá un valor de 1 lo que indica que el sistema eléctrico no ha sufrido ninguna anomalía.

Cuando se produzca un rechazo de carga, el deflector funcionará de la siguiente manera:

- El deflector será informado del percance mediante la señal *logic* que proviene del elemento *Switch* que es el interruptor de la carga, en ese momento la señal que pasa a controlar el sistema de posicionamiento es la señal emitida por el controlador PID. Este controlador responde al error de velocidad ocasionado por el rechazo de carga. El valor de la constante proporcional del regulador PID  $K_{pd}$  debe ser alto ya que el deflector debe controlar que la velocidad de la máquina funcione dentro de los parámetros adecuados de tiempo y sobreimpulso.
- Una vez que el sistema se encuentre lo suficientemente estable entonces la señal *ydctr* será proporcionada por la matriz que relaciona la apertura del deflector en función de la apertura del inyector.
- El deflector quedará abierto a un 60%, listo para volver a funcionar ante la posible reinserción de la unidad al funcionamiento en línea.



**Figura 3.19.** Simulación del deflector

### Variables de estado

Las variables de estado que del bloque del servomotor (integrador) y de la bobina de inmersión (retraso primer orden) se la inicializa como sigue:

$$\dot{x}yds = yd \quad (3.20)$$

$$\dot{x}yd = 0 \quad (3.21)$$

Luego se procede a inicializar el lazo PID correspondiente al controlador del deflector, siguiendo la lógica aplicada en los controladores de velocidad y potencia.

$$\dot{x}icd = \frac{ydctr}{Kpcd} \quad (3.22)$$

$$\dot{x}vcd = 0 \quad (3.23)$$

$$\dot{x}o1 = w \quad (3.24)$$

### Entradas

En el caso del deflector se tienen 2 entradas que deben ser inicializadas, la velocidad de referencia y la señal que informa si se ha producido un rechazo de carga.

$$wref = w \quad (3.25)$$

$$logic = 0 \quad (3.26)$$

### Salidas

La salida  $y_d$  será igual a 1 ya que en condiciones iniciales el deflector permanece completamente abierto.

$$y_d = 1 \quad (3.27)$$

A la salida del lazo de control del deflector se tiene la señal  $y_{dctr}$  que se unirá al lazo de posicionamiento del deflector. Hay que tener cuidado con la inicialización de la variable  $y_{dctr}$ , ya que si no se incluye el *Bias* en la inicialización, se presentarán inconsistencias en los resultados.

$$y_{dctr} = y_d - \left(\frac{Bias}{K_d}\right) \quad (3.28)$$

### Parámetros

**Tabla 3.5.** Parámetros del deflector

Parámetro	Valor	
<b>Kvcd</b>	Constante derivativa PID deflector	0
<b>Tvcd</b>	Constante de tiempo lazo derivativo PID	1
<b>Kd</b>	Ganancia proporcional de la posición del deflector	1,5
<b>Td</b>	Constante de tiempo de la bobina de inmersión	0,2
<b>Kpcd</b>	Constante proporcional PID deflector	8
<b>Ticd</b>	Constante de tiempo lazo integral PID	2,5
<b>To1</b>	Tiempo de medición de velocidad	0,1
<b>Bias</b>	Posición de equilibrio del lazo de control	0
<b>VelCloseYd</b>	Velocidad de cierre del deflector	-0,63
<b>Ydmin</b>	Límite mínimo de la posición del deflector	0
<b>VelOpenYd</b>	Velocidad de apertura del deflector	0,045
<b>Ydmax</b>	Límite máximo de la posición del deflector	1

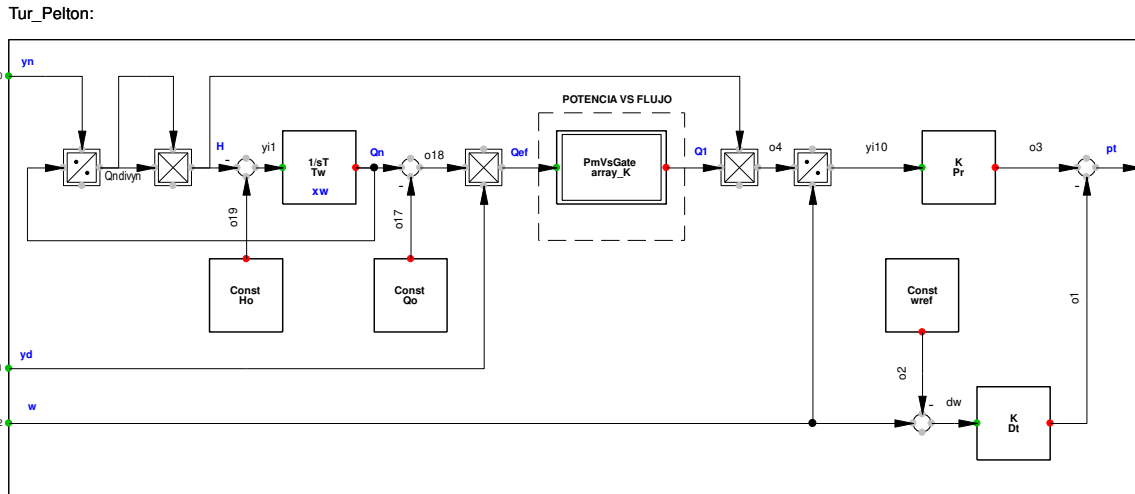
La Tabla 3.6 indica la relación que existe entre el inyector y el deflector, estos datos fueron tomados en las pruebas de comisionamiento.

**Tabla 3.6.** Relación de apertura Inyector vs Deflector

Yn (Inyector)	Deflector (y <sub>d</sub> )
0	0,6
0,25	0,7
0,5	0,8
0,75	0,9
1	1

### 3.5.2.3.4 Turbina Pelton

La Figura 3.20 indica el modelo de la turbina Pelton implementado en PowerFactory. La Tabla 3.7 muestra los parámetros de la turbina Pelton, y la Tabla 3.8 muestra los valores para realizar el refinamiento de la turbina.



**Figura 3.20.** Simulación de la Turbina Pelton

#### Variable de estado

La única variable de estado que se tiene en la turbina pelton es  $xw$ .

$$\dot{x}w = Q_n \quad (3.29)$$

#### Entradas

En este caso la entrada que necesita condiciones iniciales es  $yn$ , para llegar a inicializar esta entrada es necesario inicializar las demás variables que se encuentran resaltadas en color azul, y de derecha a izquierda como se indica a continuación:

$$Q1 = \frac{(pt + (w - 1) * Dt) * \left(\frac{w * Fp}{Pr}\right)}{H_o}$$

$Qef =$  Relación Apertura inyector vs Potencia

$$Qn = \frac{Qef}{yd} + Qo$$

$$y_n = \frac{Q_n}{\text{sqrt}(H_o)} \quad (3.30)$$

### Salidas

La salida de la turbina es  $pt$  y no es necesaria su inicialización, aunque se existen casos en los que esta salida se la inicializa en 1.

### Parámetros

**Tabla 3.7.** Parámetros de la turbina Pelton

Parámetros		Valor
<b>wref</b>	Velocidad de referencia	1
<b>Dt</b>	Damping	0,1
<b>Pr</b>	Valor en MW/MVA_Base	1
<b>Qo</b>	Flujo inicial	0
<b>Ho</b>	Salto inicial comúnmente=1	1
<b>Tw</b>	Constante de tiempo del Agua	1,3122

Se debe ingresar la matriz que relaciona la potencia activa con el flujo o apertura de inyectores. Se recomienda ingresar una cantidad de datos mayor a 100. Estos datos se generaron previamente en Excel, para ello se utilizó la ecuación polinomial de tercer orden descrita por la Ecuación 3.31.

$$P_m = -0,5594 * y_n^3 + 0,2795 * y_n^2 + 1,286 * y_n - 0,02167 \quad (3.31)$$

En el eje  $x$  ( $y_n$ ) se generan valores del 0 al 1 en paso de 0,01 y en el eje  $y$  ( $P_m$ ) se evalúa la ecuación para cada valor de  $x$ .

**Tabla 3.8.** Relación de Potencia Vs Apertura Compuerta

Yn [p.u]	Pm [p.u]
0,017	0,00087437
0,018	0,00210925
0,019	0,00334494
0,020	0,00458144
⋮	⋮
0,999	0,9599686
1	1



### 3.5.2.3.5 Sistema Completo

Una vez realizada la simulación de los elementos que forman parte del regulador de velocidad, se procede a crear un Frame en donde se crearán los slots necesarios para representar el sistema de regulación de velocidad incluida la unidad generadora.

Además de los sistemas presentes en un regulador de velocidad, se incluye un bloque denominado *Switch* como se muestra en la Figura 3.21. Este bloque proporcionará información del instante en el que se produce el rechazo de carga ya que está ligado directamente al estado de apertura y cierre del interruptor que conecta la carga con la barra de alimentación. La salida del bloque *Switch* es una variable booleana cuyo valor es 1 cuando la carga está conectada a la barra y 0 cuando se produce una desconexión, como ocurre en un rechazo de carga.

La Figura 3.21 muestra la simulación de todos los diagramas de bloque usando el procedimiento anteriormente detallado junto con la descripción de las variables de entrada y salida que se detallan en la Tabla 3.9.

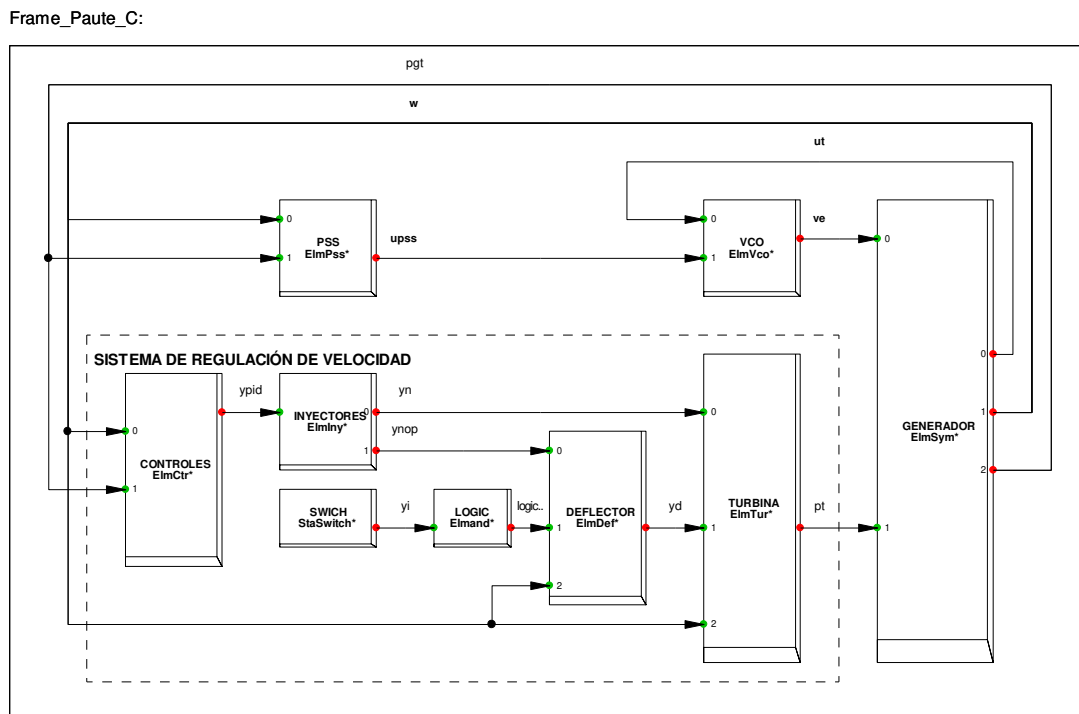


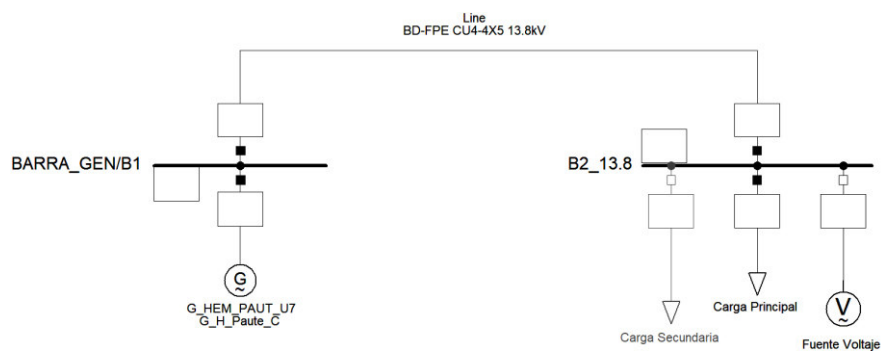
Figura 3.21. Sistema de regulación de velocidad Fase C

**Tabla 3.9.** Variables de entrada y salida del sistema regulador de velocidad

Bloques		Nombre	Descripción
<b>Controladores PID</b>	Entradas	p	Potencia
		w	Velocidad
	Salida	ypid	Señal controlador PID
<b>Inyectores</b>	Entrada	ypid	Señal controlador PID
	Salidas	yn	Señal del inyector
		ynop	Señal de la relación de apertura
<b>Deflector</b>	Entradas	yn	Señal del inyector
		ynop	Señal de la relación Flujo vs apertura
		logic	Señal booleana del switch
	Salida	w	Velocidad
		yd	Señal del deflector
<b>Turbina</b>	Entradas	yn	Señal del inyector
		yd	Señal del deflector
		w	Velocidad
	Salida	pt	Potencia de la turbina
<b>Generador</b>	Entrada	pt	Potencia de la turbina
	Salidas	pgt	Potencia
		w	Velocidad
		ut	Voltaje

### 3.5.2.4 Sistema de prueba

En la Figura 3.22 se presenta la red de prueba que incluye generador, línea de transmisión y carga. Los parámetros del generador se muestran en la Tabla 3.10. En esta red se ejecutarán simulaciones que permitirán analizar las respuestas del sistema regulador de velocidad.



**Figura 3.22.** Diagrama unifilar del generador 7 de la Fase "C"

El sistema de prueba contiene un generador, cuyos datos se encuentran en la Tabla 3.10. El diagrama presenta dos cargas cuyos datos de potencia dependerá de las pruebas que se apliquen, y una fuente de voltaje. Esta fuente se activará para simular la conexión de la unidad al sistema.

**Tabla 3.10.** Parámetros del Regulador de la Unidad 7 de la fase “C”

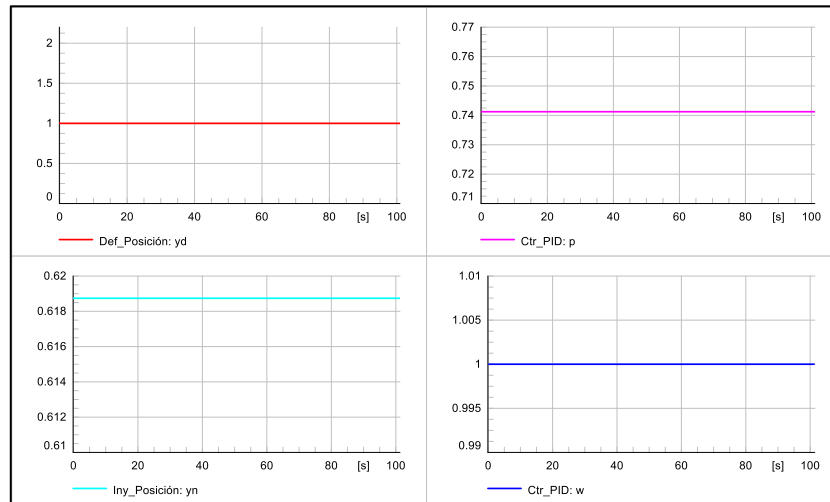
Parámetros	Fase C
Capacidad nominal [MVA]	127,7
Frecuencia nominal [Hz]	60
Factor de potencia	0,9
Voltaje nominal [kV]	13,8
Conexión	YN
Reactancia eje directo $X_d$ [p.u.]	1,0225
Reactancia eje cuadratura [p.u.]	0,6334
Límite de potencia reactiva mínima [MVA]	60
Límite de potencia reactiva máxima [MVA]	60
Reactancia secuencia cero $X_0$ [p.u.]	0,1
Reactancia secuencia negativa $X_2$ [p.u.]	0,22
Resistencia secuencia negativa $R_2$ [p.u.]	0,008
Reactancia eje directo subtransitorio $X_d''$ saturada [p.u.]	0,1992
Resistencia del estator [p.u.]	0,00265
Relación de corto circuito	1,06
Constante de inercia $H$ [MJ/MVA]	3,133
Constante de tiempo transitoria de eje directo $T_d''$ , cortocircuito [s]	1,907
Constante de tiempo subtransitoria de eje directo $T_d''$ cortocircuito [s]	0,031
Constante de tiempo subtransitoria de eje cuadratura $T_q''$ cortocircuito [s]	0,053
Reactancia eje directo transitoria $X_d'$ [p.u.]	0,2805
Reactancia eje directo subtransitoria $X_d'$ [p.u.]	0,195
Reactancia eje cuadratura subtransitoria $X_q''$ [p.u.]	0,2404
Reactancia de Potier [p.u.]	0,218
Saturación de la máquina a voltaje nominal – SAT 1,0 – [p.u.]	0,104
Saturación de la máquina a voltaje nominal – SAT 1,2 – [p.u.]	0,35

### 3.5.3 Pruebas iniciales

En esta sección se ejecutarán las pruebas básicas al sistema de regulación de velocidad, a excepción del rechazo de carga. Las pruebas de rechazo se aplicarán en la sección de contrastación del sistema de velocidad porque se tiene un registro de estas pruebas realizadas durante el comisionamiento.

### 3.5.3.1.1 Pruebas de estado estable

Antes de realizar las pruebas de variación de potencia y frecuencia se debe evaluar la respuesta del sistema en estado estable, es decir sin ninguna perturbación. Luego de realizar la simulación se verifican las respuestas de las variables de: velocidad, potencia de la máquina. Es importante ejecutar esta prueba ya que si se producen variaciones en la respuesta de estado estable el modelo del sistema no será válido.

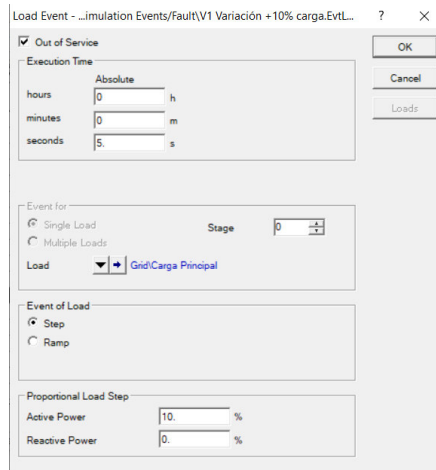


**Figura 3.23.** Pruebas en estado estable

Como se observa en la Figura las señales no presentan ninguna anomalía, se observa que son constantes en el tiempo, por lo que se puede concluir que la inicialización del modelo es la adecuada.

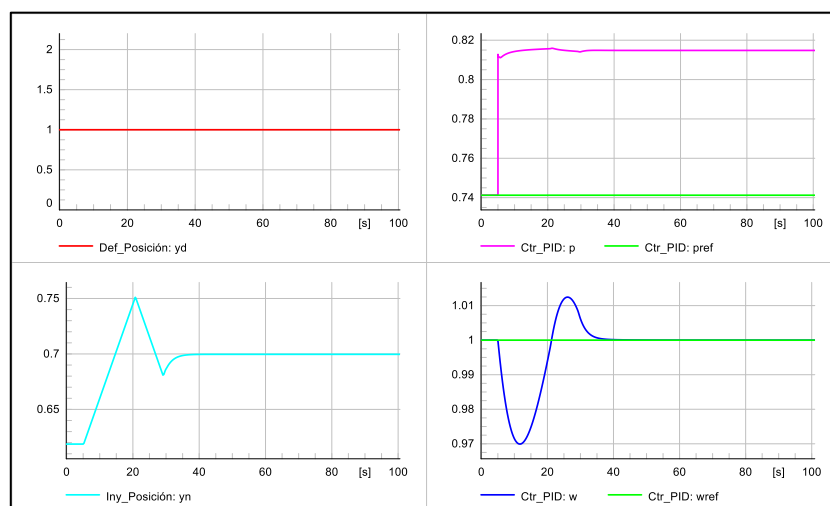
### 3.5.3.1.2 Variación del +/- 10% de la carga

Para realizar esta prueba se crea un evento de carga que permite ingresar el tiempo al cual se produce la variación y el porcentaje de este, como se indica en la Figura 3.24.



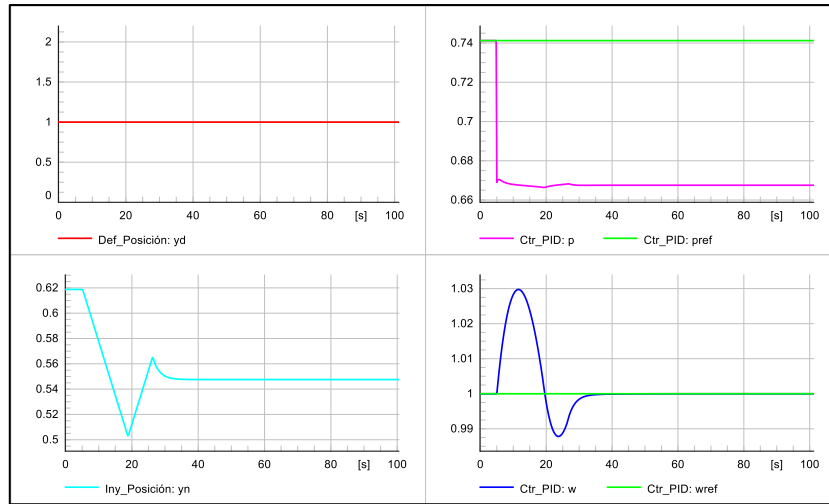
**Figura 3.24.** Evento de carga

Para esta prueba se configuró la carga alrededor del 75%, 85,39 MW. Luego de un tiempo  $t = 5 \text{ s}$  se producen variaciones del 10% en la carga. En la Figura 3.25, cuando se incrementa la carga, se observa que se produce una caída en la velocidad al 0,97 p.u pero se recupera al valor de 1 p.u en tiempo igual a 33 s, lo que representa un adecuado funcionamiento del regulador. En el inyector se observa que se abre a valor igual a 0,7505 p.u y se estabiliza en 0,699 p.u. En la potencia el valor se estabiliza al valor deseado 0,8148 p.u, es decir un 10% mayor a la carga inicial.



**Figura 3.25.** Incremento del 10% de la carga

En lo que se refiere a la variación del -10% de la carga la velocidad se presenta un pico en la velocidad igual a 1,029 p.u y luego de un tiempo  $t = 35 \text{ s}$  alcanza la velocidad de referencia. El inyector en el instante de variación se cierra a 0,505 p.u y una vez estabilizado se abre a un 0,548 p.u.

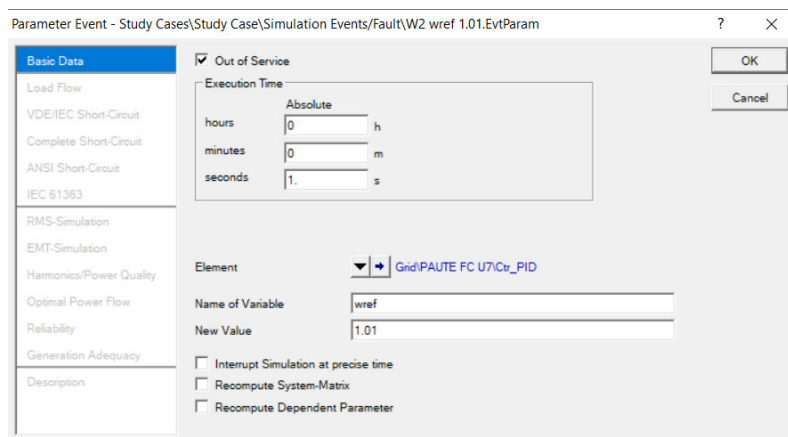


**Figura 3.26.** Decremento del 10% de la carga

Se puede observar, tanto en incremento como decremento de carga, que el elemento encargado de impedir o permitir el paso del agua a la turbina es el inyector, en estas pruebas el deflector permanece abierto completamente es decir su valor es igual a 1 p.u.

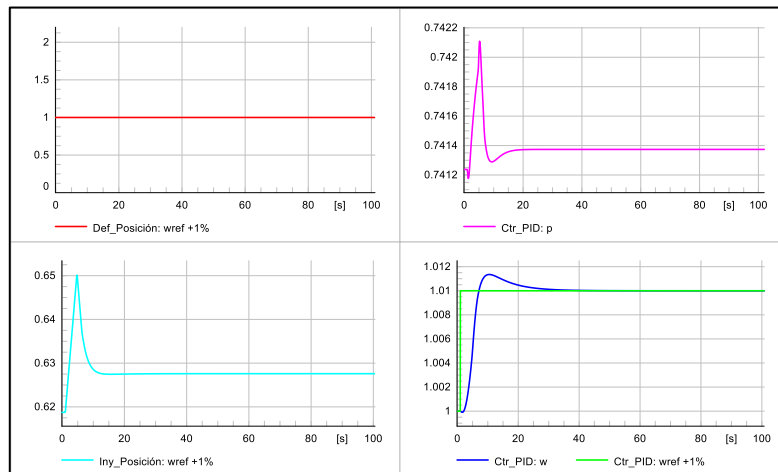
### 3.5.3.1.3 Prueba de escalón en la velocidad de referencia

Para realizar esta prueba en PowerFactory, se crea un evento de simulación llamado *Parameter Event* (EvtParam), se configura el tiempo al cual se producirá el escalón  $t = 1$  s, luego en la opción de elemento se escoge el controlador PID, finalmente se establece el valor de la entrada a ser perturbada  $w_{ref}$  a un valor  $\pm 1\%$  del valor inicial,  $1,01$  p.u., como se muestra en la Figura 3.27.



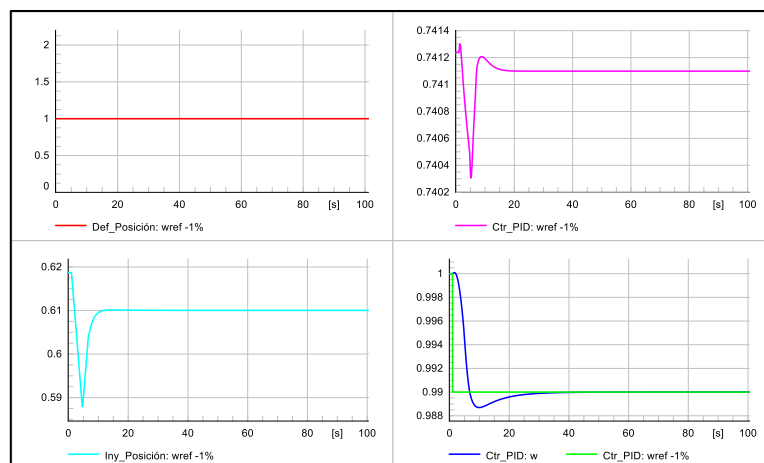
**Figura 3.27.** Simulación escalón de velocidad

En la Figura 3.28 se observa que el sistema de control de velocidad alcanza el valor de referencia a un tiempo igual a 7,12 s y se estabiliza en un tiempo cercano a 32 s. En el caso de la potencia se observa un pico en el instante que se da el paso de velocidad, pero se logra estabilizar luego de 19 s. En el inyector también se observa un sobrepico, que se produce ya que debe haber una mayor apertura para cumplir con el aumento en la consigna de velocidad, por lo que se puede concluir que el regulador en el lazo de velocidad funciona de manera correcta.



**Figura 3.28.** Variación del +1% en la velocidad de referencia

En el caso de que se da una variación negativa de la velocidad igual al -1%, se alcanza el valor de consigna a los 6,72 s, se produce un pico negativo alrededor del 1% y se logra estabilizar luego de 32 s. Para el caso de la potencia se produce un pico negativo de menos de 1%, y se estabiliza luego de 18 s. En el caso del inyector su valor decae a 0,5873 p.u, y se estabiliza en 0,6098 p.u luego de 10 s.



**Figura 3.29.** Variación del -1% en la velocidad de referencia

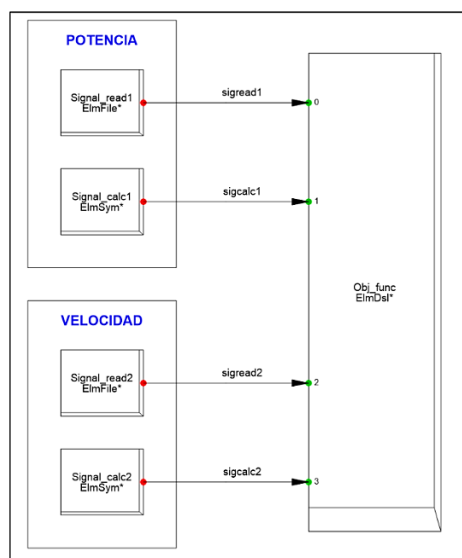
Se puede observar un similar comportamiento en el caso de un escalón positivo y negativo en la velocidad de referencia. En ambos casos se observa que el deflector se comporta de manera requerida, ya que no se produce su acción para variaciones de velocidad pequeñas, pero sobre todo porque no se ha producido un rechazo de carga. En ambos casos la velocidad se mantiene al valor de la consigna en el transcurso del tiempo.

### 3.5.4 IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS APLICANDO EL ALGORITMO PSO

Previamente a la identificación de parámetros se realizó el planteamiento de la función objetivo a través de la creación de un modelo compuesto como se indica en la Figura 3.30. Este modelo permite obtener el error entre las señales tomadas en las pruebas de comisionamiento y la simulación. Las señales medidas se tienen almacenadas en una base de datos por lo que el bloque correspondiente a ellas deberá apuntar a un elemento externo.

Para el caso de las señales simuladas se tomará la velocidad y la potencia del generador presente en la simulación. En el caso que el regulador está funcionando en la etapa de velocidad, es decir la red aislada, la función objetivo tomará en cuenta solamente el error entre las velocidades medida *sigread2* y simulada *sigcalc2*. En el caso que se requiera identificar los parámetros del lazo de potencia de los controladores PID entonces se utilizarán las señales de potencia medida *sigread1* y simulada *sigcalc1*. En este caso no fue necesario identificar los parámetros del lazo de potencia.

En cada iteración se mide el error entre las señales ya que el algoritmo PSO cambia los parámetros modificando de esta manera la señal simulada, por ende, se modifica el error.



**Figura 3.30.** Modelo compuesto de la función objetivo



Se procede a relacionar la función objetivo con el DPL que permitirá realizar los cálculos. La función objetivo se la ingresa como un parámetro de entrada de tipo objeto como se visualiza en la Figura 3.31.

Name: FObj\_HYGOV

General Selection: [v] [→]

Input parameters:

	Type	Name	Value	Unit	Description
1	object	x			
2	object	Control			
3	object	Deflector			
4	object	Inyector			
5	object	Turbina			
6	object	DSL_fobj			
7	object	Res			
8	object	Eventos			

External Objects:

	Name	object	Description
▶ 1	Ini	Ini	
2	Sim	Sim	

**Figura 3.31.** Parámetros de entrada y objetos externos de la función objetivo

Después de tener ingresada la función objetivo en del DPL, se utiliza el algoritmo PSO para realizar la parametrización. Antes de realizar la ejecución se deben ingresar variables, entre las más importantes están el número de partículas y el número máximo de iteraciones como se indica en la Figura 3.32.

Name: PSO

General Selection: [v] [→]

Input parameters:

	Type	Name	Value	Unit	Description
1	int	pop_size	10		Número de población
2	int	maxiter	50		
3	int	nParam			
4	object	fval			
5	object	Limites			
6	int	print	1		
7	int	plot	1		
8	object	Convergence			

**Figura 3.32.** Parámetros de entrada del algoritmo PSO

Una vez que se tiene definido el algoritmo PSO se procede a realizar la identificación de parámetros. Las variables que se deben ingresar en esta identificación son el número de parámetros cuyos valores de deben buscar expresado por *nParam*, número de iteraciones *iter\_pso*, y el número de población *pop\_size\_pso*. Como objetos externos se cargan el código en DPL y DSL de la función objetivo *fval* y *DSL\_DIF*, respectivamente. De igual forma se debe cargar los bloques DSL asociados a los controladores que forman parte del regulador

de velocidad. En estos controladores se encuentran los parámetros a identificar. En la Figura 3.33 se indican los parámetros de entrada y los objetos externos ingresados.

The screenshot shows a software interface for parameter estimation. At the top, there is a text field labeled 'Name' containing 'WV\_Parameter Estimation' and a 'General Selection' dropdown menu. Below this, there is a section titled 'Input parameters:' containing a table with the following data:

	Type	Name	Value	Unit	Description
1	int	nParam	7		Numero de parámetros a identificar
2	int	iter_pso	1000		Número de iteraciones PSO
3	int	pop_size_pso	10		Número de población PSO
4	int	print	1		
5	int	plot	1		

Below the input parameters table is a section titled 'External Objects:' containing another table with the following data:

	Name	object	Description
1	fval	FObj_HYGOV	
2	x_pso	Pos_act	
3	Control	Ctrl_PID	
4	Deflector	Def_Posición	
5	Inyector	Iny_Posición	
6	Turbina	Tur_Pelton	
7	DSL_fobj	DSL_DIF	
8	Eventos	EventosGovernor	

**Figura 3.33.** Parámetros de entrada y objetos externos de la estimación de parámetros

Los principales parámetros que se deberán identificar son,  $Kp1$  constante proporcional del controlador PID en la etapa de velocidad,  $Ti1$  Constante de Tiempo acción integral control PID velocidad,  $Kp_{cd}$  Constante proporcional PID deflector,  $Ticd$  Constante de tiempo lazo integral PID del deflector,  $Ky$  ganancia proporcional de la posición del inyector,  $Kd$  ganancia proporcional de la posición del deflector,  $Tw$  constante de tiempo del agua de la turbina pelton.

Se escogieron estas variables ya que previamente se realizó una identificación de parámetros mediante prueba y error y se observó que estos parámetros son los de mayor incidencia en la respuesta de la velocidad ante un rechazo de carga.

La manera de ingresar los parámetros a identificar se indica en la Figura 3.34.

```

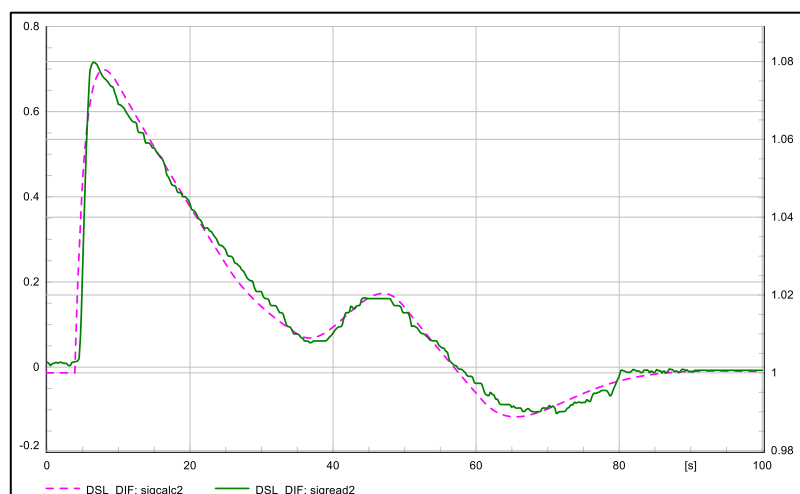
if (nParam >= 1) {
    Control:Kp1 = x.Get(1);
}
if (nParam >= 2) {
    Control:Til = x.Get(2);
}
if (nParam >= 3) {
    Deflector:Kpcd = x.Get(3);
}
if (nParam >= 4) {
    Deflector:Ticd = x.Get(4);
}
if (nParam >= 5) {
    Inyector:Ky = x.Get(5);
}
if (nParam >= 6) {
    Deflector:Kd = x.Get(6);
}

```

**Figura 3.34.** Parámetros a identificar

En la Figura 3.35 se encuentran las gráficas de la respuesta de la velocidad medida en pruebas de comisionamiento y la velocidad simulada. El evento que se toma en cuenta para la identificación de parámetros es el rechazo de carga del 50% cuando la máquina está aislada del sistema. El evento de rechazo de carga se produce al segundo 3,902 y se escogió el rechazo del 50% ya que a este nivel se presentaron mejores resultados.

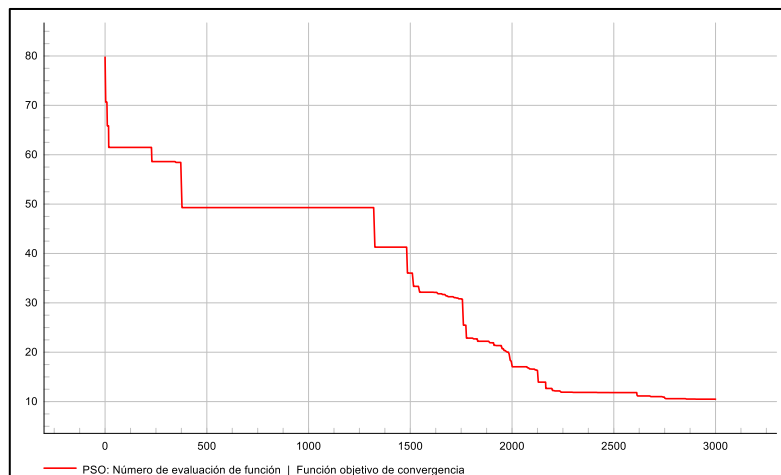
Los códigos asociados a los DPL de la función objetivo, algoritmo PSO e identificación de parámetros se pueden encontrar en [30]. En esta bibliografía se describe de manera detallada el procedimiento usado en este trabajo de titulación.



**Figura 3.35.** Comparación de señales, velocidad en un rechazo de carga del 50%

En la Figura 3.36 se observa un error de 79,77 aproximadamente, que se produce al inicio de la búsqueda de los parámetros. Mientras se avanza con el proceso de identificación se

visualiza que el error va disminuyendo y se reduce hasta un valor constante cercano a 10 al tiempo que el número de iteraciones alcanza las 2900, aproximadamente. A partir de este valor el error se mantiene constante, a pesar de ello y debido a que se trata de un error relativamente pequeño, se observa que los resultados en la señal simulada se aproxima a la señal tomada en las pruebas de comisionamiento. El número de iteraciones total es igual a 3000.



**Figura 3.36.** Error cuadrático en la identificación de parámetros

En la Tabla 1.1 se muestran los valores límites de los valores identificados, así como los valores previos y posteriores a la parametrización. De manera general se observa un incremento en todas las variables a excepción de la constante. Los valores que presentan un mayor incremento están relacionados con el control de la posición del deflector. En lo que se refiere a las ganancias  $K_{pcd}$  y  $K_d$ , se puede decir que aumentan con el objetivo de evitar un sobrepico muy elevado en la velocidad después del rechazo de carga.

La constante  $K_{p1}$ , tiene un rango pequeño de variación con el objetivo de cumplir lo mencionado en el punto 1.3.3.3 la cual indica que usualmente este valor es igual a 3. Al igual que  $K_{p1}$  el valor de  $T_{i1}$  también tiene un rango pequeño ya que al realizar prueba y error se observó que las mejores respuestas del sistema se producían con  $T_{i1}$  moviéndose en el intervalo indicado.

**Tabla 3.11.** Parámetros identificados

Parámetros	Controladores PID		Deflector		Inyector	Deflector
	Kp1	Ti1	Kpcd	Ticd	Ky	Kd
Límite inferior	2,4	7.	0,1	0,1	0,1	0,1
Límite superior	3	9	20	100	20	20
Valores Previos	2,15	7	8,5	4	4,22	0,42
Parametrización	2,502686	7,806590	10,300083	16,544346	8,825155	14,522290

### 3.5.5 CONTRASTACIÓN CON PRUEBAS DE COMISIONAMIENTO

Las pruebas de comisionamiento que se utilizarán para la contrastación serán los rechazos de carga, y las respuestas a las entradas paso, de diferente porcentaje, en la potencia de referencia cuando la unidad se encuentre conectada al sistema de potencia. Esta contrastación permitirá validar el modelo y evaluar la precisión del regulador simulado.

Para realizar la contrastación con las pruebas de comisionamiento previamente se obtuvo la información de las gráficas a través del software Web Plotter. Este programa permite realizar un proceso de descripción inversa, es decir, es un programa que permite extraer los datos numéricos de las gráficas de las pruebas realizadas. Estas gráficas se presentan en el Anexo A. y el proceso de extracción de datos se lo indica en el Anexo E.

#### 3.5.5.1 Rechazos de carga

En la simulación en PowerFactory para el rechazo de carga, se inicia la máquina conectada a una carga cuyo porcentaje se configura de acuerdo con los requerimientos de cada prueba. Luego se debe iniciar la simulación y a partir de un tiempo determinado se abre súbitamente el disyuntor que conecta la carga a la barra de potencia, este proceso se lo logra con la creación de un *Switch event* configurado en el modo apertura. En estas pruebas los resultados que se deben graficar son: apertura de inyector, apertura de deflector, potencia del generador sincrónico y velocidad.

Como se observa de la Figura 3.37 a la Figura 3.39 se ejecutó diferentes grados de rechazo de carga correspondiente al 50%, 75%, y 100%. En estas gráficas se presentan los resultados, tanto de las pruebas de comisionamiento (línea azul) como de la simulación (línea roja). Las variables que se grafican son de velocidad, apertura de inyectores, apertura de deflectores, y potencia eléctrica.

#### 3.5.5.1.1 Deflectores

Se observa la acción de los deflectores, que actúa para que la frecuencia no exceda el límite permitido, en caso de un rechazo de carga. La velocidad del cierre del deflector en un rechazo viene determinada por el controlador PID del lazo de deflector es decir que si se requiere una mayor velocidad en la respuesta se debe variar los parámetros de: constante proporcional  $K_{pcd}$  y tiempo de integración  $T_{icd}$ .

El tiempo de cierre del deflector en ningún caso supera los 7 s para el cierre, el cual es un tiempo muy corto comparado con el tiempo de cierre de los inyectores. Por lo que se puede deducir que el deflector actúa como una protección de sobrevelocidad en el sistema de regulación. Una vez que se empieza a estabilizar la velocidad de la unidad, los deflectores se empiezan a abrir a una consigna determinada por la relación de apertura que existe entre deflectores e inyectores.

Se observa que la tendencia de apertura de los deflectores, luego del cierre de los inyectores, tiene una apreciable diferencia entre la simulación y la medición realizada en campo. El efecto que se produce durante la apertura del deflector, cuando en la máquina se empieza a estabilizar su velocidad, se debe a la bobina de inmersión que comanda la apertura y cierre de los deflectores.

En las pruebas de precomisionamiento no se producía este efecto, como se puede comprobar en las gráficas del Anexo B. Sin embargo, y debido a una modernización de los sistemas de control, se cambió el actuador electrohidráulico por una bobina de inmersión. A pesar de que la bobina cumple la misma función del actuador, que es comandar a los deflectores, se observa que su comportamiento es distinto. Para lograr una respuesta igual en el deflector se debería obtener un modelo más detallado de la bobina de inmersión.

#### 3.5.5.1.2 Inyectores

Los inyectores necesitan mayor tiempo para cerrarse completamente luego del rechazo de carga. Los inyectores del modelo simulado presentan la misma tendencia de cierre que la medición, durante el rechazo de carga. Una vez que la velocidad de la máquina se estabiliza los inyectores se abren a un valor cercano al 2%. En la simulación, la apertura inicial de los inyectores en todos los niveles de potencia es similar a la de las pruebas realizadas en campo, esto se logra por el refinamiento del modelo de la turbina.

### 3.5.5.1.3 Velocidad

En el caso de los rechazos de carga del 75% y 100% se produce una mayor diferencia en las velocidades máximas entre la simulación y los datos adquiridos en la medición. Sin embargo, las tendencias que se observan en el comportamiento de las velocidades son similares.

En el caso del rechazo de carga del 100% se observa una mayor sobrevelocidad cuyos valores se los indicarán en la sección 3.5.5.1.4. Este fenómeno no se produce en campo ya que en la central se tienen limitadores de velocidad y caudal, lo cual evita que la velocidad supere el un valor establecido (1,08 p.u) sin importar el nivel de potencia al que se producen los rechazos de carga. En los tres casos, la velocidad se estabiliza en 1 p.u lo cual es un comportamiento adecuado.

### 3.5.5.1.4 Criterios de análisis y valores MSE

A continuación se presentan los criterios de análisis de los rechazos de carga descritos en el punto 3.4.1.2 así como el valor error medio cuadrado de la apertura de los deflectores e inyectores, la velocidad y la potencia.

En las tablas en las que se presentan los valores para el análisis del rechazo de carga, se incluyen el porcentaje de apertura de los inyectores así como los tiempos de cierre de los deflectores e inyectores.

**Tabla 3.12.** Resultados rechazo de carga 50%

Prueba de rechazo de carga 50%							
	Velocidad máxima %	Velocidad mínima %	Tiempo hasta w máxima [s]	Tiempo de estabilización [s]	Apertura Inyectores %	Tiempo de Cierre [s]	
						Inyector	Deflector
<b>Medición</b>	108,00	99,22	2,80	76,07	39,5	44,88	6,21
<b>Simulación</b>	107,7	98,84	3,93	80,83	38,6	45,82	5,93

**Tabla 3.13.** MSE de las variables del rechazo de carga 50%

	Deflector	Inyector	Potencia	Velocidad
<b>MSE</b>	0,005544	2,835E-5	0,000215	5,369E-6

**Tabla 3.14.** Resultados rechazo de carga 75%

Prueba de rechazo de carga 75%							
	Velocidad máxima %	Velocidad mínima %	Tiempo hasta w máxima [s]	Tiempo de estabilización [s]	Apertura Inyectores %	Tiempo de Cierre [s]	
						Inyector	Deflector
<b>Medición</b>	108,3	99,44	2,84	99,82	61,9	72,301	5,14
<b>Simulación</b>	108,3	99,86	3,02	115	62,4	71,643	3,78

**Tabla 3.15.** MSE de las variables del rechazo de carga 75%

	Deflector	Inyector	Potencia	Velocidad
<b>MSE</b>	0,00929	3,416E-4	2,035E-4	5,718E-5

**Tabla 3.16.** Resultados rechazo de carga 100%

Prueba de rechazo de carga 100%							
	Velocidad máxima %	Velocidad mínima %	Tiempo hasta w máxima [s]	Tiempo de estabilización [s]	Apertura Inyectores %	Tiempo de Cierre [s]	
						Inyector	Deflector
<b>Medición</b>	108	99	3,70	165,52	97,70	111,41	6,16
<b>Simulación</b>	113,1	96,15	1,71	155,86	99	117	2,06

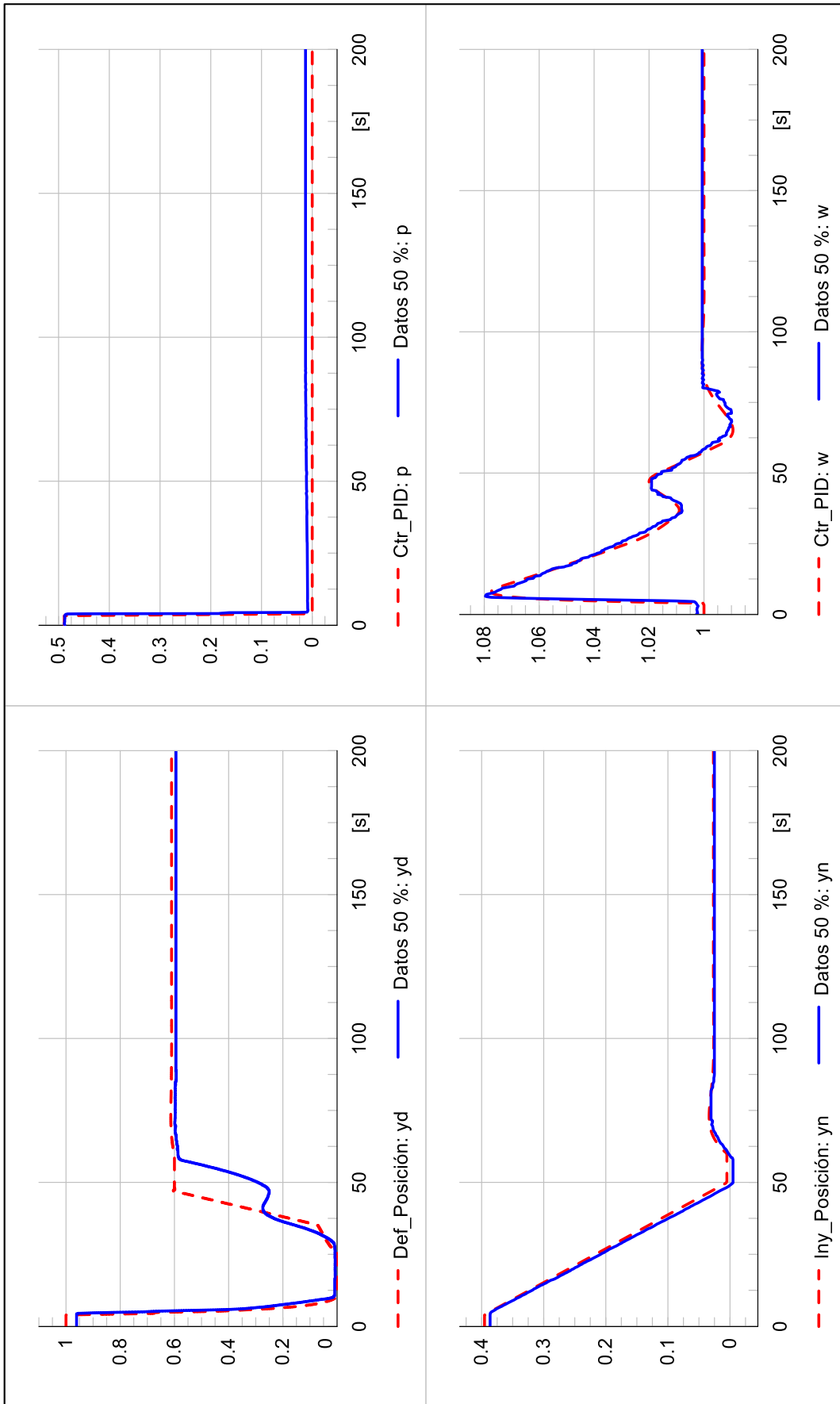
**Tabla 3.17.** MSE de variables del rechazo de carga 100%

	Deflector	Inyector	Potencia	Velocidad
<b>MSE</b>	0,0259	4,419E-4	0,00133	4,27E-4

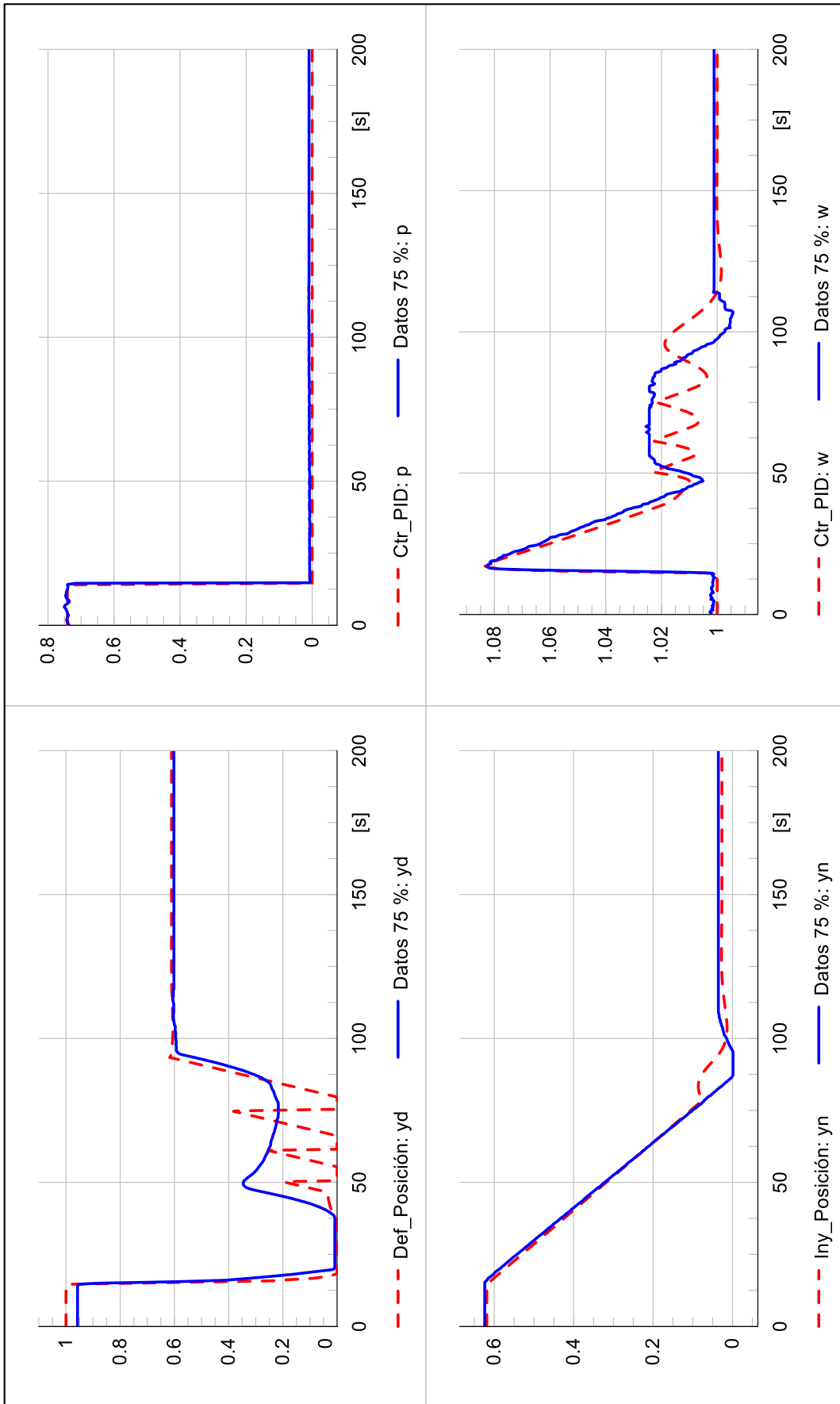
Al observar las tablas se puede concluir que los mejores resultados se produjeron para rechazos de carga al 50%. Los índices correspondientes al error cuadrático medio, indicados en la Tabla 3.13, a comparación con la de otros niveles, son menores particularmente en los casos del deflector y de la velocidad.

En general, los valores de los criterios de rechazo de carga son similares para la simulación y medición, a excepción de la velocidad en los niveles del 100%. En este nivel la velocidad máxima en la simulación es igual a 112,98%. En cambio, en la medición siempre es igual a 108%. Con respecto a los valores MSE se observan que son muy bajos lo que indica un adecuado modelamiento de los sistemas. A continuación, se presentan las gráficas de los rechazos de carga a diferentes niveles.

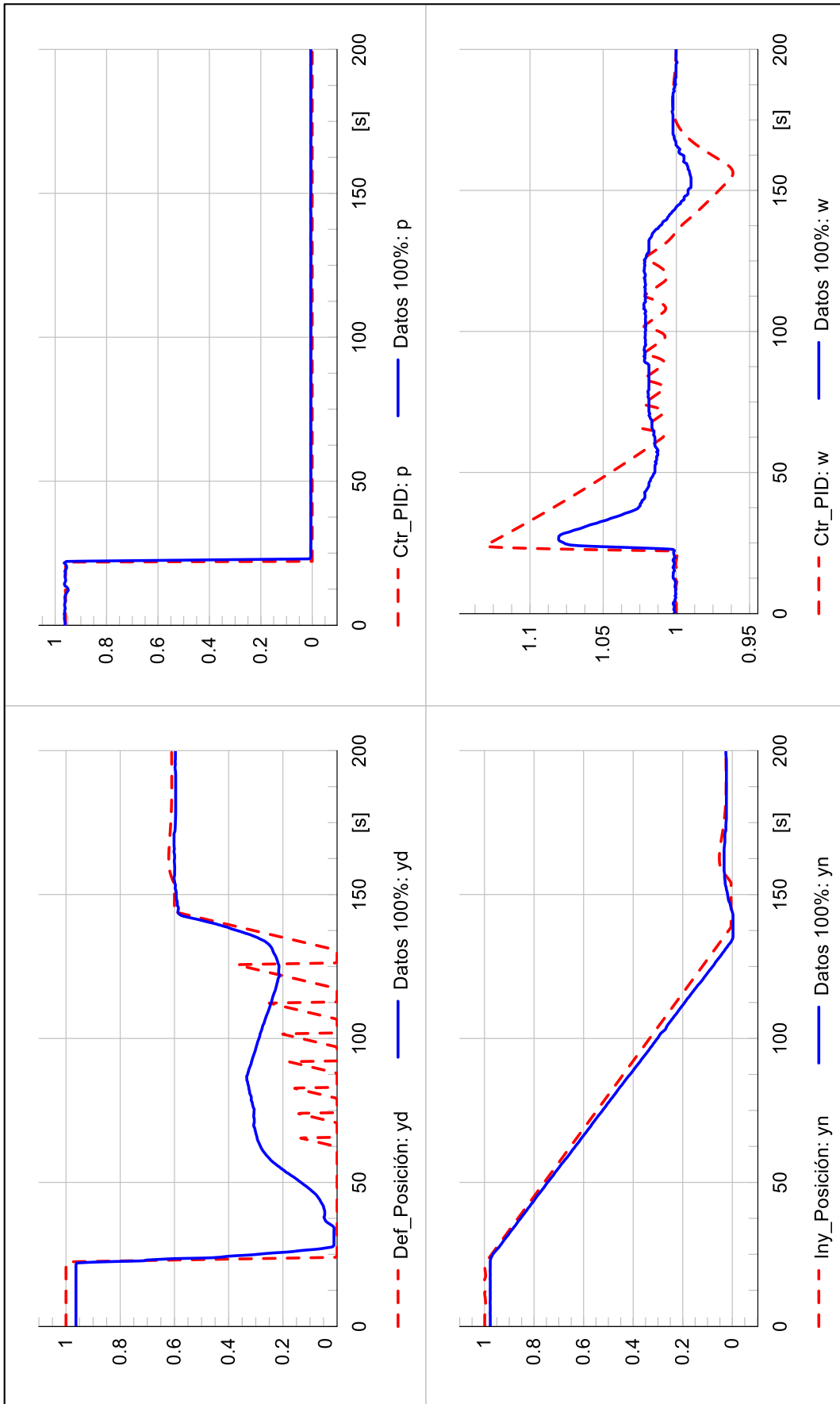




**Figura 3.37.** Rechazo de carga del 50%



**Figura 3.38.** Rechazo de carga del 75%



**Figura 3.39.** Rechazo de carga del 100%

### 3.5.5.2 Entrada escalón de potencia

En la Figura 3.40 se observa la contrastación con las respuestas ante la entrada paso en la potencia de referencia  $P_{ref}$ . Se muestran tres gráficas que corresponden al escalón de potencia, la apertura de los inyectores para cumplir con la demanda, y la medición de la potencia de la máquina. La primera entrada paso corresponde al 5% de la potencia inicial, en la segunda se tiene un paso del 2% y en la tercera del 0,5%, de la potencia de referencia. Para realizar esta prueba la unidad 7 debe estar conectada al sistema, por ende, el lazo de control que estará activado es el lazo que controla la potencia.

En la gráfica correspondiente a la apertura de los inyectores, se observa que la simulación es muy similar a los datos tomados en campo. Esto se puede verificar observando la Figura 3.40 y los valores MSE de la Tabla 3.18 de la apertura de los inyectores y la potencia. El valor MSE de la apertura de los inyectores y de potencia son cercanos a cero.

**Tabla 3.18.** MSE de variables en el escalón de potencia

	APERTURA INYECTORES	POTENCIA
MSE	4E-06	1,7E-5

La gráfica de apertura de los inyectores da información de cómo está actuando el control anticipativo del regulador de potencia. Esto se puede comprobar en el tiempo de apertura y cierre de los inyectores en los diferentes escalones de  $P_{ref}$ . En el primer paso, el tiempo de apertura de los inyectores es de 4 s lo que representa una rápida respuesta comparando con la que se tendría si en el lazo de potencia el único control presente sería el control PID.

En la gráfica de la medición de la potencia activa se observa una señal con ruido mientras que en la simulación no se incluyó este efecto. En la Figura 3.40 se observa una adecuada respuesta en la potencia por lo que no fue necesario realizar una identificación de los parámetros  $Kp2$  constante proporcional del lazo PID del control de potencia y  $Ti2$  tiempo integral del controlador PID del lazo de control de potencia.

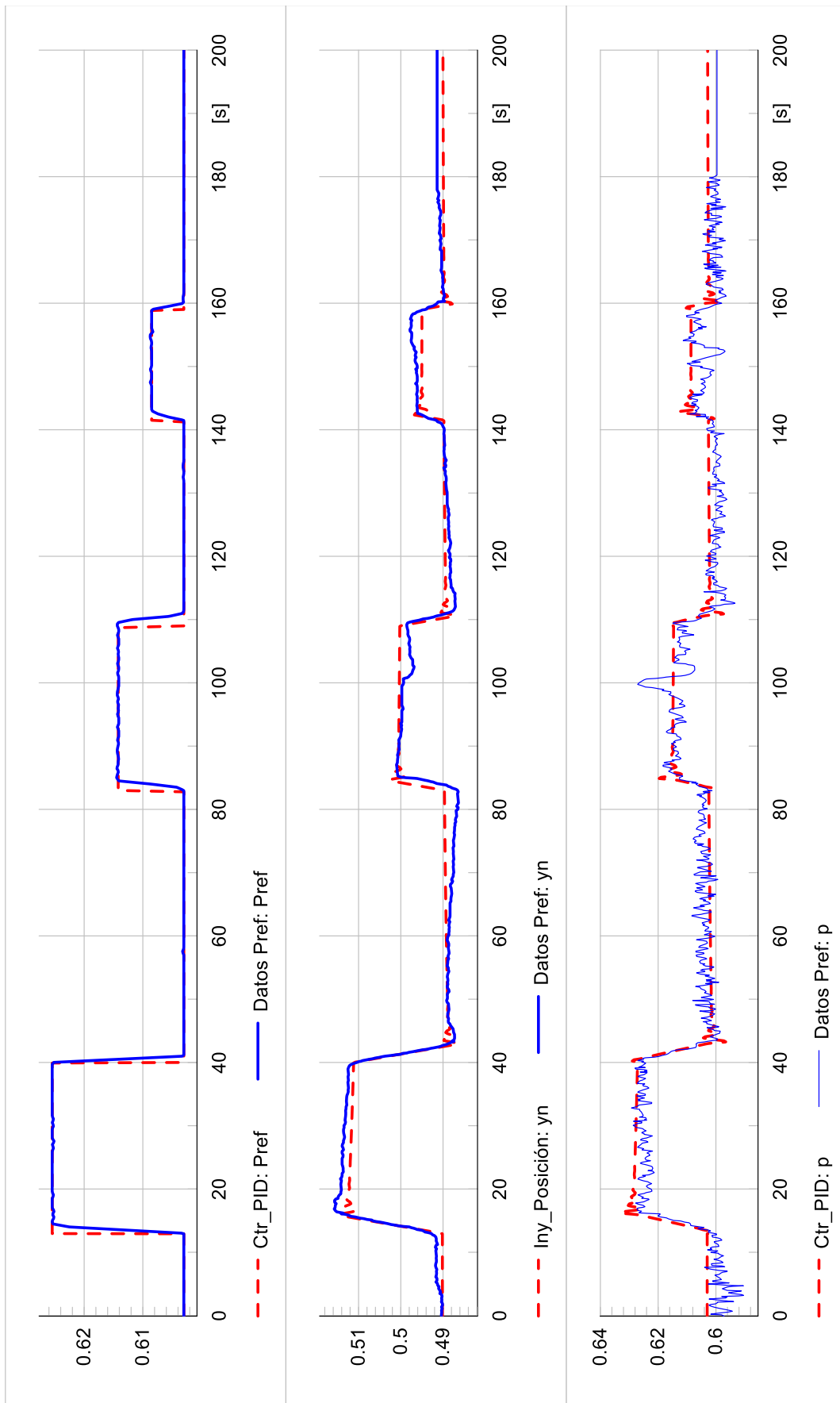


Figura 3.40. Escalones en la referencia de la potencia 0,5/2/5 %

## 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 CONCLUSIONES

- Se realizó una adecuada modelación y simulación del nuevo sistema de regulación de velocidad instalado en la Fase C de la Central Paute Molino. Esta modelación permitirá actualizar la base de datos de los reguladores de velocidad utilizados en los diferentes estudios que se realizan en el sistema interconectado.
- Generalmente, los modelos matemáticos no lineales de la turbina hidráulica son usados en los estudios de simulación en los que la velocidad y las variaciones de potencia son grandes; como los que se dan en las pruebas de rechazo de carga. En cambio, los modelos linealizados se utilizan en estudios de análisis de frecuencia como Bode, Nyquist, y diagramas de polos y ceros.
- La relación no lineal que existe entre la apertura promedio de los inyectores y la potencia se describe de una manera completa con la ayuda de los ajustes polinómicos. Para la simulación de este modelo particular se utiliza el ajuste de tercer orden. La importancia de este ajuste se refleja en la precisión de la contrastación entre la simulación y las pruebas de comisionamiento.
- La falta de un estudio que determine la eficiencia del funcionamiento de la turbina Pelton según el número de inyectores, impide aprovechar de una mejor manera, la característica de operación individual de inyectores. Debido a la falta de este estudio la turbina opera solo con dos configuraciones (3 y 6 inyectores) de las 9 posibles.
- El método de parametrización PSO posee una mayor flexibilidad para ajustarse a los límites establecidos por el fabricante con relación a los parámetros del regulador. Los resultados de contrastación entre la simulación y las pruebas de comisionamiento indican que el algoritmo PSO es un método efectivo para la parametrización del regulador de velocidad.
- La herramienta computacional utilizada en la identificación de parámetros resultó ser la adecuada para la identificación de parámetros. A diferencia de otros métodos clásicos como Ziegler Nichols o prueba y error, el método PSO permite una mayor precisión en la búsqueda de parámetros. Un inconveniente que se tiene al utilizar PSO es el tiempo de ejecución del algoritmo. Este problema se puede solucionar con el uso de equipos de computación más avanzados, sobre todo cuando el número de parámetros a identificar y el número de iteraciones tiene un alto valor.

- En la simulación, la identificación de parámetros se debe realizar cuando la unidad de generación esté entregando el 50% de la potencia ya que a ese nivel la contrastación, entre los datos tomados en campo y los simulados, produjo mejores resultados.
- La información obtenida a través de las pruebas de comisionamiento permitió obtener la tendencia de comportamiento del generador y el sistema de regulación de velocidad. Estos resultados son semejantes a los obtenidos en la simulación lo que indica que la simulación cuenta con una alta precisión.

## 4.2 RECOMENDACIONES

- Cuando se realicen las pruebas de comisionamiento se debe obtener la mayor cantidad de información de la relación Potencia vs Apertura de Inyectores para tener una simulación más precisa. Esta información ayudará a obtener un mejor refinamiento del modelo de la turbina, y más aún cuando se trata de turbinas pelton.
- Se debe realizar un estudio de eficiencia del funcionamiento de la turbina de acuerdo con el funcionamiento de los inyectores, para de esta manera, poder aprovechar la característica de control individual que posee cada inyector.
- Cuando se realizan estudios en los cuales existen cambios bruscos de carga es recomendable utilizar el modelo no lineal de la turbina Pelton, ya que esto refleja de una mejor manera, las respuestas que se obtienen en las pruebas de comisionamiento.
- Al realizar una identificación de parámetros en sistemas no lineales, se deben usar métodos heurísticos para tener una mayor flexibilidad al momento de cumplir con los límites de los parámetros en su identificación.
- Se debe desarrollar un modelo más detallado del diagrama de bloque correspondiente al posicionamiento del deflector ya que al tener un modelo básico, se presentaron errores en la respuesta del deflector ante rechazos de carga.
- Se recomienda realizar la identificación de parámetros del regulador de velocidad, utilizando algoritmos diferentes PSO, dentro de los más utilizados y de los que se encuentran suficiente información están el algoritmo de murciélago (BAT) y algoritmos genéticos (GA).

## 5 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Complejo Hidroeléctrico Paute Integral. <https://www.celec.gob.ec>
- [2] CONELEC, Procedimientos despacho y operación. sep. 08, 2000.
- [3] Power Quality Services Cía. Ltda, Especificaciones técnicas y funcionales para el suministro, instalación, comisionamiento y puesta en servicio de 10 reguladores de velocidad y 10 reguladores de tensión para las unidades de generación de la Central Hidroeléctrica Paute – Molino. ago. 2011.
- [4] N. Sotomayor, Estudio de los estabilizadores de potencia PSS de las unidades de la fase C de la Central Hidroeléctrica Paute, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2004.
- [5] J. Abreu, Guarda, Izquierdo Rafael, Joaquín, *Transitorios y oscilaciones en sistemas hidráulicos a presión*, Universidad Politécnica de Valencia. 1995.
- [6] Casa de máquinas. <https://www.celec.gob.ec/hidropaute/centrales/casa-de-maquinas-molino.html> (accedido nov. 12, 2019).
- [7] C. Mataix, *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*, Segunda Edición. Madrid: Ediciones del Castillo S.A, 1986.
- [8] Turbinas hidráulicas, *Tecnología*. <https://www.areatecnologia.com/mecanismos/turbinas-hidraulicas.html> (accedido dic. 18, 2019).
- [9] H. Torio, Máquinas hidráulicas, bombas y turbinas., Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, 2014.
- [10] P. Fernández, Turbinas hidráulicas. [http://www.ing.una.py/pdf\\_material\\_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf](http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf).
- [11] P. Kundur, N. J. Balu, y M. G. Lauby, *Power system stability and control*, vol. 7. Nueva York: McGraw-hill, 1994.
- [12] Controlador PID - Control Automático - Picuino. <https://www.picuino.com/es/arduprog/control-pid.html> (accedido nov. 12, 2019).
- [13] IEEE Guide for the Application of Turbine Governing Systems for Hydroelectric Generating Units, *IEEE Std 1207-2011 (Revision to IEEE Std 1207-2004)*, pp. 1-131, 2011, doi: 10.1109/IEEESTD.2011.5936081.
- [14] P. Ledesma, Regulación de frecuencia y potencia, p. 33, sep. 2008.
- [15] G. Arguello, *Análisis y control de sistemas eléctricos de potencia*, Primera edición. Quito, 1988.
- [16] CELEC Hidropaute-Molino, Regulador de velocidad mecánico.
- [17] VOITH HYDRO, Manual de operación y mantenimiento del regulador de velocidad digital HYCON GC 443R. 2016.



- [18] B. Kuo, *Sistemas de control automático*, Séptima edición. Prentice Hall.
- [19] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*, Quinta. Pearson.
- [20] A. J. Wood y B. F. Wollenberg, *Power generation, operation, and control*, Segunda. New York: J. Wiley & Sons, 1996.
- [21] W. Sun *et al.*, Dynamic models of pelton turbine and speed governing system suitable for power system stability analysis, *Power System Technology*, p. 5, Agosto 2014.
- [22] J. Zhao *et al.*, Improved nonlinear turbine-governor model and parameter assessment for a large hydropower plant, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 28, p. e2525, ene. 2018, doi: 10.1002/etep.2525.
- [23] L. N. Hannett, J. W. Feltes, y B. Fardanesh, Field tests to validate hydro turbine-governor model structure and parameters, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, n.º 4, pp. 1744-1751, nov. 1994.
- [24] L. Wang *et al.*, Governor tuning and digital deflector control of Pelton turbine with multiple needles for power system studies, *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, n.º 13, pp. 3278-3286, sep. 2017.
- [25] J. Feltes *et al.*, Review of Existing Hydroelectric Turbine-Governor Simulation Models, Chicago, USA, oct. 2013. doi: 10.2172/1098022.
- [26] IEC Guía para la especificación de los sistemas de regulación de las turbinas hidráulicas, *IEC 61362*, p. 54, 1998.
- [27] DIgSILENT PowerFactory, «Manual del usuario». DIgSILENT GmbH, nov. 2012.
- [28] H. Arcos, Curso avanzado de DIgSILENT PowerFactory, p. 146.
- [29] J. Kennedy y R. Eberhart, Particle swarm optimization, nov. 1995, vol. 4, pp. 1942-1948 vol.4.
- [30] M. Fajardo y J. Guzmán, Identificación de parámetros de sistemas de regulación de velocidad, Escuela Politécnica del Litoral, Guayaquil, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/47453>
- [31] J. C. Bansal, P. K. Singh, M. Saraswat, A. Verma, S. S. Jadon, y A. Abraham, Inertia Weight strategies in Particle Swarm Optimization, en *2011 Third World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing*, Salamanca, Spain, oct. 2011, pp. 633-640. doi: 10.1109/NaBIC.2011.6089659.
- [32] R. Lliuyacc, Sintonización de un controlador PID usando particle swarm optimization para el AGC de un sistema eléctrico multiarea, Universidad de Sevilla, Sevilla, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/27037/TFM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

## **6 ANEXOS**

ANEXO A: RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE COMISIONAMIENTO

ANEXO B: PRUEBAS DE PRECOMISIONAMIENTO

ANEXO C: INICIALIZACIÓN DE LOS BLOQUES USADOS EN LA SIMULACIÓN EN  
POWERFACTORY

ANEXO D: INICIALIZACIÓN DE VARIABLES EN POWERFACTORY

ANEXO E: USO DE WEBPLOTDIGITIZER PARA DESCRIBIR GRÁFICAS

ANEXO F: INSTRUCCIONES PARA REALIZAR LAS PRUEBAS DE COMISIONAMIENTO

ANEXO G: UNIDAD HIDRÁULICA DEL REGULADOR DE VELOCIDAD

# ANEXO A

## RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE COMISIONAMIENTO

### A.1. RECHAZO DE CARGA CON 25% DE POTENCIA ACTIVA

Tabla A.1. Datos rechazo de carga 25%

Plantilla:							
Potencia Activa	Apertura (Caudal)	Apertura de los Defectores	Velocidad Máxima (nmáx)	Velocidad Mínima (nmin)	Tiempo hasta nmáx	Tiempo de estabilización (te)	Presión en la Tubería Forzada
(MW)	(%)	(%)	(%)	(%)	(s)	(s)	(mca)
24.26	40,0	96	106,34	99,16	2.26	92	67.7
<b>Caída (m)</b>							
Apertura Inyector 1			36,90	Apertura Inyector 4			0.0
Apertura Inyector 2			0.0	Apertura Inyector 5			37,84
Apertura Inyector 3			38,51	Apertura Inyector 6			0.0

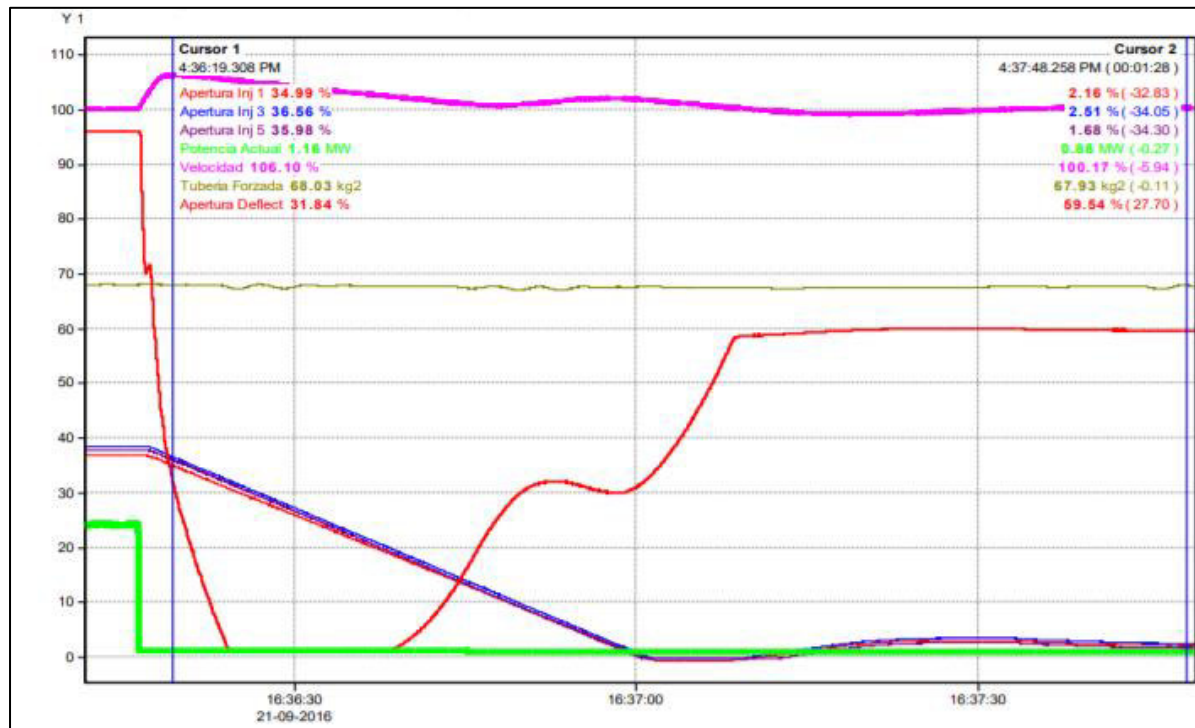


Figura A.1. Gráficas del rechazo de carga del 25%

## A.2. RECHAZO DE CARGA CON 50% DE POTENCIA ACTIVA

Tabla A.2. Datos rechazo de carga 50%

Plantilla:							
Potencia Activa	Apertura (Caudal)	Apertura del Defector	Velocidad Máxima (nmáx)	Velocidad Mínima (nmin)	Tiempo hasta nmáx	Tiempo de estabilización (te)	Presión en la Tubería Forzada
(MW)	(%)	(%)	(%)	(%)	(s)	(s)	(mca)
56,31	45,0	96,0	107,83	99,22	1,36	74	67,58
<b>Caída (m)</b>							
Apertura Inyector 1			36,89	Apertura Inyector 4			38,51
Apertura Inyector 2			37,45	Apertura Inyector 5			37,85
Apertura Inyector 3			38,04	Apertura Inyector 6			37,52

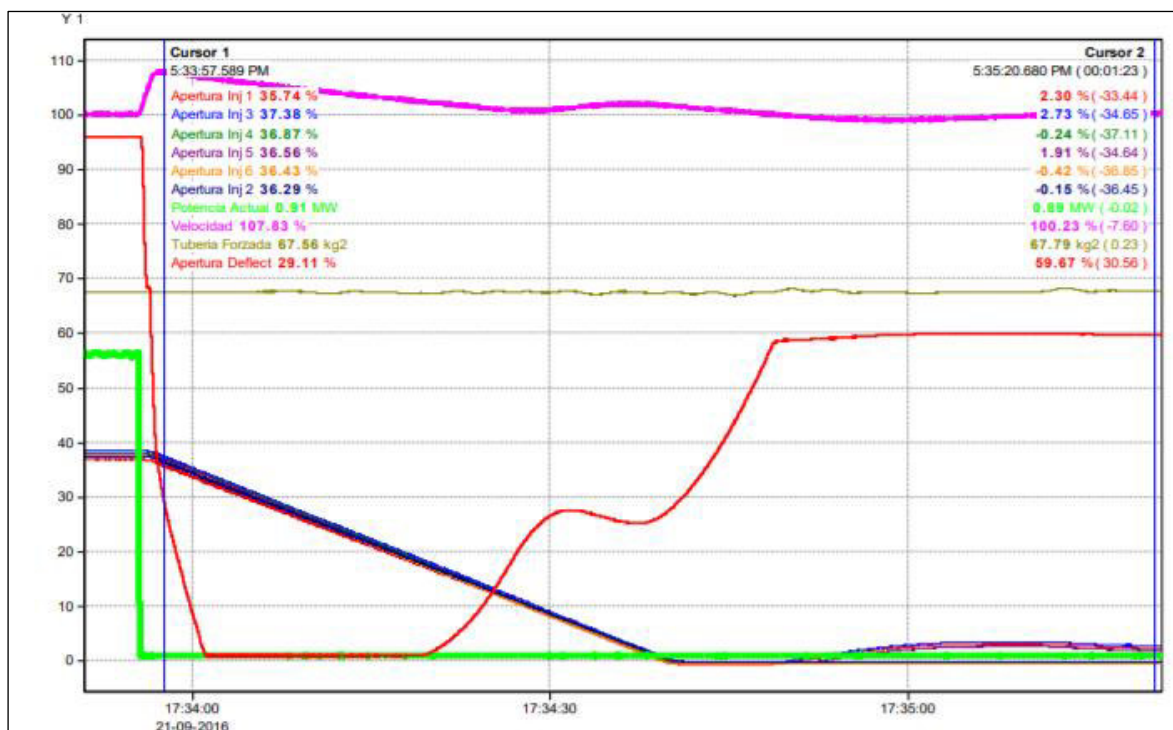


Figura A.2. Gráficas del rechazo de carga del 50%

### A.3. RECHAZO DE CARGA CON 75% DE POTENCIA ACTIVA

Tabla A.3. Datos rechazo de carga 75%

Plantilla:							
Potencia Activa	Apertura (Caudal)	Apertura de los Defectores	Velocidad Máxima (nmáx)	Velocidad Mínima (nmin)	Tiempo hasta nmáx	Tiempo de estabilización (te)	Presión en la Tubería Forzada
(MW)	(%)	(%)	(%)	(%)	(s)	(s)	(mca)
85,39	80,0	96,0	108	98,98	1,31	145	68,03
Caída (m)							
Apertura Inyector 1			60,18	Apertura Inyector 4			62,15
Apertura Inyector 2			60,78	Apertura Inyector 5			61,04
Apertura Inyector 3			62,53	Apertura Inyector 6			61,57

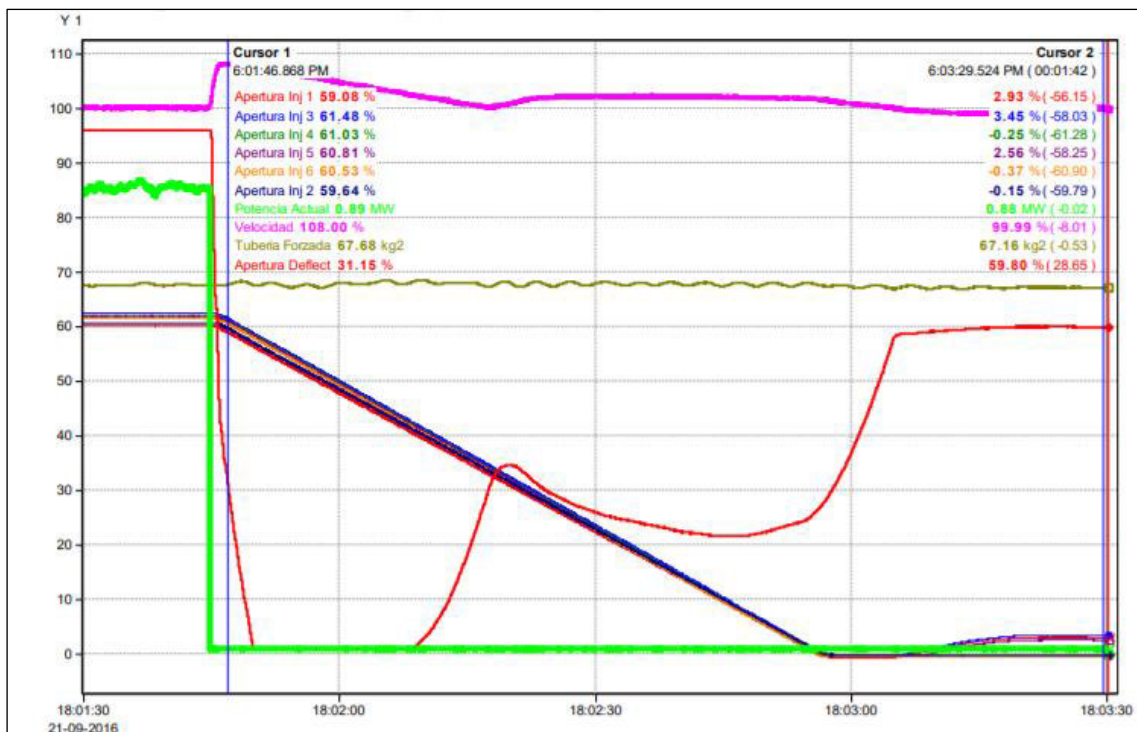


Figura A.3. Gráficas del rechazo de carga del 75%

#### A.4. RECHAZO DE CARGA CON 100% DE POTENCIA ACTIVA

Tabla A.4. Datos rechazo de carga 100%

Plantilla:							
Potencia Activa	Apertura (Caudal)	Apertura de los Defectores	Velocidad Máxima (nmáx)	Velocidad Mínima (nmin)	Tiempo hasta nmáx	Tiempo de estabilización (te)	Presión en la Tubería Forzada
(MW)	(%)	(%)	(%)	(%)	(s)	(s)	(mca)
110,53	98,0	96,00	108,00	99,04	3,27	174	66,12
Caída (m)							
Apertura Inyector 1			94,51	Apertura Inyector 4		97,64	
Apertura Inyector 2			95,00	Apertura Inyector 5		97,45	
Apertura Inyector 3			97,80	Apertura Inyector 6		96,84	

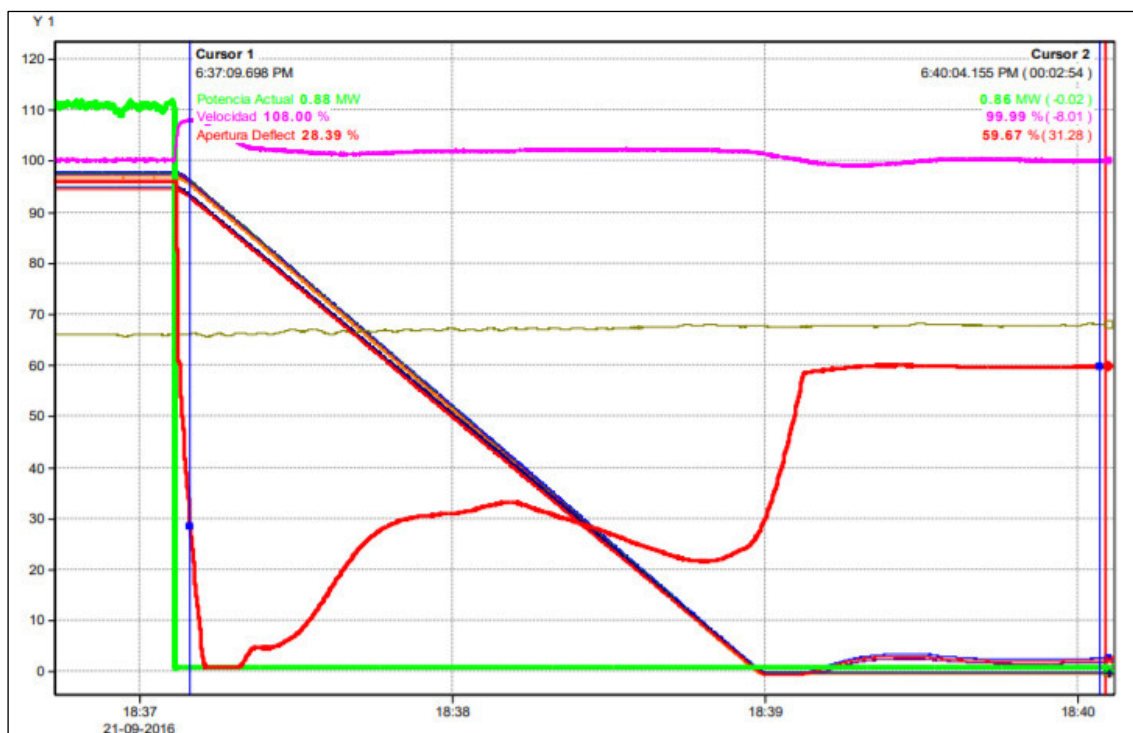


Figura A.4. Gráficas del rechazo de carga del 100%

## A.5. ESCALÓN EN CONTROL DE POTENCIA

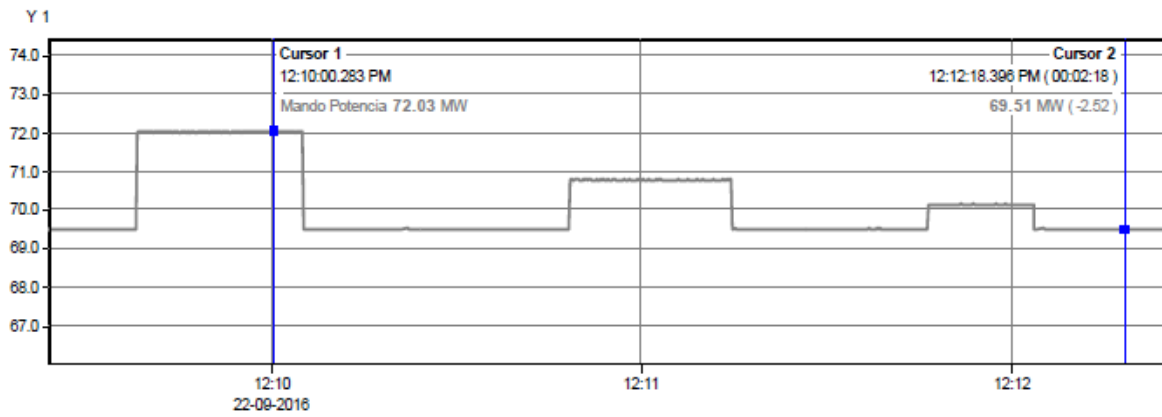


Figura A.5. Escalón en control de potencia

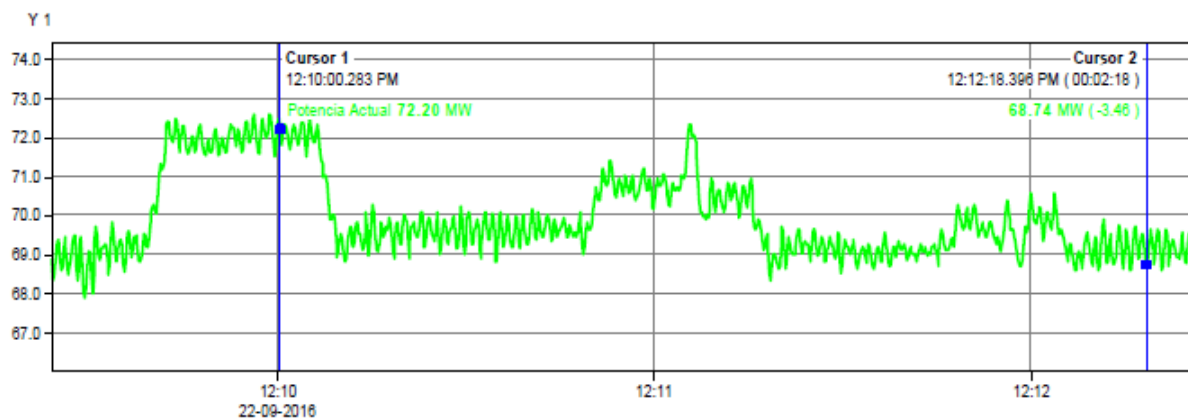


Figura A.6. Respuesta al escalón de potencia

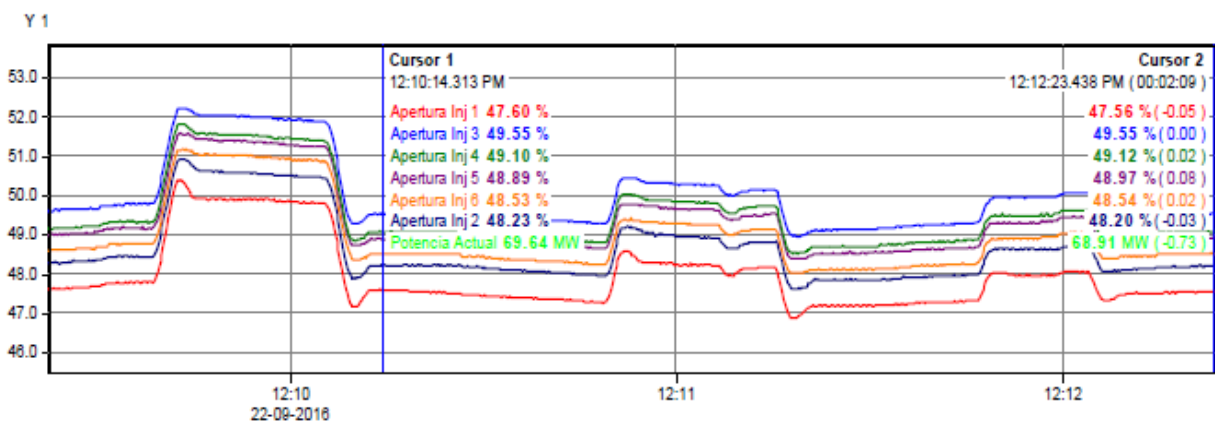


Figura A.7. Respuesta del inyector al escalón de potencia

# ANEXO B

## PRUEBAS DE PRECOMISIONAMIENTO

### B.1. PRUEBA DE RECHAZO DE CARGA 25%

Tabla B.1. Datos rechazo de carga 25%

Velocidad [%]	Potencia Activa [MW]	Pres. Tub. Forzada [bar]
99.82	29.29	66.75

Apertura Inyectores antes del Rechazo					
Inyector 1 [%]	Inyector 2 [%]	Inyector 3 [%]	Inyector 4 [%]	Inyector 5 [%]	Inyector 6 [%]
15.85	13.23	-	-	-	-

Apertura Deflectores antes del Rechazo					
Deflector 1 [%]	Deflector 2 [%]	Deflector 3 [%]	Deflector 4 [%]	Deflector 5 [%]	Deflector 6 [%]
75.28	-	-	-	-	-

nmáx [%]	nmin [%]	t(nmáx) [s]	t(nmin) [s]	t(estab) [s]	Tiempo de Cierre de los Inyectores [s]	Tiempo de Cierre de los Deflectores [s]	Presión Tub. Forzada Máx. [bar]
103.77	102.92	10	NA	NA	13	NA	68.87

**Comentarios:** En el rechazo de 25% la máquina no regresa a la rotación nominal. Se mantiene en la rotación de actuación del rechazo.

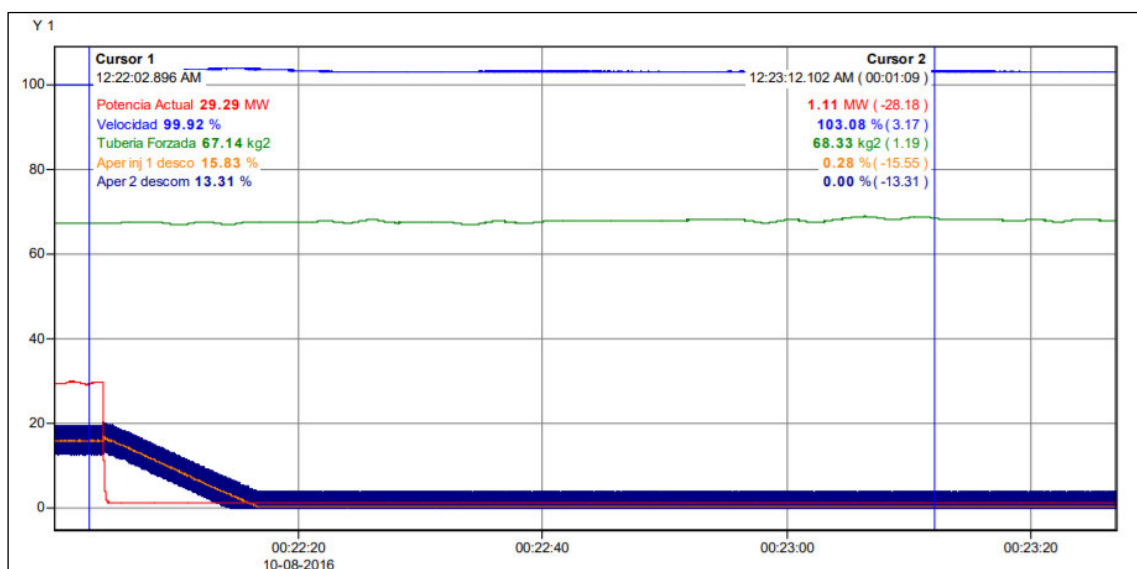


Figura B.1. Gráficas del rechazo de carga del 25%



## B.2. PRUEBA DE RECHAZO DE CARGA 50%

Tabla B.2. Datos rechazo de carga 50%

Potencia Activa [MW]	Velocidad [%]	Pres. Tub. Forzada [bar]
58.41	99.68	67.08

Apertura Inyectores antes del Rechazo					
Inyector 1 [%]	Inyector 2 [%]	Inyector 3 [%]	Inyector 4 [%]	Inyector 5 [%]	Inyector 6 [%]
34.56	36.58	-	-	-	-

Apertura Deflectores antes del Rechazo					
Deflector 1 [%]	Deflector 2 [%]	Deflector 3 [%]	Deflector 4 [%]	Deflector 5 [%]	Deflector 6 [%]
88.81	-	-	-	-	-

nmáx [%]	nmin [%]	t(nmáx) [s]	t(nmin) [s]	t(estab) [s]	Tiempo de Cierre de los Inyectores [s]	Tiempo de Cierre de los Deflectores [s]	Presión Tub. Forzada Máx. [bar]
107.06	103.06	16.73	NA	NA	26	NA	69.08

**Comentarios:** En el rechazo de 50% la máquina no regresa a la rotación nominal. Se mantiene en la rotación de actuación del rechazo. El deflector no se cierra totalmente

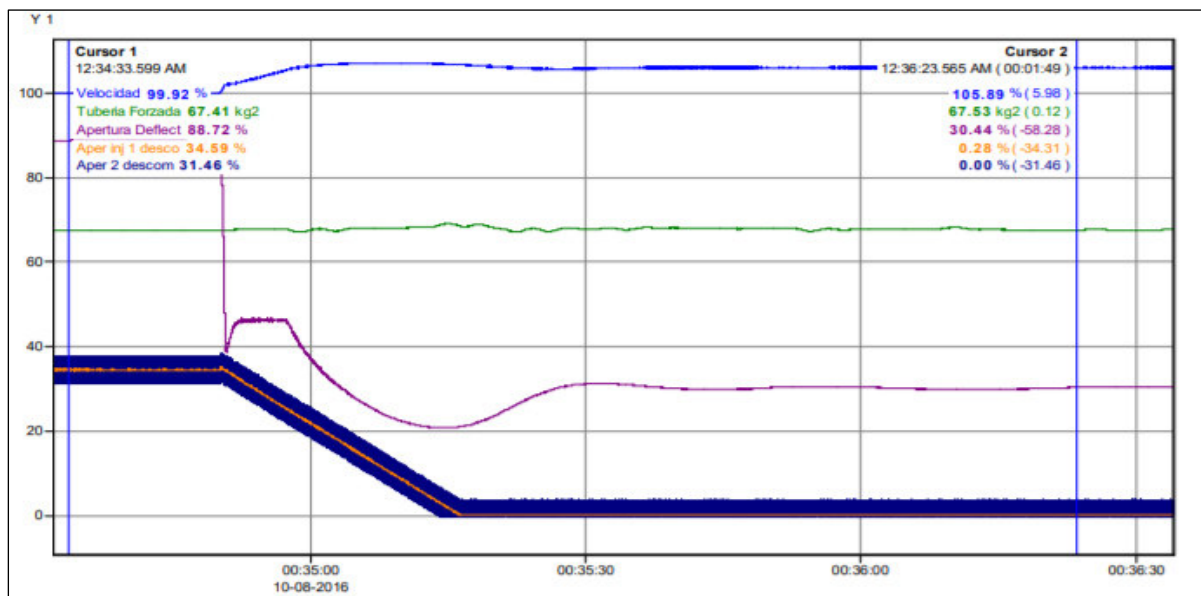


Figura B.2. Gráficas del rechazo de carga del 50%

### B.3. PRUEBA DE RECHAZO DE CARGA 75%

**Tabla B.3.** Datos rechazo de carga 75%

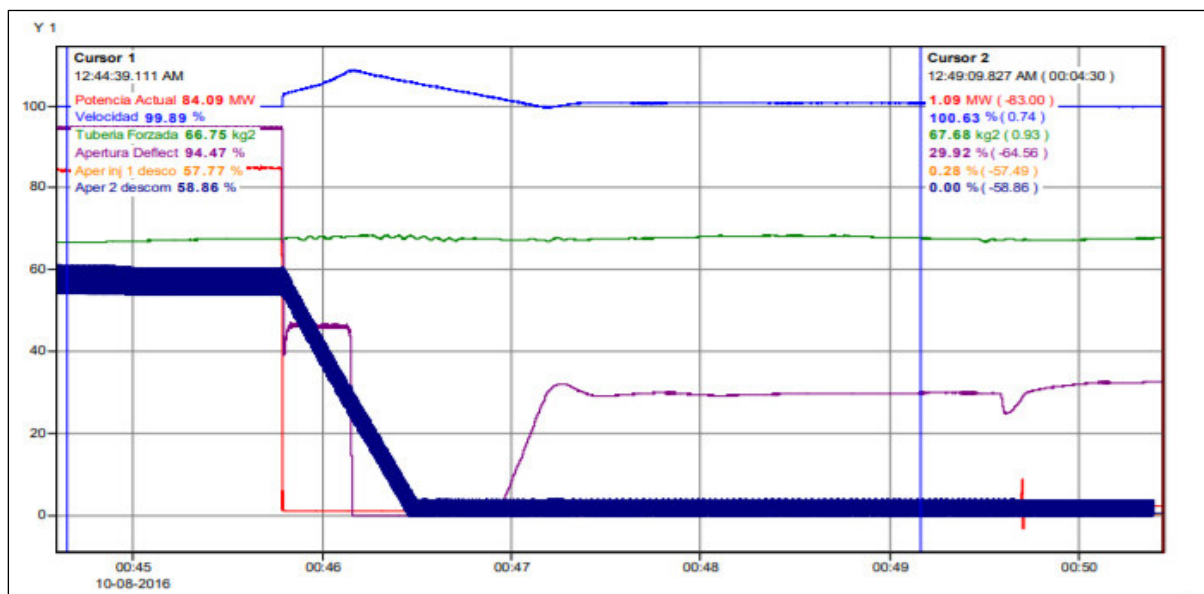
Potencia Activa [MW]	Velocidad [%]	Pres. Tub. Forzada [bar]
84.17	99.89	66.74

Apertura Inyectores antes del Rechazo					
Inyector 1 [%]	Inyector 2 [%]	Inyector 3 [%]	Inyector 4 [%]	Inyector 5 [%]	Inyector 6 [%]
57.28	59.94	-	-	-	-

Apertura Deflectores antes del Rechazo					
Deflector 1 [%]	Deflector 2 [%]	Deflector 3 [%]	Deflector 4 [%]	Deflector 5 [%]	Deflector 6 [%]
94.58	-	-	-	-	-

nmáx [%]	nmin [%]	t(nmáx) [s]	t(nmin) [s]	t(estab) [s]	Tiempo de Cierre de los Inyectores [s]	Tiempo de Cierre de los Deflectores [s]	Presión Tub. Forzada Máx. [bar]
108.84	100.63	22	90	100	42	NA	68.33

**Comentarios:** Después del rechazo el deflector no se cierra totalmente, pues él es el responsable por el control. Solo después de llegar a una velocidad se cierra todo ya manteniendo la máquina en velocidad a vacío.



**Figura B.3.** Gráficas del rechazo de carga del 75%

## B.4. PRUEBA DE RECHAZO DE CARGA 100%

**Tabla B.4.** Datos rechazo de carga 100%

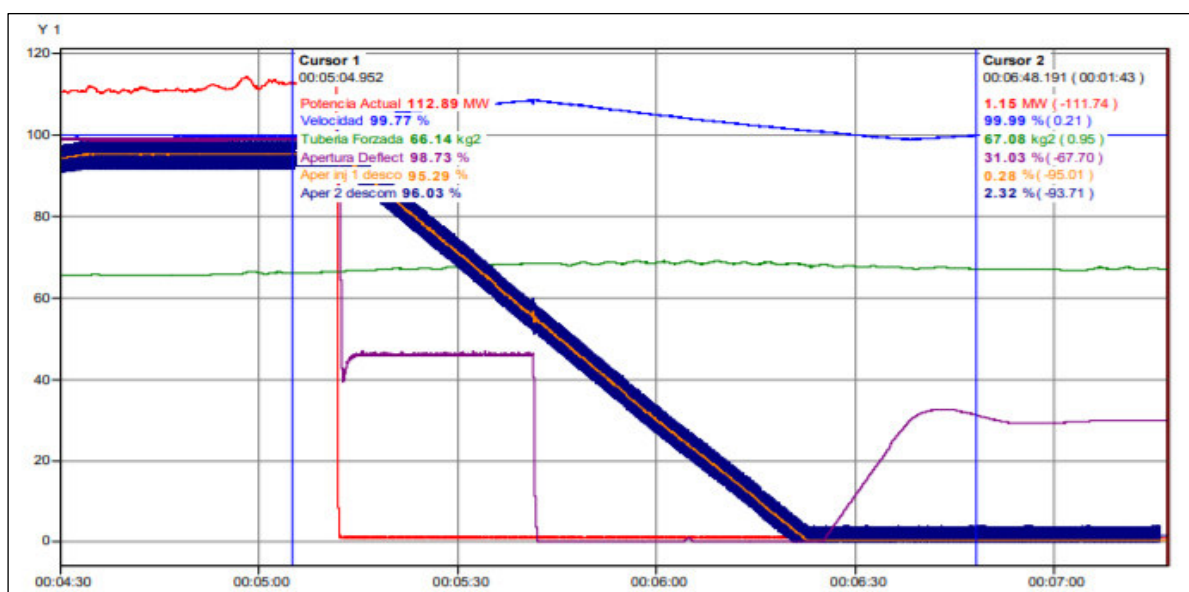
Potencia Activa [MW]	Velocidad [%]	Pres. Tub. Forzada [bar]
112.89	99.77	66.12

Apertura Inyectores antes del Rechazo					
Inyector 1 [%]	Inyector 2 [%]	Inyector 3 [%]	Inyector 4 [%]	Inyector 5 [%]	Inyector 6 [%]
95.29	96.03	-	-	-	-

Apertura Deflectores antes del Rechazo					
Deflector 1 [%]	Deflector 2 [%]	Deflector 3 [%]	Deflector 4 [%]	Deflector 5 [%]	Deflector 6 [%]
98.73	-	-	-	-	-

nmáx [%]	nmin [%]	t(nmáx) [s]	t(nmin) [s]	t(estab) [s]	Tiempo de Cierre de los Inyectores [s]	Tiempo de Cierre de los Deflectores [s]	Presión Tub. Forzada Máx. [bar]
108.51	98.85	30	90	100	70	NA	

**Comentarios:** Solo después de llegar a una velocidad se cierra todo ya manteniendo la máquina en velocidad a vacío.

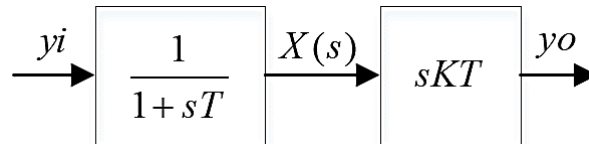


**Figura B.4.** Gráficas del rechazo de carga del 100%

## ANEXO C

### INICIALIZACIÓN DE LOS BLOQUES USADOS EN LA SIMULACIÓN EN POWERFACTORY

Para la inicialización de las variables se procede de la siguiente manera:



**Figura C.1.** Función de transferencia

$$y_o = sKT * X(s)$$

$$y_o = KT * \dot{x}$$

En condiciones iniciales se sabe que  $\dot{x}$  en condiciones iniciales es igual a 0

$$\therefore y_o = 0 \quad (C.1)$$

$$X(s) = \frac{y_i}{1 + sT}$$

$$y_i = X(s) + sT * X(s)$$

$$y_i = x + T * \dot{x}$$

Al igual que en la ecuación C.2 el término  $\dot{x}$  es igual a 0

$$\therefore y_i = x \quad (C.2)$$

Donde

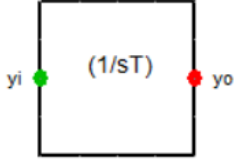
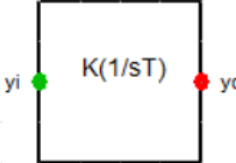
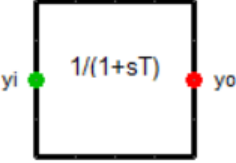
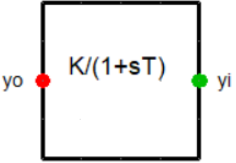
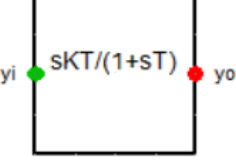
$$y_i = \text{entrada}$$

$$x = \text{variable de estado}$$

$$y_o = \text{salida}$$

De la misma manera se procede a inicializar todos los bloques que contengan variables de estado. En la Tabla C.1 se indican la inicialización de las funciones de transferencia utilizadas en la simulación.

**Tabla C.1.** Inicialización de variables de estado

Bloques	Inicialización de variables
	$y_i = 0$ $x = y_o$ $y_o = x$
	$y_i = 0$ $x = \frac{y_o}{K}$ $y_o = K * x$
	$y_i = x$ $x = y_o$ $y_o = x$
	$y_i = x$ $x = K * y_o$ $y_o = x * y_o$
	$y_i = x$ $y_o = 0$

# ANEXO D

## INICIALIZACIÓN DE VARIABLES EN POWERFACTORY

### D.1. CONTROLADORES

```
! PID VELOCIDAD
inc(xi1)=ypid/Kp1
inc(xv1)=0
inc(xaux)=ypid
inc(wref)=w+bp*(ypid-QSNL)
inc(xo1)=w
! PID POTENCIA
inc(xi2)=((ypid-((lapprox(p,array_K))*Kaux)))/Kp2
inc(xv2)=0
inc(fnom)=1
inc(pref)=p-(select(sw>0.5,0,(fnom-w)*(1/Kf)))
inc(xo2)=p
! DEFINICIÓN DE PARÁMETROS
vardef(Kp1)='pu';'Ganacia proporcional control PID velocidad'
vardef(Kaux)='pu';'Constante auxiliar estadistmo lazo velocidad'
vardef(Taux)='s';'Constante auxiliar estadistmo lazo velocidad'
vardef(Kp2)='pu';'Ganacia proporcional control PID potencia'
vardef(To2)='s';'Constante de Tiempo medición potencia'
vardef(To1)='s';'Constante de Tiempo medición velocidad'
vardef(Kf)='pu';'Constante proporcional influencia de la frecuencia'
vardef(Ti2)='s';'Constante de Tiempo acción integral control PID potencia'
vardef(Ti1)='s';'Constante de Tiempo acción integral control PID velocidad'
vardef(Kv1)='pu';'Ganacia derivativa control PID velocidad'
vardef(Tv1)='s';'Constante de Tiempo acción derivativa control PID velocidad'
vardef(Kv2)='pu';'Ganacia derivativa control PID potencia'
vardef(Tv2)='s';'Constante de Tiempo acción derivativa control PID velocidad'
vardef(BdP)='pu';'Banda muerta de Potencia'
vardef(Tcontrol)='bool';'Constante booleana para seleccionar el control w=1,
p=0'
vardef(bp)='pu';'Estatismo permanente'
vardef(QSNL)='pu';'Flujo sin carga'
vardef(BdV)='pu';'Banda muerta de Velocidad'
vardef(sw)='bool';'Activa influencia frecuencia sw=1 activa, sw=0 desactiva'
```

### D.2. DEFLECTOR

```
!DEFLECTOR
```

```

inc(yd)=1
inc(xmed)=yd
inc(xyds)=yd
inc(xyd)=0
inc(ydctr)=yd-(Bias/Kd)
inc(xhys)=ydctr
inc(xicd)=(ydctr)/Kpcd
inc(xvcd)=0
inc(xol)=wref
inc(wref)=w
inc(logic)=0

```

! DEFINICIÓN DE PARÁMETROS

```

vardef(Kd)='pu';'Ganancia proporcional de la posición del deflector'
vardef(Td)='s';'Constante de tiempo de la bobina de inmersión'
vardef(Tvcd)='s';'Constante de tiempo lazo derivativo PID'
vardef(Ticd)='s';'Constante de tiempo lazo integral PID'
vardef(Kpcd)='pu';'Constante proporcional PID deflector'
vardef(Kvcd)='pu';'Constante derivativa PID deflector'
vardef(Tol)='s';'Tiempo de medición de velocidad'
vardef(VelCloseYd)='pu';'Velocidad de cierre del deflector'
vardef(Ydmin)='pu';'Limite mínimo de la posición del deflector'
vardef(VelOpenYd)='pu';'Velocidad de apertura del deflector'
vardef(Ydmax)='pu';'Limite máximo de la posición del deflector'
vardef(Bias)='pu';'Posición de equilibrio del lazo de control'

```

### D.3. INYECTOR

! INYECTOR

```

inc(xyns)=yn
inc(xyn)=0
inc(ynop)=yn-(Bias/Ky)
inc(ypid)=invlapprox(ynop,array_K)

```

! DEFINICIÓN DE PARÁMETROS

```

vardef(Bias)='pu';'Posición de equilibrio del lazo de control'
vardef(Ky)='pu';'Ganancia proporcional de la posición del inyector'
vardef(Ty)='s';'Constante de tiempo válvula proporcional'
vardef(VelCloseYn)='pu';'Velocidad de cierre del inyector'
vardef(Ynmin)='pu';'Limite mínimo de la posición del inyector'
vardef(VelOpenYn)='pu';'Velocidad de apertura del inyector'
vardef(Ynmax)='pu';'Limite máximo de la posición del inyector'

```

#### D.4. TURBINA

```
!TURBINA PELTON
inc(Q1)=((pt+((w-1)*Dt))*(w/Pr))/Ho
inc(yd)=1
inc(Qn)=((Qef/yd)+Qo)
inc(xw)=Qn
inc(yn)=Qn/sqrt(Ho)

! DEFINICIÓN DE PARÁMETROS
vardef(wref)='pu';'Velocidad de referencia'
vardef(Dt)='pu';'Damping'
vardef(Pr)='p.u';'Valor en MW/MVA_Base'
vardef(Tw)='s';'Constante de tiempo del Agua'
vardef(Qo)='pu';'Flujo inicial '
vardef(Ho)='pu';'Salto inicial comúnmente=1'
```



# ANEXO E

## USO DE WEBPLOTDIGITIZER PARA DESCRIBIR GRÁFICAS

Para obtener los datos que describen un gráfica 2D en términos de y vs x se utilizó el software WebPlotDigitizer en dónde se siguió el siguiente proceso:

1. Una vez en el programa, se importa la gráfica que se desee describir. Esta gráfica debe estar en una resolución adecuada para evitar errores en la descripción.

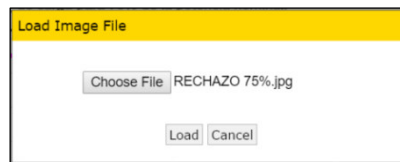


Figura E.1. Cargar imagen

2. Luego de importar la imagen, se deben definir los ejes y valores en la gráfica.

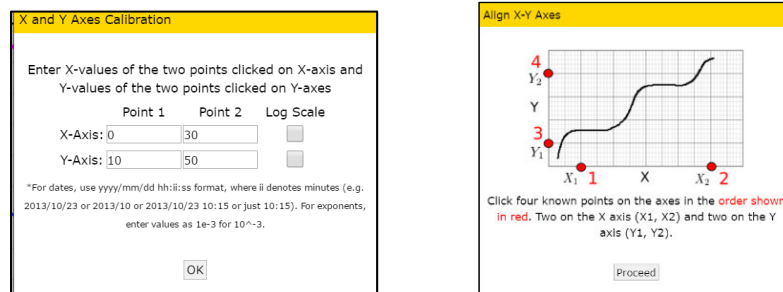
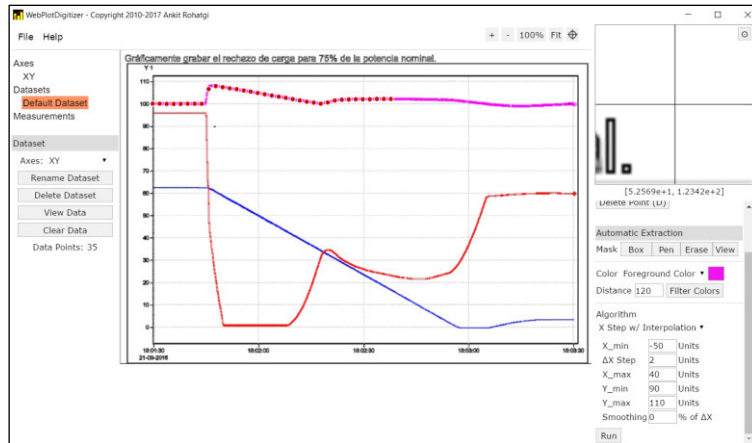


Figura E.2. Definición de los ejes

3. Una vez definidos los ejes se procede a elegir la gráfica de la cual se desee extraer los datos, para ello bastará con elegir el color correspondiente. En el ejemplo se escogió describir la velocidad, correspondiente al color magenta.



**Figura E.3.** Elección de la imagen a describir

4. Finalmente se ingresa al ícono View Data en donde se guardan los valores descritos

Acquired Data

Dataset: Default Dataset ▾

Variables: X, Y

-29.60000	100.26228
-29.00000	100.34599
-28.40000	100.19822
-27.80000	100.27615
-27.20000	100.17120
-26.60000	100.24128
-26.00000	100.15846
-25.40000	100.16388
-24.80000	100.16779
-24.20000	100.31182
-23.60000	100.31633
-23.00000	100.24852
-22.40000	100.25552
-21.80000	100.16971
-21.20000	100.26372
-20.60000	100.26207
-20.00000	100.27157

Copy to Clipboard | Download .CSV | Graph in Plotly\* | Close

\*Plotly is a secure data analysis and graphing site with data sharing and access controls.  
Visit <http://plot.ly> for details.

Sort  
Sort by: Raw ▾  
Order: Ascending ▾

Format  
Number Formatting:  
Digits: 5 Fixed ▾  
Column Separator:  Format

**Figura E.4.** Descripción de la imagen

## **ANEXO F**

### **INSTRUCCIONES PARA REALIZAR LAS PRUEBAS DE COMISIONAMIENTO**

#### **F.1 Pruebas Operacionales - Pruebas de Funcionamiento**

##### **F.1.1 Giro Mecánico**

###### **Instrucciones:**

Para realizar el primer giro de la unidad, proceder:

- Poner el gobernador de velocidad en el modo manual;
- En el modo manual, el valor actual de apertura de los inyectores (Caudal en %) se copia para el limitador de apertura (Caudal) y la supervisión de fallo de aceptación, que supervisa la rotación durante el arranque, se desactiva;
- Ejecutar el comando de arranque del gobernador de velocidad;
- Aumentar, gradualmente, lo limitador de apertura (Caudal) y observar lo aumento de velocidad de la unidad;
- Verificar el estado mecánico de la máquina (ruidos, vibraciones, etc.). Si se observa cualquier anomalía, ajustar el limitador de apertura para 0%. Si estuviera todo OK, dejar el gobernador estabilizar la velocidad de la máquina en los intervalos definidos para iniciar la prueba de calentamiento de los cojinetes;
- Verificar las aperturas de los inyectores y deflectores, así como la señal de velocidad en el panel de operación del gobernador de velocidad;
- La velocidad deberá estabilizarse al final del proceso en 100% de rotación. Anote el valor de la caída y de la apertura en esta condición como referencia da Marcha en Vacío de la unidad;
- Use la plantilla en el ítem 4.6.3 para esta prueba;
- Desconecte el relé de liberación del freno para las pruebas de giro iniciales, sólo deja que funcione de forma automática después de probadas las fallas de velocidad y la verificación del funcionamiento correcto del mismo durante las fallas de velocidad. Realice la liberación del freno manualmente observando que la rotación actual de la unidad está efectivamente debajo del valor especificado.

### **F.1.2 Pruebas de sobrevelocidad**

#### **Instrucciones:**

- Verificar el correcto funcionamiento de los dispositivos de protección de sobrevelocidad;
- Arrancar la unidad de modo Manual hasta el 100% de rotación;
- En el caso del ensayo de sobrevelocidad eléctrica, disminuir el ajuste de protección a un valor ligeramente por encima de la velocidad nominal de la máquina (por ejemplo, 105%), aumentar el ajuste de la velocidad de la máquina y verificar la actuación de la protección. Volver a la configuración de protección normal;
- En la prueba del péndulo mecánico, aumentar temporalmente la configuración de la protección eléctrica (CLP y Tacómetro) para valores ligeramente superiores a los del péndulo mecánico. Iniciar, a través del panel de operación del gobernador digital (IHM), la prueba de sobrevelocidad eléctrica (máquina debe estar en vacío y no excitado).

### **F.1.3 Prueba del gobernador de velocidad en funcionamiento en vacío**

#### **Instrucciones:**

- Verificar la respuesta del Gobernador durante un cambio repentino de la consigna de rotación (escalón), teniendo en cuenta los datos de proyecto de lo conjunto Turbina/Generador, optando por valores que traigan lo mejor rendimiento de la unidad como un todo;
- Partir la unidad en modo Manual;
- Cuando la máquina esté en rotación nominal, los ensayos de ajuste del lazo de velocidad pueden iniciarse.

### **F.1.4 Partidas automáticas de la unidad**

#### **Instrucciones:**

- Verificar el comportamiento de la unidad hasta que alcanza la rotación nominal (overshoot). Pueden hacerse varias tentativas con diferentes valores hasta que alcanza un valor ideal que permite un arranque suave y rápida;
- Elegir el método de arranque que presentan mayores beneficios para unidad;
- Ajustar la plausibilidad de acuerdo con el arranque adoptado.

### **F.1.5 Parada automática de la unidad**

#### **Instrucciones:**

- Realizar la parada de la unidad y verificar el punto de funcionamiento de los frenos del generador durante el proceso;

- Ajustar los valores de simulación de parada del gobernador de velocidad en caso de pérdida de todas las mediciones de velocidad (Run Out of Curve NB);
- Si no se ha adoptado la simulación de parada, en la pérdida total de la medición de la velocidad, el gobernador considerará rotación igual a 100% y no habrá la liberación de los frenos.

#### **F.1.6 Sincronización en la red**

##### **Instrucciones:**

- Verificar todos los sistemas eléctricos están preparados y listos para la excitación y la sincronización;
- Ajustar el parámetro de tiempo de rampa de lo ajuste de velocidad durante la sincronización - el mismo se ha configurado en la unidad [%/s];
- Configurar la llave de software del gobernador de velocidad para que el mismo asuma el modo de control de apertura después del ligamento del interruptor da unidad;
- Ajuste el valor de apertura mínima con el interruptor conectado en el gobernador de velocidad (establece un valor delta que se sumará a la apertura de marcha en vacío, eso depende de la actual caída). Este ajuste de apertura mínima tiene como objetivo evitar la motorización de la unidad;
- Configurar el valor de ajuste del modo de potencia después de lo ligamento del interruptor de la unidad;
- La influencia de la frecuencia debe permanecer desactivado hasta su puesta en marcha;
- El Modo de potencia sólo puede ser automáticamente seleccionado después de la puesta en marcha del PID de potencia y de la curva de preapertura.

#### **F.1.7 Rechazo de carga – Criterio para el análisis preliminar**

##### **Instrucciones:**

- Verificar la respuesta del gobernador de velocidad, lo retorno de la unidad a la rotación nominal, la velocidad máxima alcanzada y el nivel de presión en la Caja Espiral en el rechazo;
- La ingeniería debe seguir instantáneamente, los resultados de rechazos, si no es posible, adoptar de manera preliminar los criterios en lo gráfico abajo;
- Al final los resultados deben seguir a la Ingeniería de Voith-Siemens (Turbina y Gobernador Digital) para la aprobación final de los resultados obtenidos;
- Pasando los ensayos por el criterio preliminar, los ensayos pueden proceder normalmente, en caso de necesidad de cambio de algún parámetro y repetición de lo

ensayo, puede hacerse en una etapa posterior, de acuerdo con el ingeniero de puesta en marcha y disponibilidad del sistema.

#### **F.1.8 Rechazo de carga con 25% de Potencia Activa**

##### **Instrucciones:**

- Verificar la respuesta del gobernador de velocidad, el retorno de la unidad a la rotación nominal, la velocidad máxima alcanzada, el nivel de presión en la Caja Espiral en el rechazo y la carga activa de 25% de la potencia nominal;
- En caso de tener que cambiar el parámetro de protección del lazo de control de posición de los Inyectores, anote en la plantilla correspondiente y justificar este mismo ítem en los Comentarios;
- Cualquier parámetro requerido allá de los sugeridos en la plantilla, escribirlos en los “comentarios”;
- Con el gobernador en modo de apertura, incremente la apertura de los inyectores hasta llegar a la carga sugerida para las pruebas.

#### **F.1.9 Rechazo de carga con 50% de Potencia Activa, con cierre de emergencia**

##### **Instrucciones:**

- Verificar la respuesta del gobernador de velocidad, el retorno de la unidad a la rotación nominal, la velocidad máxima alcanzada, el nivel de presión en la Caja Espiral en el rechazo y la carga activa de 50% de la potencia nominal;
- En caso de tener que cambiar el parámetro de protección del lazo de control de posición de los Inyectores, anote en la plantilla correspondiente y justificar este mismo ítem en los Comentarios;
- Cualquier parámetro requerido allá de los sugeridos en la plantilla, escribirlos en los “comentarios”;
- Con el gobernador en modo de apertura, incremente la apertura de los inyectores hasta llegar a la carga sugerida para las pruebas.

#### **F.1.10 Rechazo de carga con 75% de Potencia Activa**

##### **Instrucciones:**

- Verificar la respuesta del gobernador de velocidad, el retorno de la unidad a la rotación nominal, la velocidad máxima alcanzada, el nivel de presión en la Caja Espiral en el rechazo y la carga activa de 75% de la potencia nominal;

- En caso de tener que cambiar el parámetro de protección del lazo de control de posición de los Inyectores, anote en la plantilla correspondiente y justificar este mismo ítem, en los Comentarios;
- Cualquier parámetro requerido allá de los sugeridos en la plantilla, escribirlos en los “comentarios”;
- Con el gobernador en modo de apertura, incremente la apertura de los inyectores hasta llegar a la carga sugerida para las pruebas.

#### **F.1.11 Levantamiento de la curva característica apertura /potencia**

- Obtener la curva característica de apertura (Caudal) de los Inyectores x Potencia Activa y configurarla en el software del gobernador de velocidad digital;
- Defina 11 puntos de potencia para este ensayo.
- Con el gobernador en modo apertura, incrementar la apertura de los inyectores hasta llegar a la potencia definida.
- Anote el valor de apertura que se encuentra en la última tabla para caída actual;
- Para las tablas que se adoptará en lo software, considere 2% abajo del valor medido real para que el PID haga el trabajo final de aproximación y no se tenga sobreseñal.

### **F.2 RESPUESTA DEL GOBERNADOR CON CARGA**

#### **F.2.1 Control de potencia**

##### **Instrucciones:**

- Con el gobernador en modo apertura, incremente la apertura de los Inyectores hasta llegar a 50% (Caudal) de la carga total;
- Conmute el gobernador para el modo potencia sin influencia de frecuencia.
- Realice la prueba de escalón en el control de potencia.
- Realice la prueba de la actuación del limitador de apertura de los Inyectores en el modo de control de potencia.
- Al final de estos ensayos es posible habilitar la conmutación automática para el modo potencia, después del interruptor cerrado.
- Realice una toma y retirada de carga total por el modo potencia.
- Anote los ajustes de apertura y velocidad cuando se encuentre en potencia máxima, estos valores se utilizarán posteriormente para toma y retirada de carga total en los otros modos.

#### **F.2.2 Control de velocidad en red**

**Instrucciones:**

- Realice la prueba del escalón en el control de velocidad;
- Realice la prueba de la actuación del limitador de apertura de los inyectores en el modo de control de velocidad en red;
- Realice una toma y retirada de carga total por el modo velocidad.

**F.2.3 Control de apertura****Instrucciones:**

- Cambie el gobernador por el modo apertura sin influencia de la frecuencia.
- Realice la prueba de escalón en el control de apertura.
- Realice la prueba de la actuación del limitador de apertura de los inyectores en modo de control de apertura;
- Realice una toma y retirada de carga total por el modo apertura.

**F.2.4 Influencia de la Frecuencia****Instrucciones:**

- Realizar la prueba de la actuación de la influencia de la frecuencia para los modos de apertura y potencia, buscando ajustar valores que traen el mejor desempeño para la turbina;
- Lleve la unidad a un rango de potencia con menor oscilación posible;
- Activar el modo Escalón en la pantalla de la IHM del gobernador de velocidad digital;
- Para la prueba de la influencia de la frecuencia el escalón utilizado es el escalón de velocidad, el software agrega un valor (parámetro) la velocidad actual de la unidad, haciendo que la influencia de la frecuencia actúe;
- Active la influencia de la frecuencia (es necesario estar en modo apertura o potencia);
- Ver la respuesta del PID de la influencia de la frecuencia y cambiar si fuera necesario;
- Las definiciones de banda muerta y ventana de activación deben basarse en el análisis de frecuencia de red, que deberán ser preregistrados por el período mínimo de 24 horas.

**F.2.5 Limitador de potencia****Instrucciones:**

- Realizar la prueba de la actuación del limitador de Potencia, buscando ajustar valores que traen lo mejor rendimiento para la protección;
- Lleve la unidad hasta la máxima potencia activa;



- Través de la pantalla de parámetros de la IHM o través de la tabla de monitoreo de variables del Step 7, cambiar el valor límite de potencia máxima para un valor menor que la potencia actual (hasta 5% menor);
- Ver la respuesta del PID del limitador de potencia y cambiar, si es necesario.

### **F.2.6 Limitador de Sobrecarga**

#### **Instrucciones:**

- El Limitador de sobrecarga relaciona una apertura máxima para una determinada caída. Tiene como objetivo evitar la sobrecarga del generador evitando que la misma opere en valores de apertura que podría conducir lo generador a trabajar arriba de la potencia nominal;
- Los valores que deben adoptarse deberán obtenerse junto con la ingeniería de la turbina y generador;
- Para probar este limitador, solicitar un ajuste de apertura conocido en que la potencia sea mayor que el límite adoptado en el software.

### **F.2.7 Prueba de conmutación de los modos de control**

#### **Instrucciones:**

- Realice la conmutación entre los modos de control disponibles en el gobernador de velocidad digital y verificar la no ocurrencia de perturbaciones considerables en los valores de velocidad, apertura y potencia.

### **F.2.8 Ensayo de la Supervisión de Presión en la Tubería Forzada**

#### **Instrucciones:**

- Verificar el comportamiento del regulador de velocidad frente a las oscilaciones de presión en la tubería forzada. Simular una violación de los límites de presión ajustados en los parámetros del regulador de velocidad. Verificar el aumento de los tiempos de apertura y cierre de los inyectores con el fin de reducir la influencia del regulador de velocidad en la oscilación de presión del circuito hidráulico

### **F.2.9 Ensayo de fallas del sistema – Conmutación entre los gobernadores**

#### **Instrucciones:**

- Verificar el comportamiento del gobernador de velocidad frente a conmutaciones entre los CLP's del mismo en diversas situaciones de operación.

### **F.2.10 Ensayo de fallas del sistema – Conmutación entre los gobernadores**

**Instrucciones:**

- Provocar y simular fallas en lo gobernador de velocidad y verificar su comportamiento frente a las mismas;
- No es necesario la prueba de todas las fallas de este procedimiento, pueden seleccionarse aleatoriamente algunas de ellas debe obligatoriamente evaluarse 1 alarma + IHM, 1 alarma +SDSC y 1 trip.

# ANEXO G

## UNIDAD HIDRÁULICA DEL REGULADOR DE VELOCIDAD

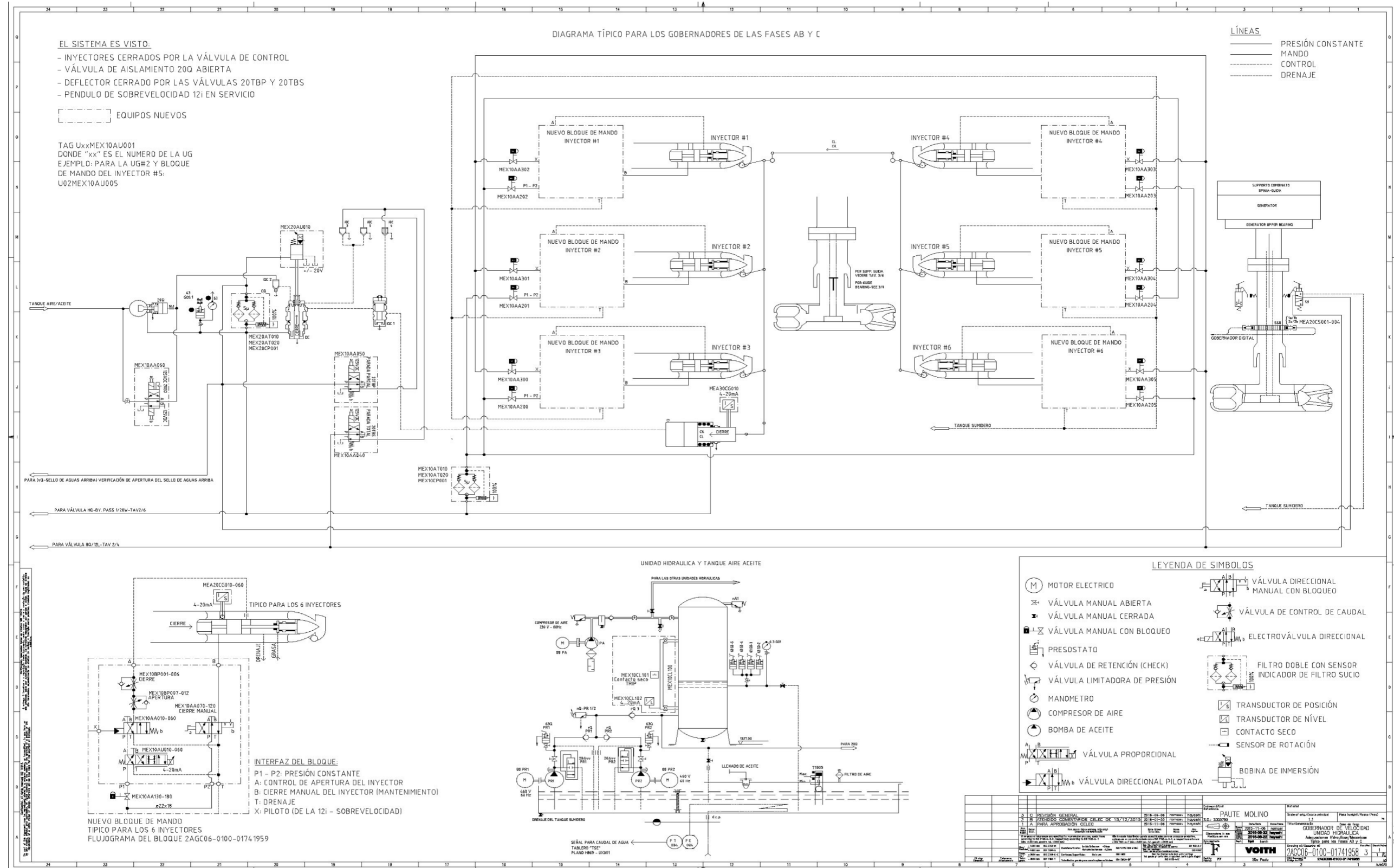


Figura G.1. Regulador hidráulico de las unidades de la Fase "C"