

MODELAJE Y SIMULACIÓN DINÁMICA DEL SISTEMA DE GOBERNACIÓN DE REGULACIÓN VELOCIDAD/POTENCIA PARA TURBINAS HIDRÁULICAS KAPLAN DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CARUACHI

Luís R. Becerra González (\$)

Romy Contreras Arellano (\$)

Fran J. Brito M. (%)

Alejandro Márquez Ruiz (%)

Juan Toledo Hernández (&)

(\$) Centro de Investigaciones Aplicadas-CIAP. Central Hidroeléctrica Macagua I.
CVG. Electrificación del Caroní, C.A. EDELCA. Pto Ordaz, Edo. Bolívar, Venezuela.

luisbecerrag@yahoo.com.ar

rcontreras@edelca.com.ve

(%) Sección de Instrumentación y Control. Dpto. de Ingeniería Eléctrica. Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”, Vice-Rectorado Pto. Ordaz, UNEXPO. Urb. Villa Asia-Final Calle China. Apartado Postal 78. Pto. Ordaz, Edo. Bolívar, Venezuela.

brito_fran@hotmail.com

alemaruiz@tutopia.com

(&) Dpto. de Ingeniería Eléctrica. Proyecto Hidroeléctrico Caruachi. Módulo 5. Telf.: +58-286-9607084. Fax: +58-286-9607137.

CVG Electrificación del Caroní, C.A. EDELCA, Pto. Ordaz, Edo. Bolívar, Venezuela.

jtoledo@edelca.com.ve

RESUMEN: En este trabajo se desarrolla el modelo matemático que representa los Sistemas de Gobernación de Regulación de Velocidad/Potencia para las turbinas hidráulicas Kaplan de 180 MW de las Unidades Generadoras de la Planta Hidroeléctrica Caruachi, como respuesta a los requerimientos de evaluación del comportamiento dinámico del sistema entregado por el fabricante ante los diversos escenarios de falla o contingencias.

El modelo implementado está soportado en la plataforma MatLab/Simulink, emulando los bloques no lineales del Regulador, Servomotor y Turbina con su respectiva parametrización, completando el esquema con la inercia del Generador, con el propósito de conectar los cuatros elementos en cascada y poder cerrar los lazos de control del sistema. Para la validación se compararon los resultados de las pruebas de aceptación y rechazo de cargas de las simulaciones con los oscilogramas de las pruebas de aceptación generados por el prototipo instalado en la planta. Se concluye que el modelo desarrollado es representativo fiel del sistema de gobernación de las unidades generadoras y se constituye como una herramienta de apoyo de gran utilidad para el personal de operación y mantenimiento como en el área académica.

Palabras Claves: Sistema, Gobernador, Velocidad, Potencia, Turbina, Regulador.

1.- INTRODUCCION.

El desarrollo y validación del modelo matemático que representa el comportamiento dinámico del Sistema de Gobernación de Velocidad/Potencia de las turbinas hidráulicas Kaplan del Planta Hidroeléctrica Caruachi surge en respuesta a las exigencias de evaluación de las unidades ante los diversos escenarios de operación, falla o contingencias propias o del sistema de potencia.

El simulador es constituido por cuatro bloques de control que representan a los subsistemas de gobernador, servomotor, turbina y generador. Estos bloques se conectaron continuamente en

forma de cascada con la finalidad de describir las principales características tanto del control como del sistema en sí. De esta manera se obtiene un modelo basado en las especificaciones de los equipos, orientado al estudio de las respuestas de velocidad del generador, el posicionamiento de las paletas directrices y de los álabes del rodete, la potencia generada, para diferentes modos de control y operación del sistema.

Los subsistemas representativos del Gobernador y Servomotor se establecieron en concordancia con la información técnica de funcionamiento suministrada por la empresa fabricante, algunas técnicas de la teoría de control y por algunos resultados de pruebas de aceptación de la unidad generadora. Por otro lado, los bloques de Turbina y Generador, se basan en los modelos de Kundur [2] y su parametrización se obtuvo por cálculo o en su defecto, por compendios de resultados de las pruebas de aceptación de las unidades generadoras.

Para la validación del modelo se realizaron pruebas de la dinámica de arranque, sincronismo y rechazos de carga de 25, 50, 75 y 100% de la capacidad nominal del Generador y, estas simulaciones se compararon con los resultados de las pruebas de aceptación de la Unidad N° 6 de la Planta Caruachi. Los procedimientos de estas pruebas se explican en el trabajo de Contreras [4]. Los resultados garantizan que el modelo desarrollado es representativo del comportamiento dinámico del Sistema de Gobernación de Velocidad/Potencia de las turbinas Kaplan de la Planta Caruachi.

2.- DESARROLLO.

2.1.- MODELACIÓN DEL SISTEMA.

Básicamente, el Sistema de Gobernación de la Central Hidroeléctrica Caruachi, se divide en tres subsistemas de control: electrónico, electro-hidráulico y de turbinas. En el *control electrónico*, donde se ajustan los valores de referencia, se reconocen las señales actuales de funcionamiento de la turbina y generador, y es de donde se envían órdenes iniciales de corrección para que la operación de la unidad generadora se mantenga en las condiciones operativas deseadas. El *control electro-hidráulico* recibe las señales del control electrónico, las procesa y envía órdenes del posicionamiento que deben adoptar las paletas directrices y álabes del rodete de la turbina. Por último, el *control de turbinas*, recibe la orden de la posición de las paletas y álabes, y su variable principal de salida es la velocidad o potencia transmitida al rotor del generador a través del eje.

2.1.1.- Modelo del Controlador Electrónico del Gobernador.

La siguiente figura 1 muestra la configuración de las señales de entradas al sistema de control electrónico implementado en MatLab/Simulink:

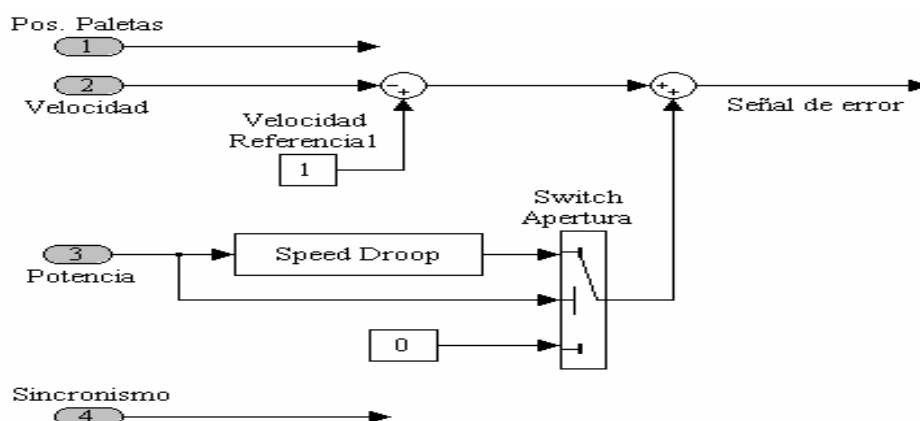


Figura 1.- Configuración de las señales de estradas del controlador electrónico.

El interruptor de apertura (Switch Apertura) representa el interruptor de campo y es para indicar la conexión o no de carga de potencia al sistema de control. Si la potencia de carga es diferente de cero, se activa el interruptor de apertura y la señal de final es la salida del speed droop. Este subsistema se muestra en la siguiente figura 2:

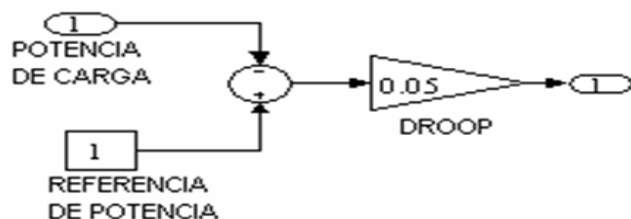


Figura 2.- Subsistema speed droop del controlador electrónico.

Los Sistemas de Gobernación de la Planta Caruachi presentan cuatro modos de operación: Sin Carga, Asíncrono, Síncrono y Rechazo de Carga, según el manual de fabricante [5]. El modo Sin carga opera con la unidad generadora desconectada de la red de potencia y su función es mantener la velocidad en el valor establecido por consigna, generalmente al 100% del valor nominal, es decir, 94,74 r.p.m. (revoluciones por minuto). El modo de control Asíncrono se refiere a la unidad cuando se encuentra sincronizada a la red y la frecuencia excede el rango de ± 0.02 Hz y, su objetivo es mantener la velocidad al valor nominal, es decir, a una frecuencia en 60 Hz (sin importar los requerimientos de carga de la red). El modo de control Síncrono funciona cuando la unidad se encuentra sincronizada a la red y dentro de la banda ± 0.02 Hz alrededor del valor nominal. El cuarto modo de operación, Rechazo de Carga, se activa cuando la velocidad del generador excede el rango preestablecido de ± 3 Hz y optimiza el comportamiento de la unidad ante esta condición de operación, independientemente de la posición del interruptor de campo del Generador.

Las transiciones entre modos pueden ser inicializado por incidentes internos y externos así como por señales de comandos al control. Estas transiciones durante un ciclo de arranque y parada normal se muestran en la figura 3. Las condiciones o incidentes que las activan son expuestos como conexiones entre modos, donde la principal variable, evidentemente, es la velocidad de la unidad generadora y en algunos casos, el modo queda determinado por la sincronización o no de la unidad a la red de potencia eléctrica.

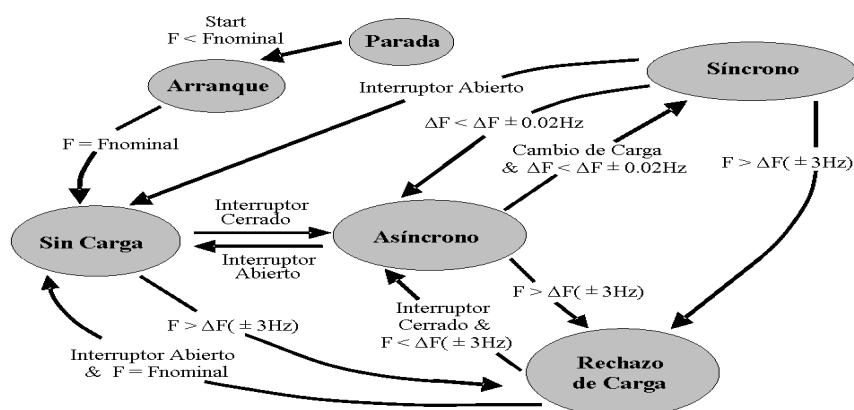


Figura 3.- Diagrama de estado de las secuencias de modos de control.

En concordancia con la dinámica de control se realizó una lógica de operación que permite modelar las transiciones de los modos de control. Las variables principales para el diseño de esta lógica, son la velocidad de la unidad y el sincronismo de la misma. Esta última variable es tomada directamente de la carga del sistema y determina, evidentemente, si la unidad está operando en

vacío o bajo carga. Esta lógica se divide en dos sub-modelos: uno para el rango desde el modo arranque al sin carga, expuesto en figura 4, y otra para la activación de los modos asíncrono y síncrono, manifestado en la figura 5. El modo rechazo de carga se activa directamente por la velocidad de la unidad.

Los valores de comparación están dados en sistema por unidad, utilizando como base la frecuencia nominal, 60 Hz. El ajuste de estos valores se realizó a través de las simulaciones correspondientes.

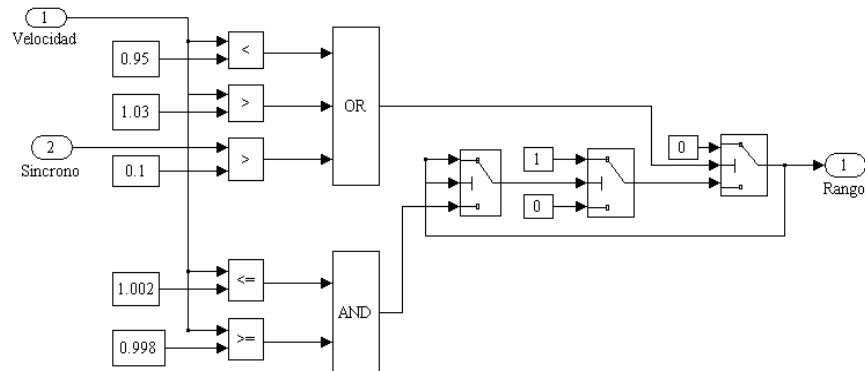


Figura 4.- Lógica de Control de activación del modo arranque y sin carga.

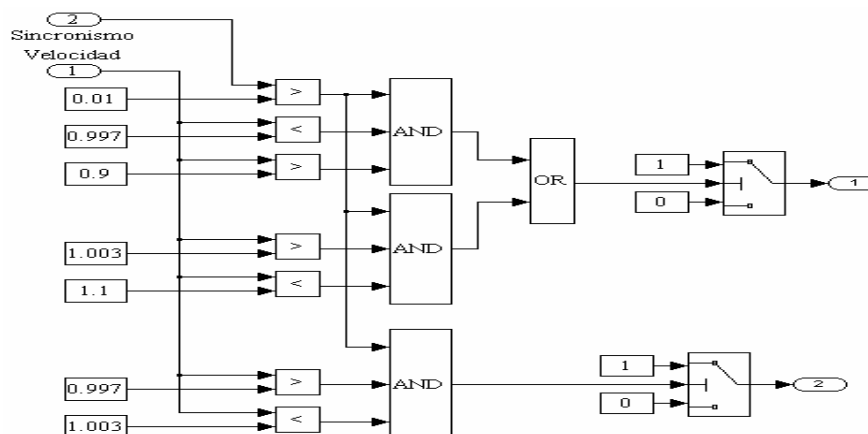


Figura 5.- Lógica de Control de activación del modo asíncrono y síncrono.

Durante el control de frecuencia, las propiedades dinámicas del bloque del gobernador puede ser expresado por la siguiente “función de transferencia de lazo abierto” del fabricante:

$$Y(s) = K_p \frac{1 + sT_i}{sT_i} \frac{1 + T_d s}{1 + (T_d s)/(1 + K_d)} \quad (1)$$

Donde:

Y = Salida del gobernador (apertura de servomotor)

s = Operador Laplace

Kp = Ganancia proporcional

Td = Constante de tiempo de la función derivativa

1+Kd = Ganancia de la función derivativa

Ti = Constante de tiempo de la función integral

Para cada modo de control, existe unos valores determinados de los parámetros PID. Estos valores fueron determinados por la empresa fabricante y se muestran en la siguiente tabla 1:

Tabla 1. Parámetros PID experimentales.

Parámetro	Modo de Control	Valor
Kp	Sincrónico	3.0
	Asincrónico	3.0
	Sin Carga	4.0
Ti	Sincrónico	10.0
	Asincrónico	10.0
	Sin Carga	10.0
	Rechazo de Carga	3.0
Td	Asincrónico	0.1
Kd	Asincrónico	10.0

Cuando algún modo es activado, el controlador toma la señal de error y la procesa por la función de transferencia. Este proceso establece una señal de posicionamiento de paletas (Pos. Paletas), que a su vez, es comparada con la apertura actual de ésta, y el resultado de esta diferencia es enviada nuevamente a la entrada del subsistema de control activado a través de una ganancia, hasta lograr una apertura óptima.

Cuando el sistema se encuentra en modo arranque de la unidad, solo se envía una señal de posición de paletas al 13% de apertura.

La configuración de los modos de control se expone en la siguiente figura 6:

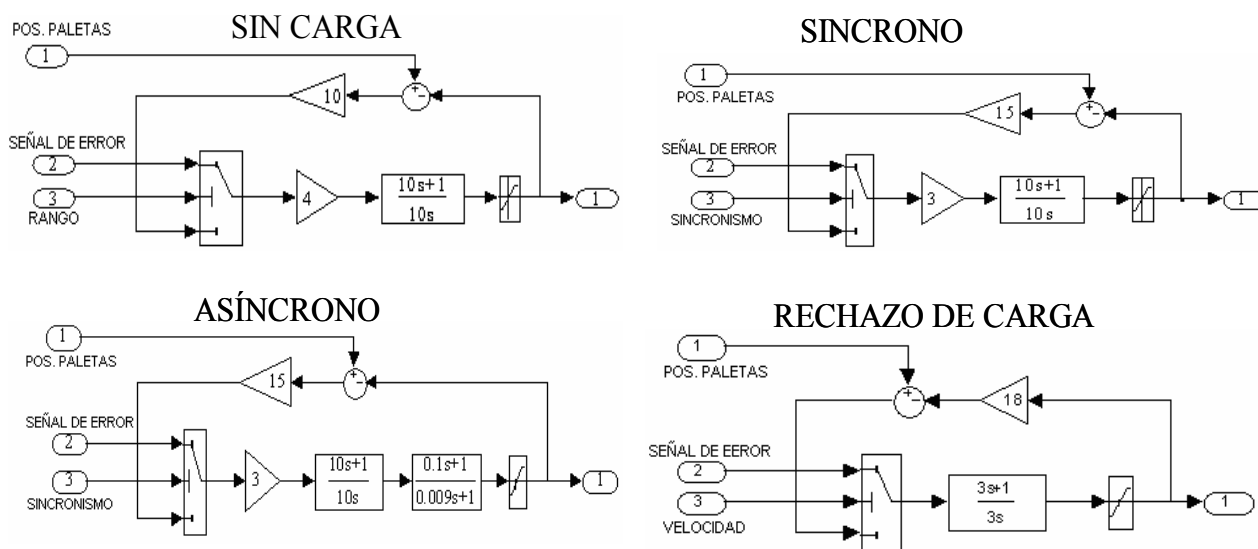


Figura 6.- Subsistemas de los Modos de Control.

La apertura de paletas directrices determina el posicionamiento de los álabes del rodete de la turbinas Kaplan de la Central Caruachi. La relación entre estas posiciones es determinada por la curva 3D CAM, o combinador 3D. Esta curva se valida a través de la prueba mecánica de capacidad e índice de las unidades generadoras. La siguiente tabla 2, muestra esta relación para una caída de agua de turbina de 35,6 metros, la cual es la caída nominal de la represa.

Tabla 2. Valores de curva de eficiencia de paletas-álabes a una caída de 35,6 m.

Posición de Paletas Directrices [pu]	Posición de los Álabes del Rodete [pu]
0	0
0.1	0
0.13	0
0.2	0
0.3	0
0.4	0.01
0.5	0.18
0.6	0.35
0.7	0.55
0.8	0.73
0.9	0.87
1.0	1.0

La representación gráfica de esta tabla de valores se expone en la siguiente figura 7:

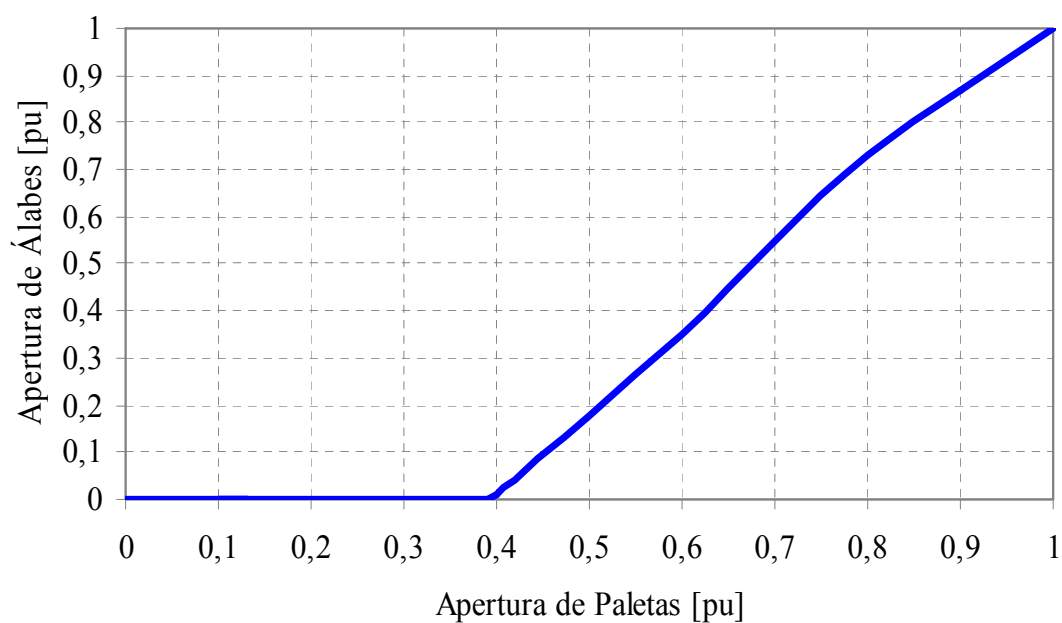


Figura 7.- Curva 3D CAM de la Central Hidroeléctrica Caruachi a una caída de 35,6 m.

El bloque limitador de control inspecciona que la apertura del servomotor no sobrepase sus límites establecidos. En este caso los límites son desde cero (0) a uno (1), que indica unas paletas totalmente cerradas a una apertura máxima, respectivamente.

El modelo final de la configuración del controlador electrónico del Proyecto Caruachi, representado en el software SIMULINK®, se muestra en la siguiente figura 8:

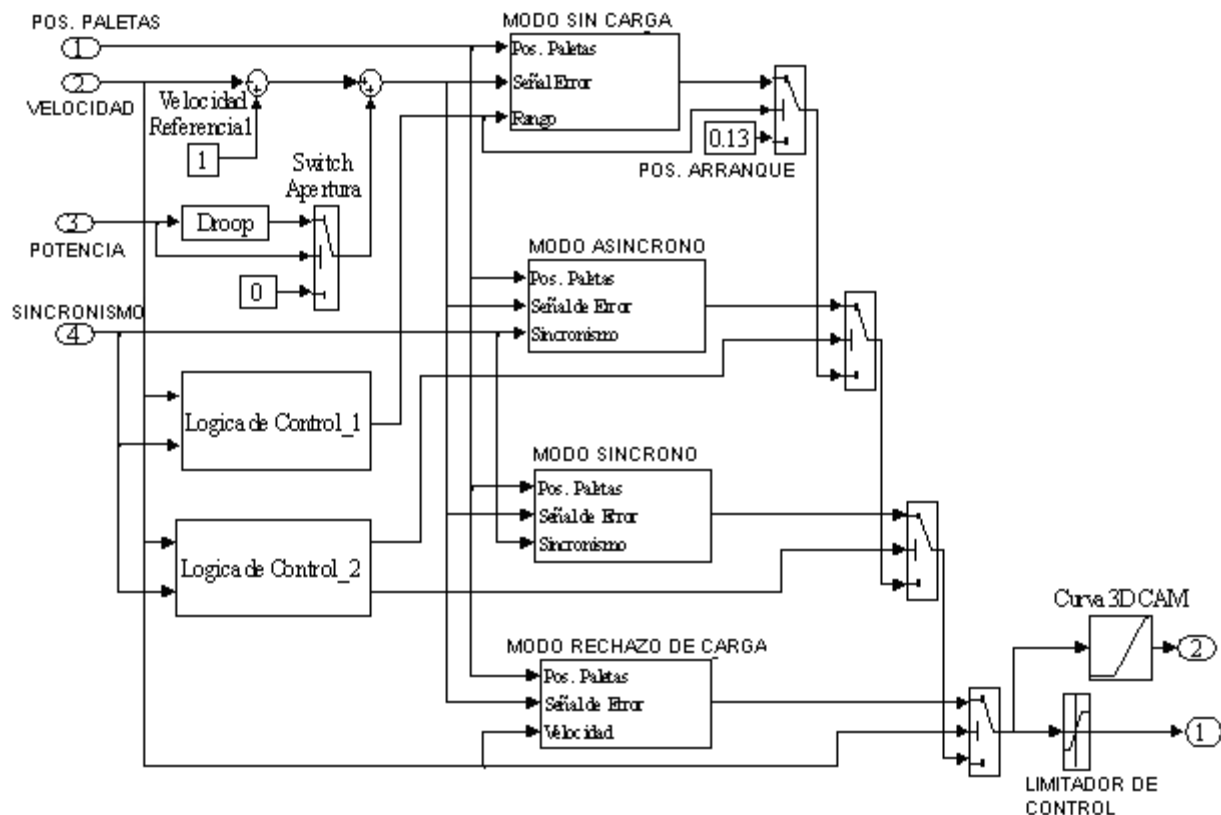


Figura 8.- Modelo del subsistema del controlador electrónico.

2.1.2.- Modelo del Controlador Electro-Hidráulico del Gobernador.

Este controlador electro hidráulico involucra al modelo de la dinámica de las paletas directrices y álabes del rodete de la turbina. Los valores de ganancia de los amplificadores y las constantes de tiempo de la válvula piloto y servomotores son ajustados in situ por los fabricantes. Se basa este modelo en el trabajo de Tesis Doctoral de Rodríguez [3].

El funcionamiento del mecanismo servo paletas es regido directamente por el gobernador electrónico, mientras que las órdenes de posicionamiento de los álabes del rodete están sujetas a la relación de eficiencia definida por el fabricante, es decir, por la curva 3D CAM expuesta en la anterior sección.

El sistema es un servo de dos estados con un lazo de control interior y exterior. El lazo interno controla la posición de la válvula distribuidora principal por medio de un servo válvula. La posición del servo válvula es proporcional a la señal eléctrica del servo controlador. El lazo externo controla la posición del servomotor principal a través de la posición de la válvula distribuidora. La posición de la válvula distribuidora es proporcional a la desviación del lazo externo, calculado por el programa del servo controlador.

2.1.2.1.- Modelo de las Paletas Directrices.

Según las respuestas dinámicas de la unidad generadora de la Central Caruachi, ante un rechazo de carga, el servomotor tiene un comportamiento amortiguador en su recorrido de cierre. La

forma de esta respuesta dinámica obedece a que la unidad tiene diferentes puntos de operación y, para cada uno de ellos, el sistema de control del subsistema servo tiene unos determinados ajustes de parámetros.

En el modelo, este comportamiento se obtiene incorporándole una ganancia adicional en la salida del servomotor. La idea es tener un valor de servomotor específico hasta el tiempo donde ocurre el cambio de pendiente, y luego se incorpora otro valor de ganancia, es decir, se adiciona un circuito amortiguador.

En la figura 9 se muestra el diagrama de control de las paletas directrices implementada en MatLab/Simulink.

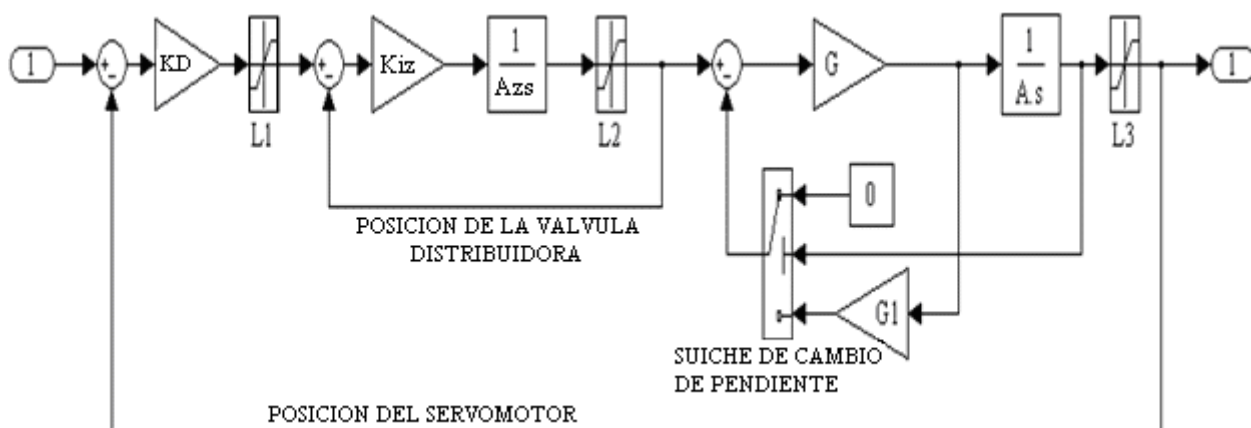


Figura 9.- Modelo del subsistema servo paletas directrices.

Los valores de las constantes de tiempo, ganancias, limitadores y tiempo de cambio de pendiente del servomotor se muestran en siguiente tabla 3:

Tabla 3. Parámetros del control de servo paletas directrices.

PARAMETRO	VALOR
Ganancia del Servo Lazo Externo KD	35
Ganancia del Servo Lazo Interno Kiz	1,17
Constante de la Válvula Distribuidora Az	0,03 seg.
Constante de Servomotor A	9 seg.
Ganancia de Ajuste del Servomotor G	1
Ganancia de Ajuste del Servomotor1 G1	3
Tiempo de Suiche Cambio de Pendiente	0,31 seg.
Limitador de Posicionamiento de la Válvula L1	(-1,1)
Limitador de Posición de Válvula L2	(-1,1)
Limitador de Posición del Servomotor L3	(0,1)

2.1.2.2.- Modelo de los Álabes del Rodete.

Como ya se ha explicado anteriormente, las órdenes de posicionamiento de los álabes del rodete están sujetas la relación de eficiencia definida por la curva 3D CAM. El modelo de control de los álabes del rodete de la Central Caruachi, implementado en el software, se expone en la siguiente figura 10:

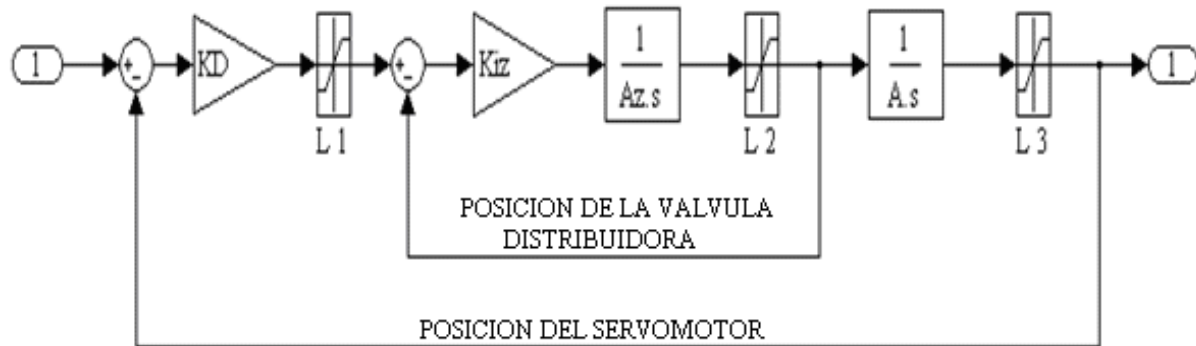


Figura 10.- Modelo del subsistema servo álabes del rodete.

Los valores de las constantes de tiempo, ganancias, limitadores y tiempo de cambio de pendiente del servomotor se muestran en siguiente tabla 4:

Tabla 4. Parámetros del Control de Servo Álabes del Rodete.

PARAMETRO	VALOR
Ganancia del Servo Lazo Externo KD	35
Ganancia del Servo Lazo Interno Kiz	1,17
Constante de la Válvula Distribuidora Az	0,03 seg.
Constante de Servomotor A	18 seg.
Limitador de Posicionamiento de la Válvula L1	(-1,1)
Limitador de Posición de Válvula L2	(-1,1)
Limitador de Posición del Servomotor L3	(0,1)

2.1.3.- Modelo del Control de Turbinas.

En este trabajo, el control de turbinas es constituido por los modelos de la dinámica de la turbina y del generador. Los criterios para simular estas dinámicas se basan en una curva de corrección de apertura de paletas como entrada, un modelo de turbina no lineal considerando el canal de admisión rígido y el agua incompresible, una curva de pérdida de la turbina, una curva característica de flujo con respecto a la posición de paletas y un modelo de generador por constante de inercia.

Todas estas consideraciones se materializaron en el modelo de Quiroga [1] para turbinas hidráulicas, donde se parametrizaron las variables en concordancia con las características de la Central Caruachi y, se anexó el lazo de los álabes del rodete como un factor de incremento de flujo, lo cual es característico de la turbina Kaplan.

2.1.3.1.- Modelo de turbina Kaplan.

En concordancia con el autor, la función de transferencia para los modelos hidráulicos de turbinas con las características geométricas de la Planta Caruachi, es decir, admisión de agua directa y rígida, y el agua incompresible, es la siguiente función integral basada en la constante de tiempo del agua T_w :

$$F(s) = \frac{1}{T_w s} \quad (2)$$

Para determinar el valor de la constante de tiempo del agua T_w se utiliza la siguiente fórmula, desarrollada matemáticamente por Rodríguez [3].

$$T_w = \sqrt{\frac{2H}{g}} \quad (3)$$

Donde:

H = Caída nominal de la turbina (m)

g = Aceleración de gravedad (m^2/seg)

La caída nominal de turbina en Planta Caruachi es de 35,6 m. Entonces, el valor de T_w es:

$$T_w = \sqrt{\frac{2 \times 35,6}{9,81}} = 2,7 \text{ seg}$$

2.1.3.1.1.- Cálculo de la curva característica de flujo-posición de paletas.

Según el trabajo de Quiroga [1], es conveniente determinar el flujo en estado estable que tiene la turbina, para cada posición de paletas directrices. Para esto, se utilizan las siguientes formulas:

$$U_{tss} = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{G^2} + f_{pl}}} \quad (4)$$

$$U_0 = U_{tss} + \frac{\frac{U_{tss}^2}{G^2} - H_0}{\Phi_p} \quad (5)$$

Donde:

U_{tss} = Flujo en estado estable (pu)

G = Apertura de paletas directrices (pu)

f_{pl} = Coeficiente de pérdida de carga (pu)

U_0 = Flujo de agua (pu)

Φ_p = Coeficiente de fricción de la tubería de admisión.

El coeficiente de fricción de la tubería de admisión Φ_p es del 1% que la pérdida de carga de turbina y, es igual a coeficiente de pérdida de carga f_{pl} . La caída nominal es 1 pu. Entonces se procede a calcular la curva para diferentes posiciones de apertura de paletas en la ecuación (4) y

luego se sustituye el valor en la ecuación (5), obteniéndose los siguientes resultados mostrados en la siguiente tabla 5:

Tabla 5. Parámetros característica flujo-posición paletas

Apertura de Paletas G [pu]	Flujo en Estado Estable U_{tss} [pu]	Flujo de Agua U_0 [pu]
0.01	0.100	0.090
0.10	0.316	0.216
0.20	0.447	0.247
0.30	0.547	0.248
0.40	0.631	0.233
0.50	0.705	0.208
0.60	0.772	0.176
0.70	0.834	0.139
0.80	0.891	0.097
0.90	0.994	0.052
1.00	0.995	0.005

La gráfica que representa el flujo de agua U_0 con respecto a la apertura de paletas G, se expone en la siguiente figura 11, y es, en definitiva, la que es utilizada en el modelo matemático de la turbina.

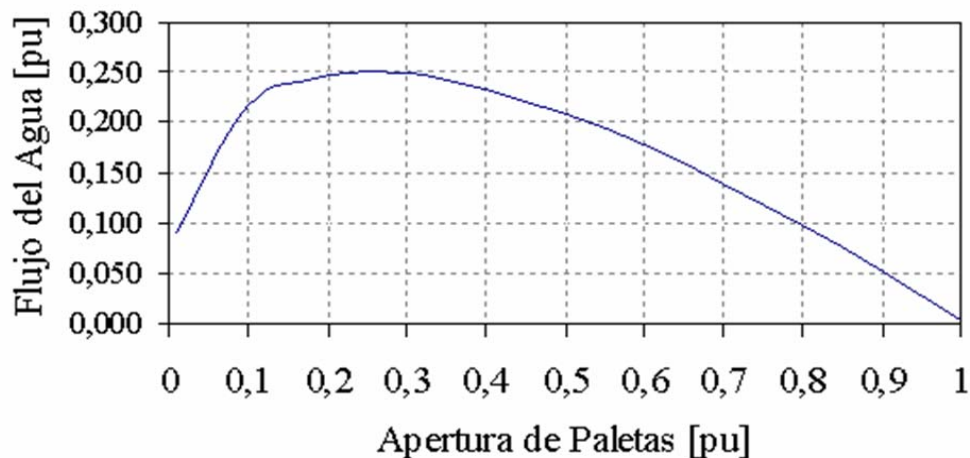


Figura 11.- Curva característica de flujo-posición de paletas

2.1.3.1.2.- Cálculo de la curva de calibración del modelo de turbina.

Las diferentes posiciones que adoptan las paletas directrices implican una determinada potencia mecánica de turbina. Los valores reales de campo de esta relación fueron obtenidos a partir de las pruebas de aceptación y rechazo de carga de la unidad N°6 de Planta Caruachi, los procedimientos de esta prueba se explican en el trabajo de Contreras [4].

La precisión de este modelo se mejoró por el conocimiento de esta relación, puesto que se desarrolló una curva característica, la cual se adiciona a la entrada del modelo de turbina, para corregir el error existente entre ambas variables, ya que las mismas no se corresponden linealmente en toda su trayectoria.

En fin, se capacitó al modelo para que desarrolle potencias mecánicas a diferentes posiciones de paletas iguales a como sucede en la unidad física.

Los valores obtenidos se muestran en la siguiente tabla 6:

Tabla 6. Valores de posición de paletas real con respecto a posición de paletas del modelo.

Posición de Paletas del Modelo G [pu]	Posición de Paletas Real g [pu]
0	0,01
0,10	0,10
0,13	0,13
0,20	0,20
0,30	0,29
0,40	0,38
0,50	0,50
0,60	0,62
0,70	0,76
0,80	0,91
0,90	1,07
1	1,23

Los valores de esta tabla se representan gráficamente por medio de la siguiente curva de calibración del modelo turbina.

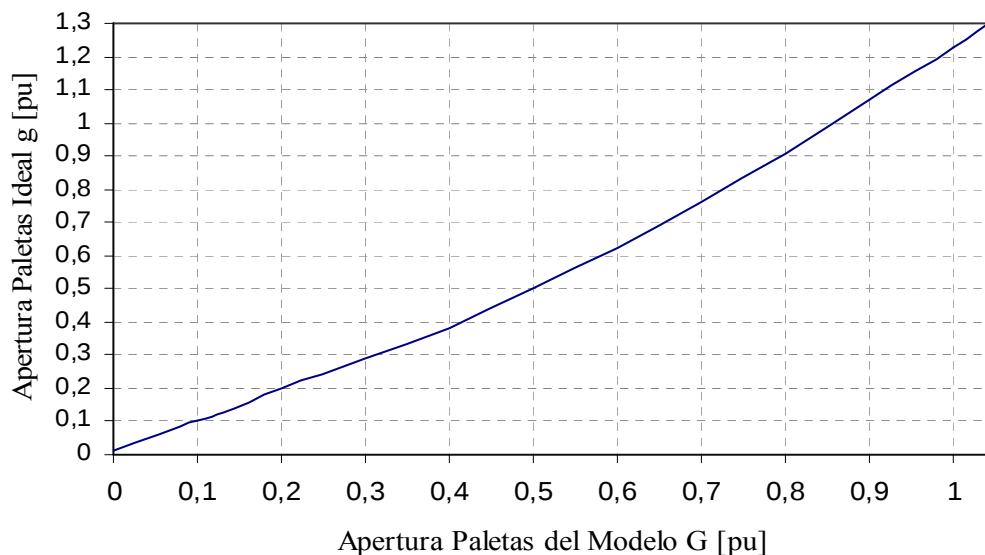


Figura 12.- Curva de calibración del modelo de turbina

2.1.3.1.3.- Cálculo de la curva de pérdidas de turbinas.

La turbina hidráulica, como masa giratoria, tiene fuerzas que se oponen a su movimiento, las cuales se traducen en pérdidas de la turbinas. Los valores de pérdidas están en función de la

velocidad de la unidad generadora, es decir, de acuerdo a la velocidad de la máquina, hay un valor de pérdida de turbina determinado. Los valores de esta relación se muestran en la siguiente tabla 7:

Tabla 7. Valores de pérdidas de turbina por velocidad de la unidad.

Velocidad del Generador [pu]	Pérdidas de la Turbina [pu]
0	0
0,10	0
0,20	0
0,30	0
0,40	0
0,50	0,01
0,60	0,03
0,70	0,05
0,80	0,08
0,90	0,10
1,00	0,13
1,10	0,20
1,20	0,29
1,30	0,4

La siguiente figura 13 muestra la representación gráfica de estos valores de pérdidas. Obsérvese como las pérdidas se relacionan con la velocidad en forma de una función exponencial.

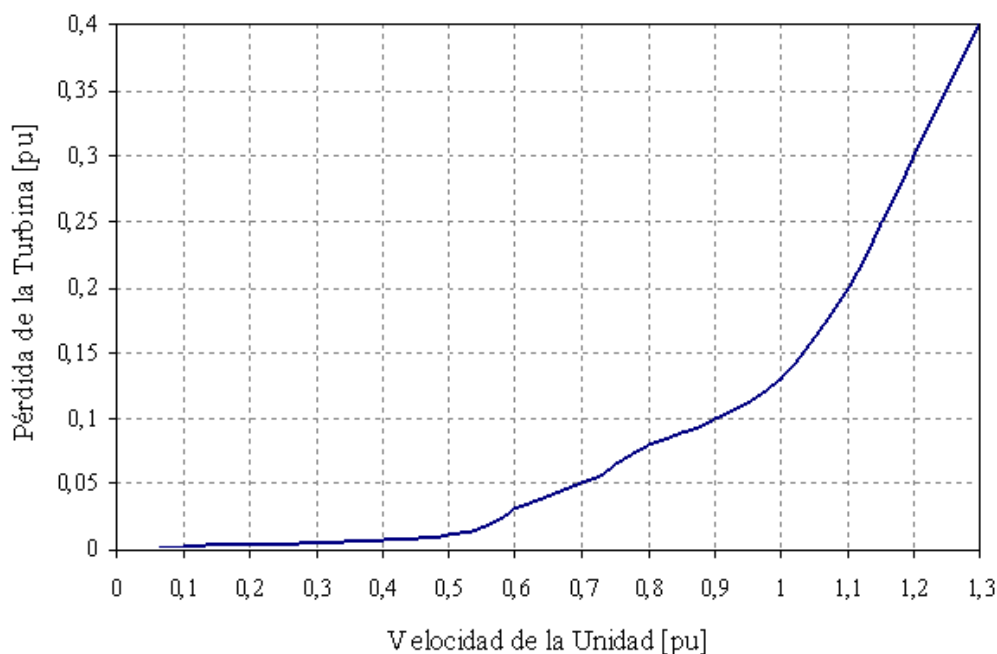


Figura 13.- Curva de pérdida de la turbina

El subsistema de control de las turbinas Kaplan del Proyecto Caruachi, se muestra en la siguiente figura 14. El limitador de velocidad está entre 0 y 1,3.

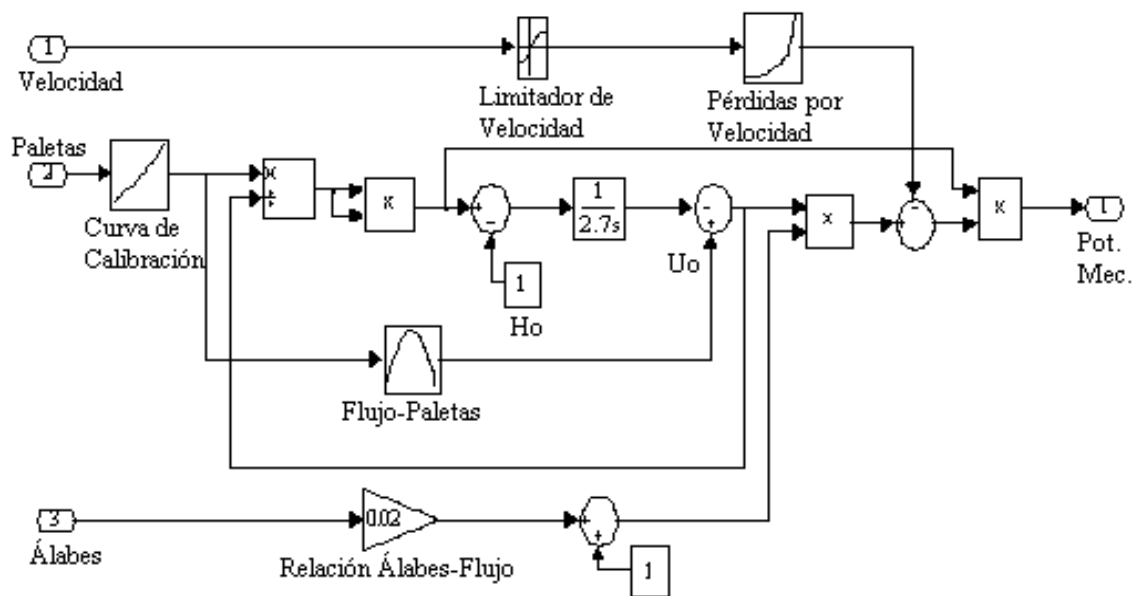


Figura 14.- Modelo del subsistema de control de turbinas.

2.1.3.2.- Modelo del Generador.

El diagrama de bloques que se utiliza para modelar la dinámica del generador, es el mostrado en la figura 15. La selección de este modelo es a objeto de garantizar que el Sistema de Gobernación de Velocidad/Potencia de turbina de la Central Caruachi desarrollado, es capaz de regular estas variables sin la influencia de los sistemas de regulación propios del generador, tal como la excitatriz, PSS. La siguiente función de transferencia representa el generador:

$$G(s) = \frac{1}{2Hs} \quad (6)$$

Siendo H = Constante de Inercia (MW-Seg/MVA)

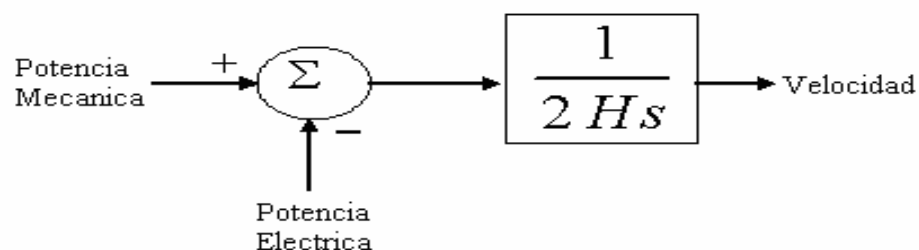


Figura 15.- Modelo del generador en función de la constante de inercia.

Este tipo de modelo de generador solo tiene como variable de entrada la potencia acelerante del sistema de control, y la transforma en velocidad, es decir, no tiene ninguna influencia de regulación.

El valor de la constante de inercia del generador de Caruachi es 4,2 pu. Este modelo, evidentemente, toma la señal de potencia mecánica de la turbina, la compara con la señal de carga (potencia eléctrica) y la diferencia de éstas potencias (potencia acelerante) es procesada por el bloque integrador y resulta como señal de salida velocidad de la unidad generadora.

A continuación se muestra el diagrama de bloques principal simplificado de la configuración principal del Sistema de Gobernación de Velocidad/Potencia de las turbinas Kaplan de la Central Caruachi. Este modelo permite simular todo el comportamiento dinámico de las variables consideradas en el desarrollo éste, es decir, puede simular el funcionamiento de la unidad generadora desde el modo arranque hasta el rechazo de carga.

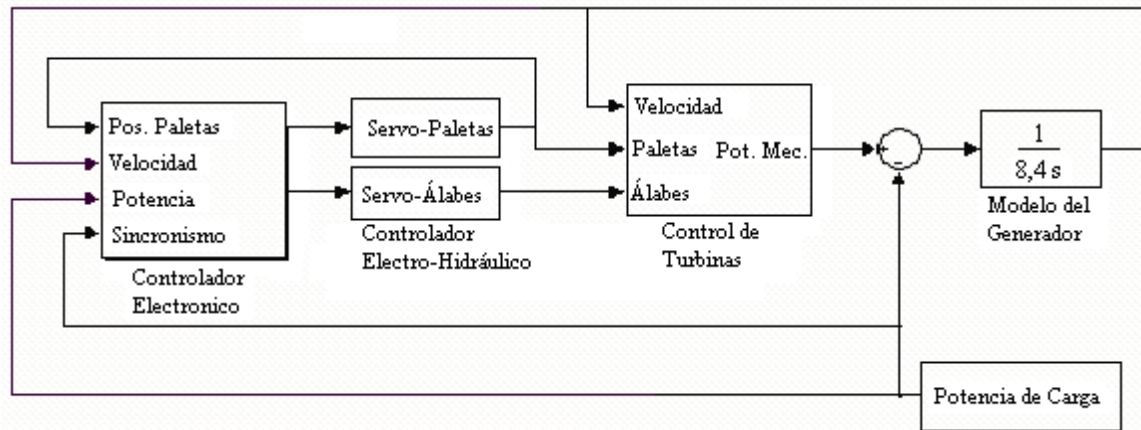


Figura 16.- Esquema principal del simulador del Sistema de Gobernación de Caruachi

2.2.- VALIDACION DEL MODELO.

En esta sección se presenta los resultados de las diferentes simulaciones del modelo del Sistema de Gobernación desarrollado e implementado. A objeto de validar este modelo, las simulaciones son comparadas con las respuestas reales de la unidad generadora N° 6 de Caruachi ante la prueba de aceptación y rechazo de carga. Las comparaciones son realizadas por el método estadístico de correlación lineal del trabajo de Murray [6].

2.2.1.- Comportamiento dinámico inicial de la unidad generadora.

Las siguientes curvas de la figura 17 muestran la simulación del comportamiento dinámico del modelo desde el inicio de su operación, velocidad cero (0), hasta conseguir su valor nominal, velocidad a 94.74 rpm (revoluciones por minuto), es decir, a una frecuencia de 60 Hz.

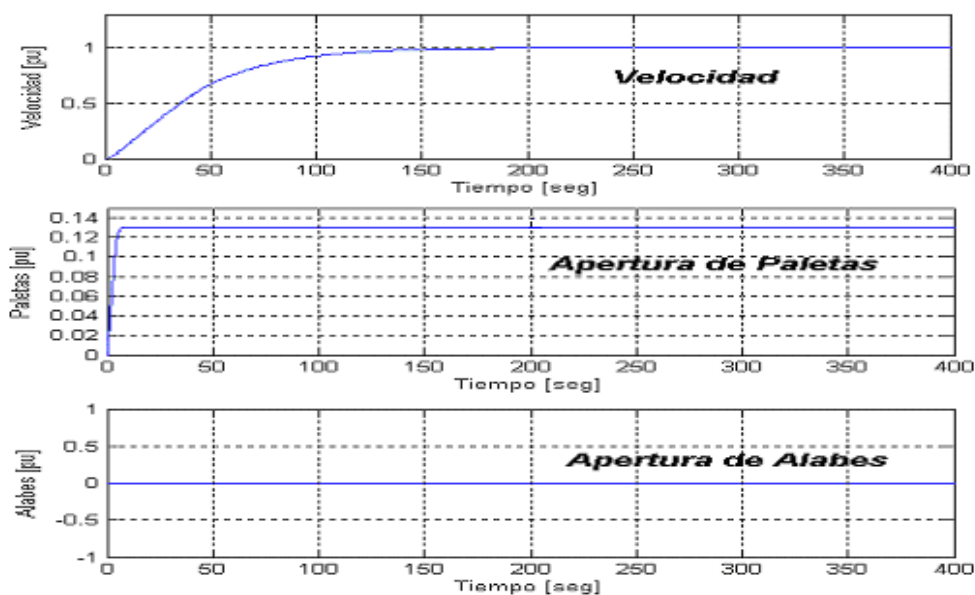


Figura 17.- Velocidad, paletas y álabes desde el arranque a velocidad nominal.

Las unidades de Caruachi, normalmente logran obtener su velocidad nominal en un rango aproximado de 180 a 220 segundos. La figura 17 indica que la velocidad nominal se consigue en 180 segundos, por lo que la respuesta dinámica de la velocidad del modelo implementado cumple con esta característica de arranque. Las paletas tienen un posicionamiento inicial de 13% de su apertura. No hay movimiento de apertura de los álabes del rodete.

2.2.2.- Comportamiento dinámico de la unidad generadora ante la toma de carga de potencia.

La siguiente figura 18 muestra la señal de entrada de potencia de carga al modelo implementado y las respuestas dinámicas de las variables de estudio, velocidad, posición de paletas y álabes.

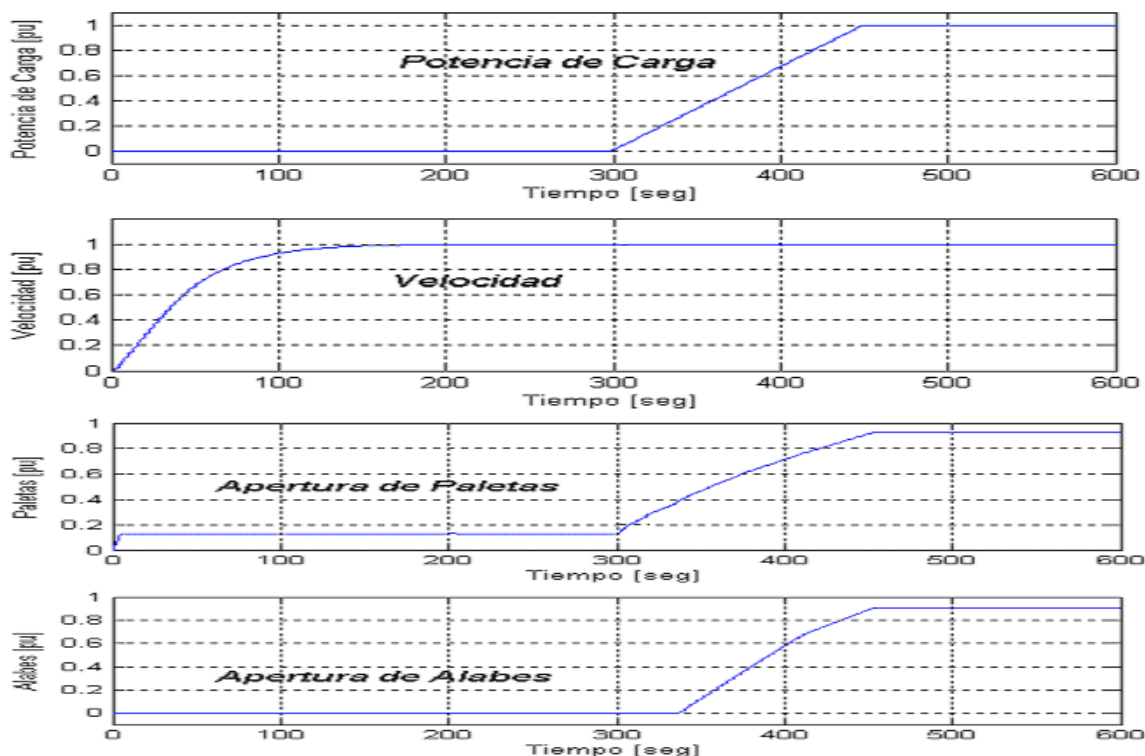


Figura 18.- Velocidad, paletas y álabes ante la toma de potencia de carga.

Nótese como la velocidad se mantiene constante, dado que ante la toma de carga o sincronización, la velocidad de la unidad se conmuta a la dinámica del sistema de potencia. La apertura de paletas se incrementa hasta aproximadamente 92% para satisfacer esta potencia de carga, ya que a mayor apertura de paletas mayor será el caudal de agua en la turbina y, por consiguiente, mayor la potencia generada. Los álabes se posicionan en 91% de inclinación.

Es importante destacar que las turbinas Kaplan de Caruachi tienen la capacidad de satisfacer la demanda de potencia de carga con valores de apertura de paletas y álabes menores a sus nominales, tal como se indican en las simulaciones de la figura 18. En otros términos, estas unidades son capaces de generar un valor de potencia mayor a su nominal, tal como se indica en las especificaciones técnicas de éstas.

2.2.3.- Comportamiento dinámico de la unidad generadora ante un rechazo de carga.

En esta sección se realizan simulaciones de rechazos de cargas de 25%, 50%, 75% y 100% y se comparan con los resultados de las pruebas de aceptación y rechazo de carga de la unidad generadora N° 6 de Caruachi, para validar el modelo. Este es uno de los estudios más importante y utilizado para verificar el óptimo funcionamiento de cualquier unidad generadora.

2.2.3.1.- Rechazo de carga de 25%.

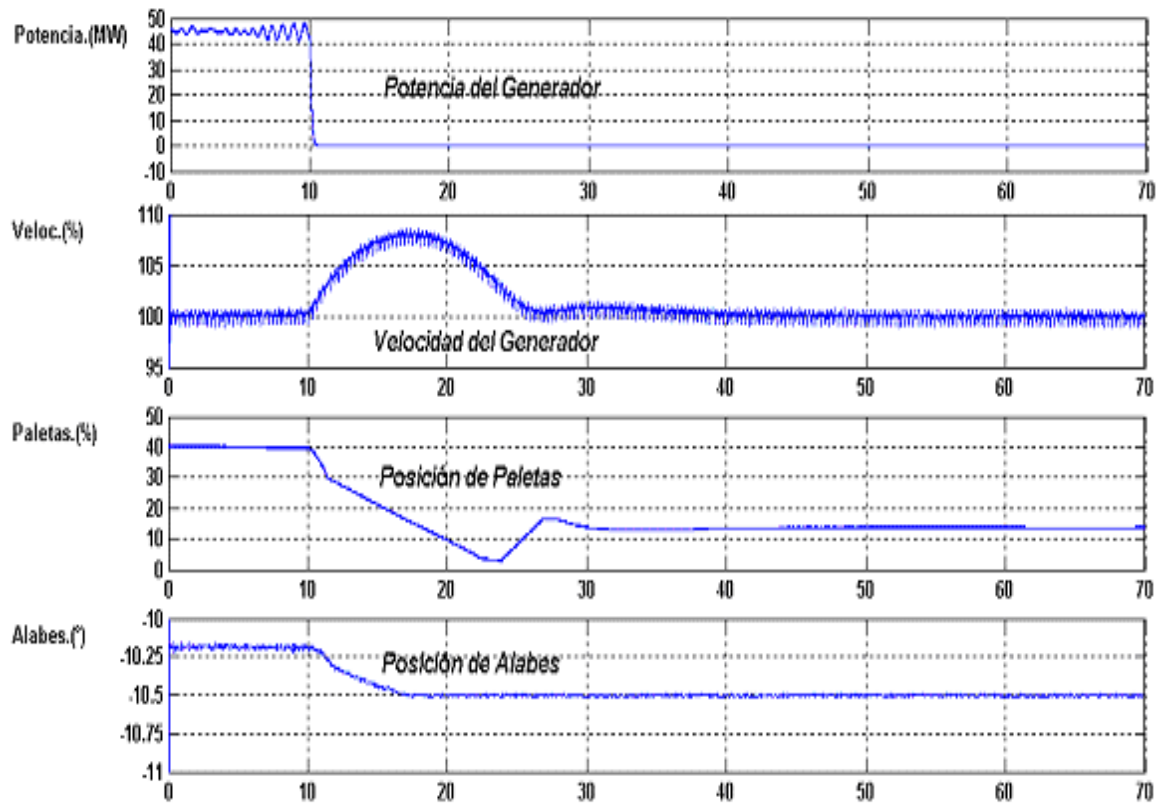


Figura 19.- Rechazo de carga a 25% unidad N° 6, Planta Caruachi.

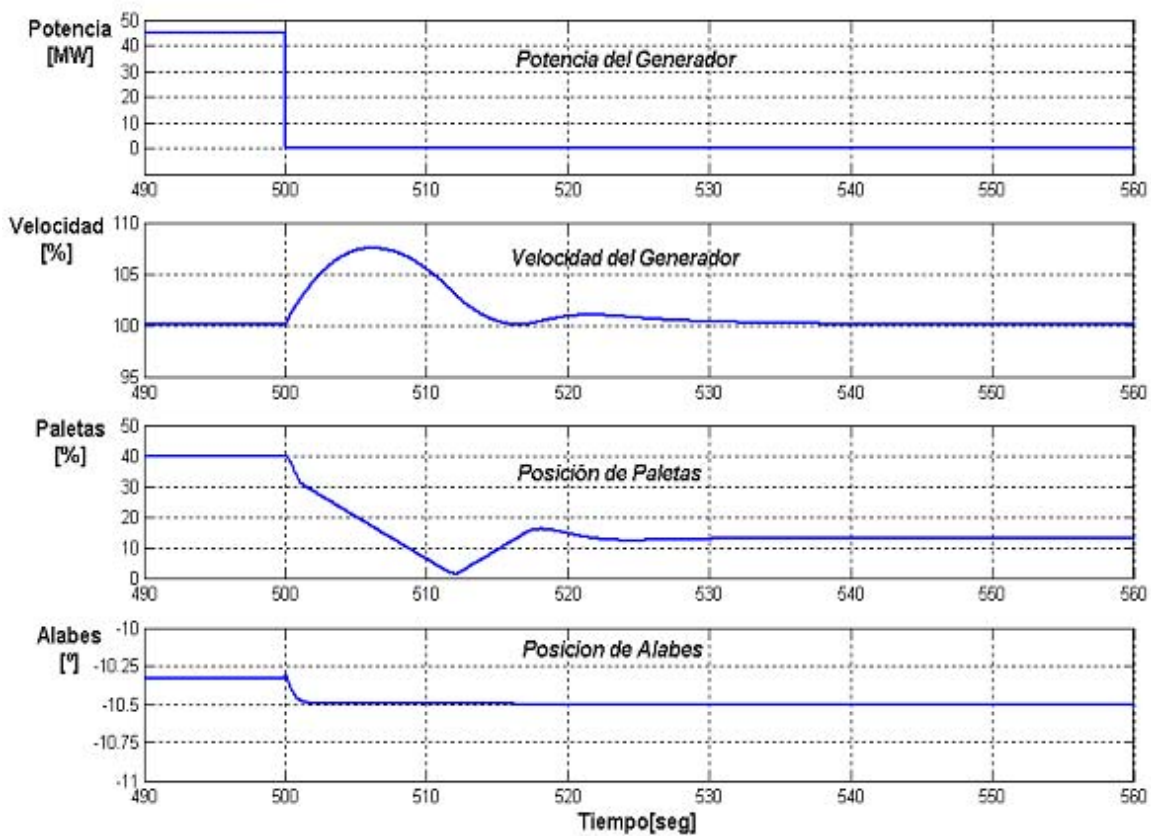


Figura 20.- Simulación del Rechazo de carga a 25% del modelo implementado.

2.2.3.2.- Rechazo de carga de 50%.

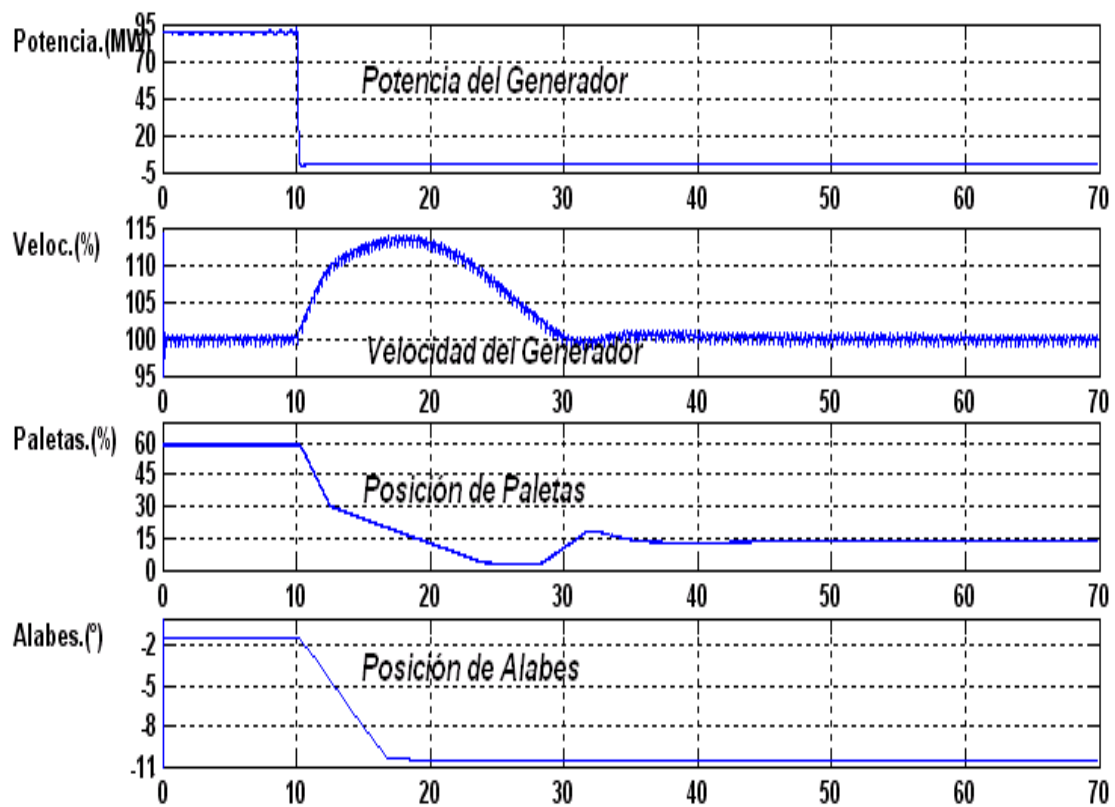


Figura 21.- Rechazo de carga a 50% unidad N° 6, Planta Caruachi.

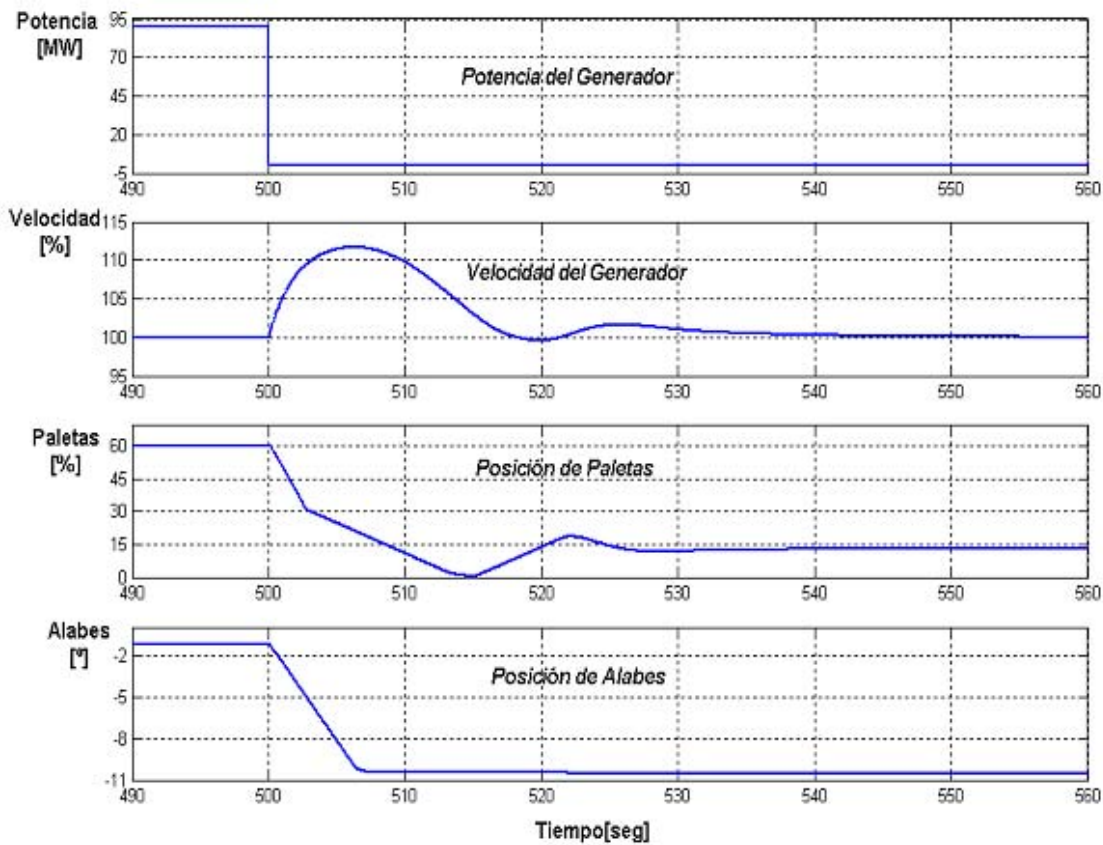


Figura 22.- Simulación del Rechazo de carga a 50% del modelo implementado

2.2.3.3 Rechazo de carga de 75%.

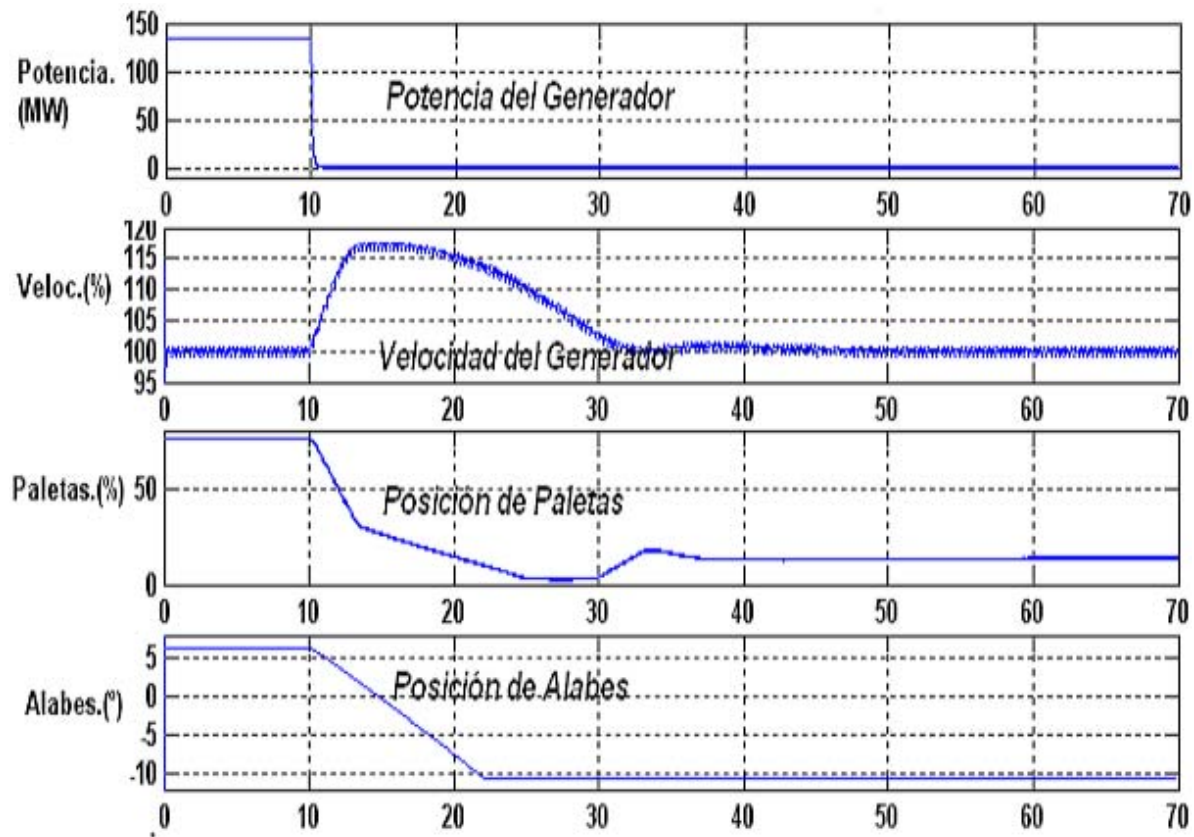


Figura 23.- Rechazo de carga a 75% unidad N° 6, Planta Caruachi.

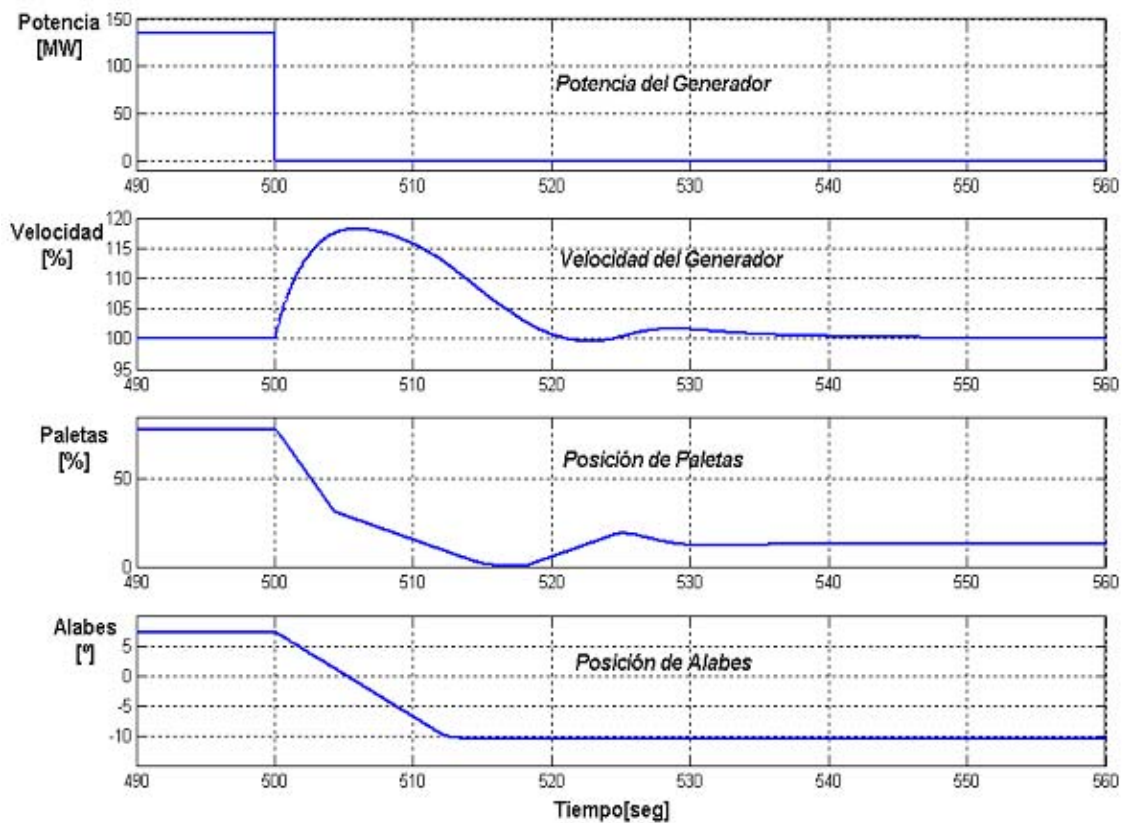


Figura 24.- Simulación del Rechazo de carga a 75% del modelo implementado

2.2.3.4.- Rechazo de carga de 100%.

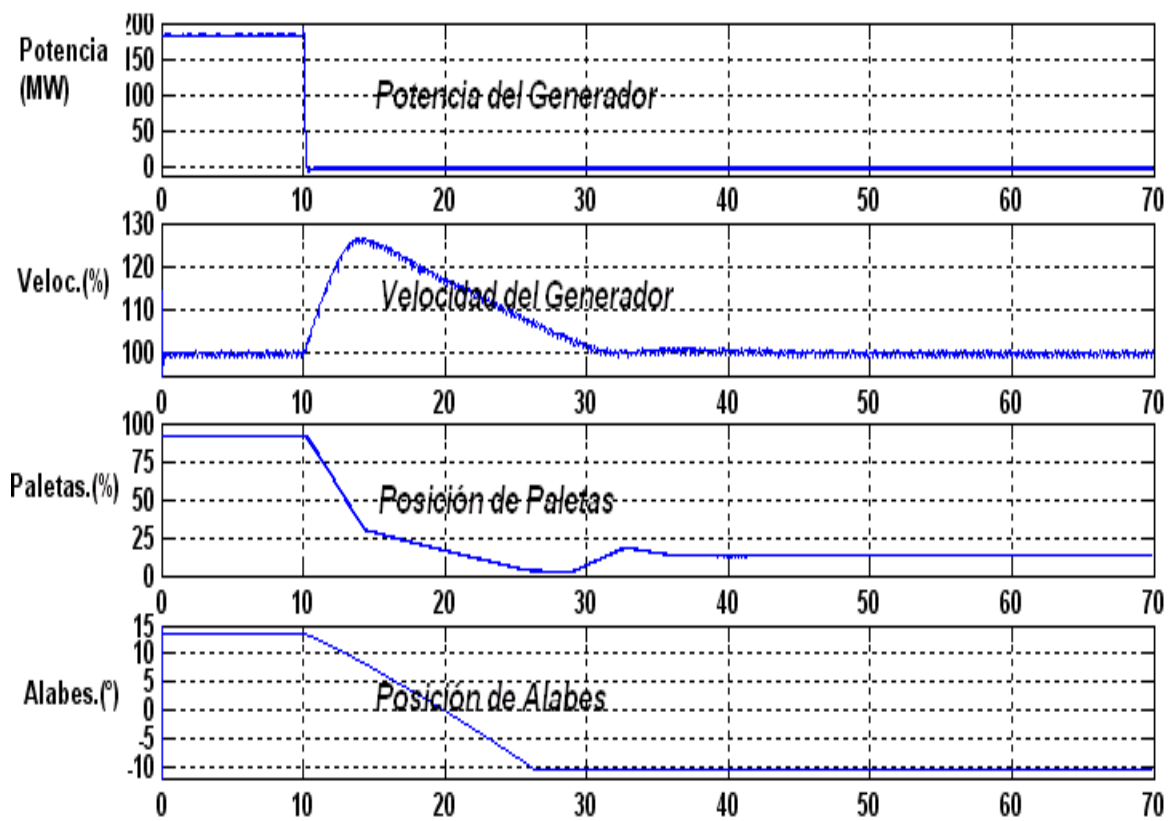


Figura 25.- Rechazo de carga a 100% unidad N° 6, Planta Caruachi.

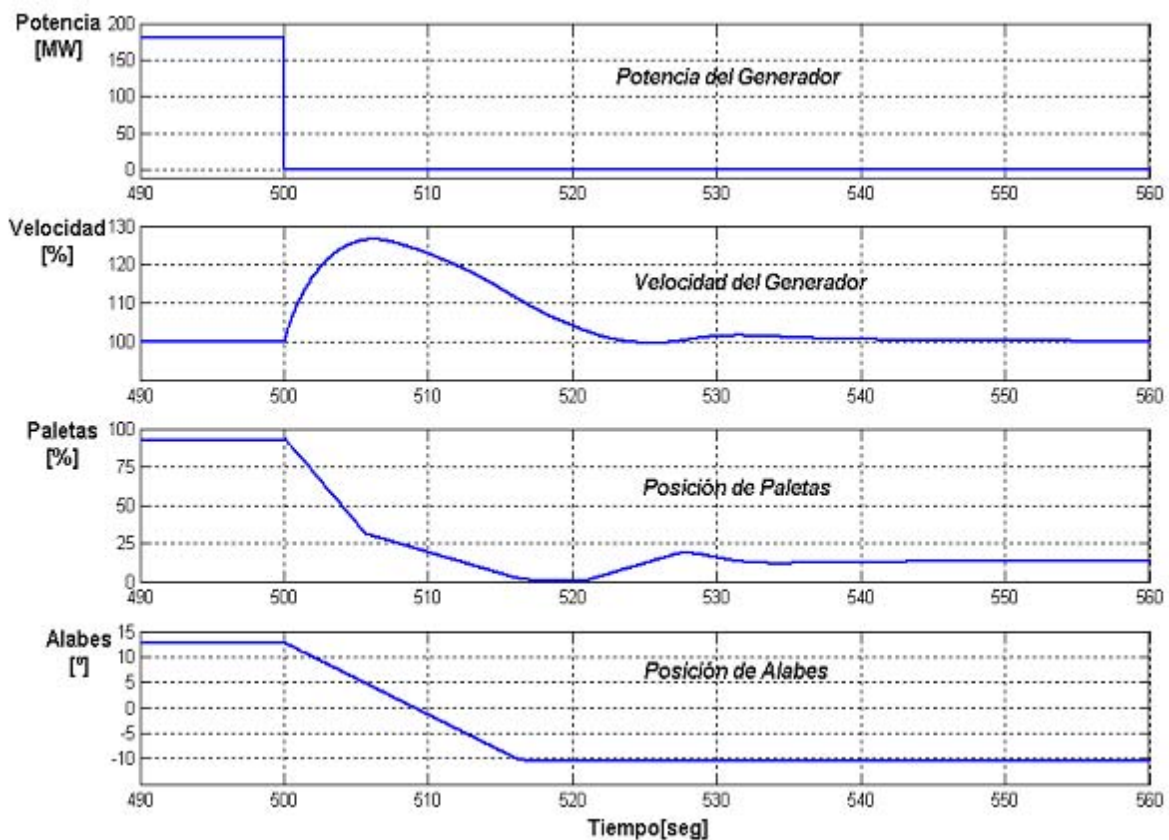


Figura 26.- Simulación del Rechazo de carga a 100% del modelo implementado

Por medio de la siguiente tabla, se muestran todos los valores de coeficiente de relación y el error de la velocidad, paletas y álabes entre las respuestas reales del sistema y las del modelo implementado, para todos los niveles de rechazo de carga.

Tabla 8. Coeficientes de correlación y error entre las respuestas de campo y las simulaciones ante los rechazos de cargas.

RECHAZOS	VARIABLES	COEFICIENTE DE CORRELACION	ERROR PORCENTUAL [%]
25%	Velocidad	0,98	2
	Paletas Directrices	0,99	1
	Alabes del Rodete	0,84	16
50%	Velocidad	0,98	2
	Paletas Directrices	0,99	1
	Alabes del Rodete	0,99	1
75%	Velocidad	0,99	1
	Paletas Directrices	0,99	1
	Alabes del Rodete	0,99	1
100%	Velocidad	0,96	4
	Paletas Directrices	0,99	1
	Alabes del Rodete	0,99	1

Se puede avalar que el modelo implementado, cumple con las características más importantes en el estudio del sistema de control de regulación de velocidad de las turbinas Kaplan de Caruachi. Se nota una alta correlación entre las respuestas de la unidad N°6 de la central y las del modelo de ésta.

En fin, se ha implementado un modelo que ha sido científicamente validado, en base a un método estadístico, el cual es la correlación lineal entre valores muestras de dos sistemas dinámicos.

3.- CONCLUSIONES.

- Con la finalización de este trabajo, se ha validado un modelo del Sistema de Gobernación de Velocidad/Potencia de las Turbinas Kaplan de la Planta Caruachi con las pruebas de campo, dado que en las comparaciones de respuestas del modelo y de la unidad real se observa un alto grado de similitud en las dinámicas de velocidad de la máquina, paletas directrices y álabes del rodete, en los escenarios de operación de arranque, sincronización y rechazos de cargas. En el caso de la velocidad, por ejemplo, el pico máximo y el tiempo de estabilización de la unidad, es muy aproximado entre ambas respuestas.
- El modelo implementado está capacitado para simular rechazos de carga a cualquier valor de potencia en el rango de operación de la máquina, sin tener la necesidad de variar los

bloques de potencia, solo se realiza ajustes en los valores de potencia de carga y la referencia de potencia.

- Las simulaciones efectuadas solo incluyen la dinámica propia de la unidad, donde la inercia de la máquina hidrogeneradora no es capaz de responder súbitamente a los cambios de frecuencia del sistema, una vez que la unidad ha sido sincronizada a la red.
- El modelo puede adaptarse fácilmente para simular el comportamiento del generador no solo ante los rechazos de carga, sino también, ante fluctuaciones en la frecuencia de la red, es decir, es flexible a pequeñas modificaciones con la finalidad de adaptarse a otros estudios propios del sistema.
- La utilidad del modelo desarrollado va más allá de la evaluación de contingencias, debido a que el simulador puede constituirse en una valiosa herramienta para el entrenamiento de nuevo personal en esta área.

4.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

[1]. Quiroga, O., “Modelling and Nonlinear Control of Voltage Frequency of Hydroelectric Power Plants”. Doctoral Thesis, University Polytechnic of Cataluña, Barcelona, España, 2000.

[2]. Kundur, P., “Power System Stability and Control”, McGraw-Hill-EPRI, USA. 1994.

[3]. Rodríguez, J., “Desarrollo de un Macromodelo soportado en MATLAB para evaluar el Comportamiento Dinámico de las Turbinas Kaplan de Casa de Máquinas III del Complejo Hidroeléctrico 23 de Enero”. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”, Vicerrectorado Pto. Ordaz, UNEXPO, Pto. Ordaz, Edo. Bolívar, Venezuela. 2003.

[4]. Contreras, R., “Protocolos de Pruebas de Aceptación y Rechazo de Carga de la Unidad N° 6 de Planta Caruachi”, Centro de Investigaciones Aplicadas-CIAP. CVG. Electrificación del Caroní, C. A., EDELCA. 2004.

[5]. Consorcio KVAERNER GE Hydro Canadá, “Manual de Operación y Mantenimiento del Proyecto Caruachi”, Documento N° 103-200-CM, Sistema de Control Local de la Turbina, Vol. 0, Gobernador Electrónico, Vol. 2, 2000.

[6]. Murray, S., “Estadísticas”, 2da. Edición, Editorial McGraw-Hill, 1999.