

DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL AVANZADO PARA TURBINAS
HIDRAULICAS

AUTORES:

MIGUEL DAVID CORDERO ESTUPIÑAN

ANDRES FELIPE CASTRO MANZANO

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BUCARAMANGA

FACULTAD DE INGENIERIAS

PROGRAMA DE INGENIERIA MECATRONICA

BUCARAMANGA

2021

DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL AVANZADO PARA TURBINAS
HIDRAULICAS

AUTORES:

MIGUEL DAVID CORDERO ESTUPIÑAN

ANDRES FELIPE CASTRO MANZANO

DIRECTOR:

M.Sc. HERNANDO GONZALEZ ACEVEDO

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BUCARAMANGA

FACULTAD DE INGENIERIAS

PROGRAMA DE INGENIERIA MECATRONICA

BUCARAMANGA

2021

Bucaramanga, Noviembre 2021

NOTA DE APROBACIÓN

Trabajo de grado titulado “DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL AVANZADO PARA TURBINAS HIDRAULICAS”, presentado por el estudiante Miguel David Cordero Estupiñan para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica

M.Sc. Hernando González Acevedo
Firma de Director.

Dr. Antonio Faustino Muñoz Moner
Firma de Evaluador.

M.Sc. Edward Yesith Mendoza González
Firma de Evaluador.

Agradecimientos.

Queremos agradecer a Dios por darnos la fuerza y bendición para terminar este trabajo. A nuestros padres por su incondicional apoyo, comprensión y paciencia quienes nos han enseñado el valor de la perseverancia y el amor en cualquier dificultad.

A la Universidad Autónoma de Bucaramanga por brindarnos la oportunidad de poder formarnos como personas profesionales y a los espacios atribuidos para realizar este proyecto.

A nuestro director de proyecto de grado por todo el apoyo y atención brindada durante el transcurso de los semestres para lograr sacar adelante este proyecto.

A los auxiliares del laboratorio de electrónica y de Planta Piloto porque con su colaboración hicieron más ameno este proceso.

A nuestros evaluadores de proyecto por las observaciones y asesorías realizadas ayudando a mejorar de forma considerable el proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	9
OBJETIVOS	10
CAPITULO 1: MODELO DINAMICO DE LA TURBINA HIDRAULICA	11
1.1. SENSORES	11
1.2. SISTEMA ELECTRÓNICO.....	12
1.3. ACTUADORES.....	13
1.4. DISEÑO MECÁNICO.....	14
1.5. MODELO MATEMÁTICO TURBINA KAPLAN.....	15
1.5.1 Ecuaciones de la turbina.....	16
1.5.2 Ecuaciones del generador DC.....	19
1.5.3 Validación modelo	20
1.6. MODELO MATEMÁTICO TURBINA FRANCIS.....	24
1.6.1 Ecuaciones de la turbina.....	24
1.6.2 Ecuaciones del generador DC.....	26
1.6.3 Validación modelo	26
CAPITULO 2: SISTEMA DE CONTROL.....	32
2.1. CONTROL TÉCNICA SENSIBILIDAD MIXTA	32
2.2. DISEÑO CONTROL SENSIBILIDAD MIXTA.....	36
2.2.1 Control sensibilidad mixta Turbina Kaplan.....	36
2.2.2 Control sensibilidad mixta Turbina Francis	38
2.3. CONTROL PREDICTIVO MPC.....	40
2.4. DISEÑO CONTROL PREDICTIVO MPC.....	43
2.4.1 Control MPC Turbina Kaplan	43
2.4.2 Control MPC Turbina Francis.....	46
CAPITULO 3: VALIDACION EXPERIMENTAL.....	50
3.1. IMPLEMENTACIÓN CONTROL SENSIBILIDAD MIXTA TURBINA KAPLAN.....	52
3.2. IMPLEMENTACIÓN CONTROL MPC TURBINA KAPLAN.....	55
3.3. IMPLEMENTACIÓN CONTROL SENSIBILIDAD MIXTA TURBINA FRANCIS	59
3.4. IMPLEMENTACIÓN CONTROL MPC TURBINA FRANCIS.....	62
CAPITULO 4: CONTROL PI.....	66

4.1.	CONTROL PI TURBINA FRANCIS	66
4.2.	CONTROL PI TURBINA KAPLAN	66
4.3.	IMPLEMENTACIÓN CONTROL PI TURBINA FRANCIS.....	66
4.4.	IMPLEMENTACIÓN CONTROL PI TURBINA KAPLAN	70
CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES		74
BIBLIOGRAFIA		76
ANEXOS		78

TABLA DE FIGURAS

<i>Figura 1 Banco turbinas hidráulicas</i>	11
<i>Figura 2 Esquemático del sistema electrónico.....</i>	13
<i>Figura 3 Vista isométrica del diseño mecánico</i>	15
<i>Figura 4 Gráfica descarga turbina Kaplan.....</i>	17
<i>Figura 5 Gráfica eficiencia turbina Kaplan</i>	18
<i>Figura 6 Comparación del voltaje teórico vs experimental</i>	23
<i>Figura 7 Comparación de la velocidad teórica vs experimental.....</i>	23
<i>Figura 8 Gráfica Q vs G (apertura del alabe turbina Francis)</i>	26
<i>Figura 9 Respuesta ante una entrada escalón de la turbina Francis.....</i>	29
<i>Figura 10 Diagrama de bode de la turbina Francis.....</i>	30
<i>Figura 11 Comparación del voltaje teórico vs experimental.....</i>	31
<i>Figura 12 Comparación de la velocidad teórica vs experimental.....</i>	31
<i>Figura 13 Esquema general de control robusto con sensibilidad mixta.....</i>	34
<i>Figura 14 Respuesta transitoria del controlador sensibilidad mixta turbina Kaplan</i>	37
<i>Figura 15 Acción de control del controlador sensibilidad mixta turbina Kaplan.....</i>	38
<i>Figura 16 Respuesta transitoria del controlador sensibilidad mixta turbina Francis.....</i>	39
<i>Figura 17 Acción de control del controlador sensibilidad mixta turbina Francis</i>	40
<i>Figura 18 Respuesta transitoria del controlador MPC Kaplan.....</i>	45
<i>Figura 19 Acción de control del controlador MPC Kaplan.....</i>	46
<i>Figura 20 Respuesta transitoria del controlador MPC Francis</i>	48
<i>Figura 21 Acción de control del controlador MPC Francis.....</i>	49
<i>Figura 22 HMI.....</i>	51
<i>Figura 23 Programación selectores controladores.....</i>	51
<i>Figura 24 Setpoint vs voltaje generado.....</i>	52
<i>Figura 25 Acción de control.....</i>	53
<i>Figura 26 Perturbación de voltaje.....</i>	53
<i>Figura 27 Acción de control.....</i>	54
<i>Figura 28 Perturbación de caudal</i>	54
<i>Figura 29 Acción de control.....</i>	55
<i>Figura 30 Respuesta transitoria ante diferentes cambios de setpoint.....</i>	56
<i>Figura 31 Acción de control.....</i>	56
<i>Figura 32 Perturbación de voltaje.....</i>	57
<i>Figura 33 Acción de control.....</i>	57
<i>Figura 34 Perturbación de caudal</i>	58

<i>Figura 35 Acción de control.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 36 Respuesta transitoria ante diferentes cambios de setpoint.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 37 Acción de control.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 38 Perturbación de voltaje.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 39 Acción de control.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 40 Perturbación de caudal.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 41 Acción de control.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 42 Respuesta transitoria ante diferentes cambios de setpoint.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 43 Acción de control.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 44 Perturbación de voltaje.</i>	<i>64</i>
<i>Figura 45 Acción de control.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 46 Perturbación de caudal.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 47 Acción de control.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 48 Respuesta transitoria ante diferentes cambios de setpoint.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 49 Acción de control.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 50 Perturbación de voltaje.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 51 Acción de control.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 52 Perturbación de caudal.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 53 Acción de control.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 54 Respuesta transitoria ante diferentes cambios de setpoint.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 55 Acción de control.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 56 Perturbación de voltaje.</i>	<i>72</i>
<i>Figura 57 Acción de control.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 58 Perturbación de caudal.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 59 Acción de control.....</i>	<i>73</i>

TABLAS

<i>Tabla 1 Parámetros generador DC.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 2 Puntos de Equilibrio Turbina Kaplan.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 3 Valores de los parámetros de la turbina Kaplan.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 4 Puntos de Equilibrio Turbina Francis.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 5 Valores de los parámetros de la turbina Francis.....</i>	<i>28</i>

INTRODUCCION

El interés por la utilización de energías renovables cumpliendo con los requerimientos medioambientales ha impulsado el desarrollo de fuentes de energía limpia, un ejemplo de ello es el crecimiento en la construcción de pequeñas centrales hidroeléctricas, las cuales tienen un bajo impacto ambiental llevando energía eléctrica a poblaciones alejadas de las zonas urbanas. Dicha expansión hace necesario contar con una plataforma de experimentación para sistemas de generación de energía hidroeléctrica que facilite la investigación en este campo.

El banco de turbinas hidráulicas es una herramienta para los programas de ingeniería mecatrónica e ingeniería en energía, que busca fomentar el estudio de estos procesos. El banco cuenta con una turbina Francis y una Kaplan las cuales están acopladas a un generador DC, la turbina Francis tiene alabes directrices los cuales se pueden variar su Angulo de apertura a través de un eje, la turbina Kaplan posee alabes en el rodete los cuales se pueden variar su ángulo de apertura a través de un volante blanco y alabes directrices los cuales se varían a través de un eje. Con el fin de poder automatizar este banco y poderlo enlazarlo con el sistema Delta V se procedió a instrumentar el sistema comprando sensores que permitieran la comunicación con el sistema SCADA, además se construyó un sistema mecánico el cual permite manipular los alabes directrices de las dos turbinas desde la HMI del SCADA. Este proyecto se lleva a cabo con el fin de poder comparar los diferentes resultados obtenidos en la práctica con los datos teóricos. En el proyecto se diseñan y validan estrategias de control robusto y predictivo.

OBJETIVOS

GENERAL

Diseñar un sistema de control avanzado para regular el voltaje generado por una turbina tipo Francis y Kaplan, las cuales operan de forma independiente.

ESPECIFICOS

- Determinar el modelo matemático de las turbinas hidráulicas Kaplan y Francis.
- Diseñar un sistema mecánico que permita controlar los alabes de las turbinas hidráulicas Kaplan y Francis.
- Diseñar un controlador robusto con el fin de controlar el voltaje DC generado por las turbinas hidráulicas Kaplan y Francis
- Diseñar un controlador predictivo con el fin de controlar el voltaje DC generado por las turbinas hidráulicas Kaplan y Francis
- Automatizar las turbinas hidráulicas integrándolas al sistema delta V, con el cual se pueda manipular y registrar las variables relevantes del sistema.
- Validar las estrategias de control, robusto y predictivo con las turbinas hidráulicas tipo, Kaplan y Francis.

CAPITULO 1: MODELO DINAMICO DE LA TURBINA HIDRAULICA

En la figura 1 se observa el banco de turbinas hidráulicas H112D el cual está compuesto por turbinas hidráulicas: a la derecha la turbina Kaplan y a la izquierda la turbina Francis, cuenta con tres válvulas de operación manuales para permitir el flujo de agua dependiendo de la turbina, en el centro esta acoplado al generador DC, además en la parte trasera esta la bomba la cual mueve el agua a través de las tuberías.



Figura 1 Banco turbinas hidráulicas.

FUENTE: Autores.

1.1. Sensores

Para la adquisición de las señales del sistema se requirieron 3 sensores, para tener la retroalimentación del sistema se utilizó el voltímetro digital el cual envía una señal de 4 – 20 mA al sistema SCADA y de esta forma poder leer la señal. Para leer la señal de la velocidad de la turbina se procedió a implementar el tacómetro digital el cual también envía una señal de 4 – 20 mA.

MT4WDV - 44: voltímetro digital, fuente de alimentación 100 - 240 VAC 50/60 Hz, tipo de medición voltaje DC, rango de medición 0 - 500 V, salida 3 x NPN OC + Retransmisión 4 - 20 mA, tamaño 96 x 48 mm. **[1]**

MP5W-44: tacómetro digital, fuente de alimentación 100 - 240 VAC 50/60 Hz, tipo de medición pulsos, rango de medición máximo 50 KHz, salida 5 x NPN NA + Retransmisión 4 - 20 mA, tamaño 96 x 48 mm. **[2]**

Se implementó el sensor de presión TR-PS2W, mediante el cual obtenemos el caudal que pasa por las turbinas hidráulicas para lo cual utilizamos la ecuación 1 donde x es el valor de presión en [psi] que obtenemos del sensor y Q es el valor de caudal en [m³/h]. Esta curva se calibro utilizando el rotámetro que tiene el banco de turbinas.

$$Q = -17.131x^2 + 26.207x + 127.6 \quad \text{Ecuación (1)}$$

Sensor de Presión: posee rangos desde 0 hasta 145 psi, con una linealidad de 0.2% su salida analógica es amplificada en corriente, cuenta con protección IP65.

[3]

También se implementó una celda de carga tipo S para poder obtener el valor del torque generado por las turbinas hidráulicas. La cual trabaja con protocolo HART.

[4]

1.2. Sistema electrónico

El sistema electrónico se muestra en la figura 2, está dado de la siguiente forma, posee la fuente de alimentación la cual alimenta el driver del motor y a su vez alimenta el regulador DC - DC el cual permite la alimentación del arduino, se utiliza una salida analógica del Delta V el cual envía el porcentaje de movimiento del motor

esta señal es de 4 – 20 mA, la cual llega a un convertor de corriente a voltaje y el voltaje de salida de esta shield va a un puerto análogo del arduino y de esta forma el motor realice el giro.

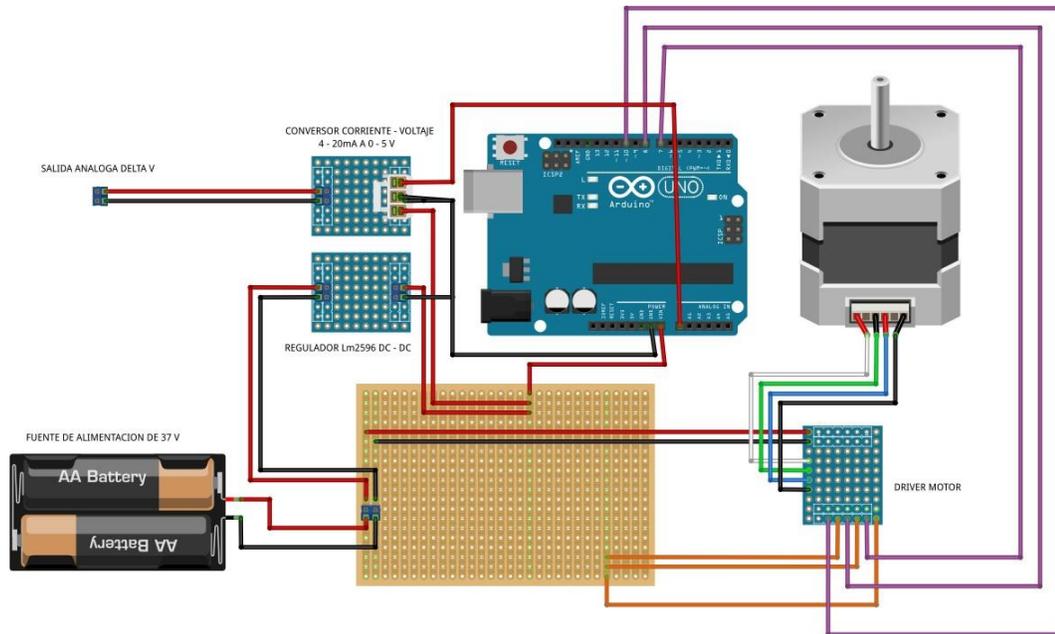


Figura 2 Esquemático del sistema electrónico.

FUENTE: AUTORES.

1.3. Actuadores

El actuador es un servomotor NEMA34 86HB250-118, con torque estático de $8.5\text{N}\cdot\text{m}$. Este motor se escogió debido a que se hizo una prueba de torque donde se pudo evidenciar que la fuerza necesaria para mover el eje de los alabes de las turbinas era de 6.8Nm , de tal forma se escogió un servomotor por encima de este torque. Además, el servomotor ya trae un driver para poder realizar el giro del motor. [5]

Características:

- Carcasa: NEMA 34

- Ángulo por paso: 1.8°
- Pasos por revolución: 200
- Consumo de corriente nominal: 4A
- Torque: 86kg/cm
- Velocidad nominal: 1500RPM

1.4. Diseño Mecánico

Como se observa en la figura 3 el sistema mecánico se diseñó de forma que se pudiera desacoplar y acoplar fácilmente, también un criterio de diseño era que al banco de turbinas no se le podía realizar ninguna perforación por lo cual se tuvo que utilizar los mismos agujeros de los tornillos existentes para poder asegurar el sistema mecánico. El sistema mecánico cuenta con 3 correderas de forma que se puede desplazar en todos los ejes x, y, z. De esta forma se asegura que el motor este acoplado al eje de los alabes y permita el giro. Además, cuenta con un acople tipo araña el cual permite que la sujeción entre el motor y el eje de los alabes tenga un pequeño desfase y no sea totalmente rígido.

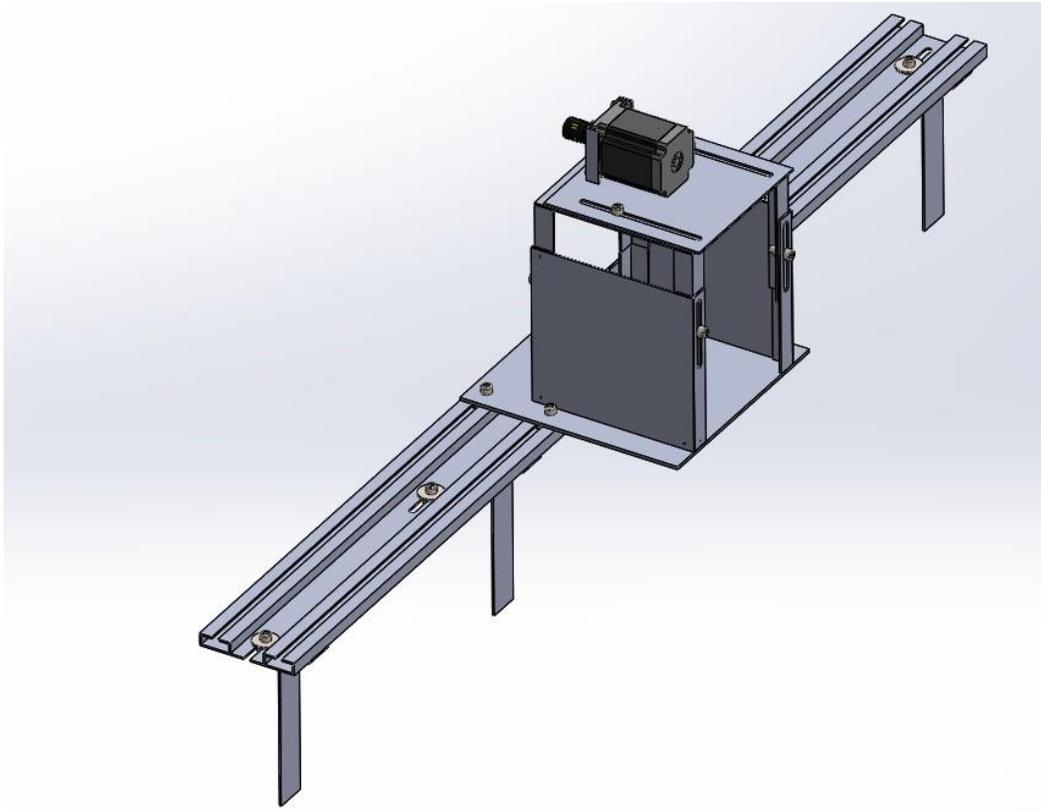


Figura 3 Vista isométrica del diseño mecánico.

FUENTE: Didácticas electrónicas.

1.5. Modelo matemático turbina Kaplan

La turbina Kaplan es de reacción pura, radial-axial, y normalmente de eje vertical. Las características técnicas y de construcción son muy parecidas en ambos tipos (Francis y Kaplan). Se utiliza en saltos de pequeña altura de agua (hasta 50m) y con caudales que suelen superar los 15 metros cúbicos por segundo. Para mucho caudal de agua a poca altura esta turbina es la mejor opción. Pueden variar el ángulo de sus palas durante su funcionamiento.

El sistema se forma por una turbina Kaplan la cual comprende alabes directrices y alabes del rodete, los cuales tienen la capacidad de moverse a unos ángulos determinados para generar electricidad, dependiendo de los ángulos de los alabes se tiene una descarga y una eficiencia determinada, al girar la turbina esta produce una velocidad la cual hace girar el rotor para poder generar corriente. Por eso se

describe como entradas los dos ángulos de los alabes y como salidas la velocidad de la turbina y el voltaje generado. [6]

La turbina Kaplan que se encuentra ubicada en el laboratorio de planta piloto posee la siguiente composición:

- Cuerpo turbina en aluminio, diámetro 600 mm
- Rotor de bronce de alabes, 120 mm de paso variable, con volante de mando al exterior
- Distribuidor de 10 paletas de aluminio, 200 mm de paso variable con mando de apertura externo
- Velocidad máx. 2500 rpm
- Potencia mayor que 1000 W

1.5.1 Ecuaciones de la turbina

El modelo matemático de la turbina Kaplan se basa en una turbina de doble regulación, esto se debe a que posee dos conjuntos de alabes, alabes directrices y alabes del rodete, esto permite que al variar el ángulo de cualquier conjunto de alabes obtengamos una generación de energía diferente. Por lo cual debemos empezar definiendo que la eficiencia y descarga de la turbina se ejerzan por la ecuación 1 y 2 respectivamente.

$$nt = nt(yw, yr) \quad \text{Ecuación (2)}$$

$$de = de(yw, yr) \quad \text{Ecuación (3)}$$

Dónde: de = descarga [m³/s], nt = eficiencia [%], yw = Angulo de los alabes directrices [°], yr = Angulo de los alabes del rodete [°]

De esta forma obtenemos la descarga y eficiencia de la turbina las cuales se obtienen de forma experimental, luego utilizando la función `cftool` de MATLAB se realiza una interpolación con respecto al ángulo en que se encuentra los dos conjuntos de alabes como se muestra en la figura 4 y 5 respectivamente. De igual forma la ecuación 4 representa la gráfica de la descarga y la ecuación 5 la gráfica de la eficiencia.

$$des = 0.0277 - 0.04199 * \sin(0.05045 * \pi * yw.* yr) - 0.009667 * \exp(-(1.857 * yr).^2) \quad \text{Ecuación (4)}$$

$$nt = 0.6129 + 0.2726 * \sin(1.018 * \pi * yw.* yr) - 0.01963 * \exp(-(1.018 * yr).^2) \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde

$yw = \text{ángulo de los alabes directrices [p.u]}$

$yr = \text{ángulo de los alabes del rodete [p.u]}$

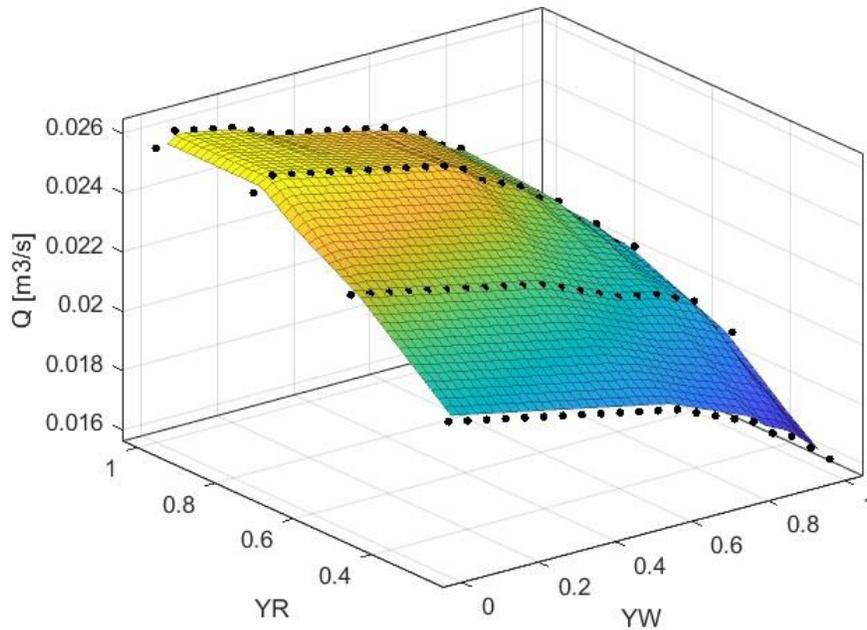


Figura 4 Gráfica descarga turbina Kaplan.

FUENTE: Autores.

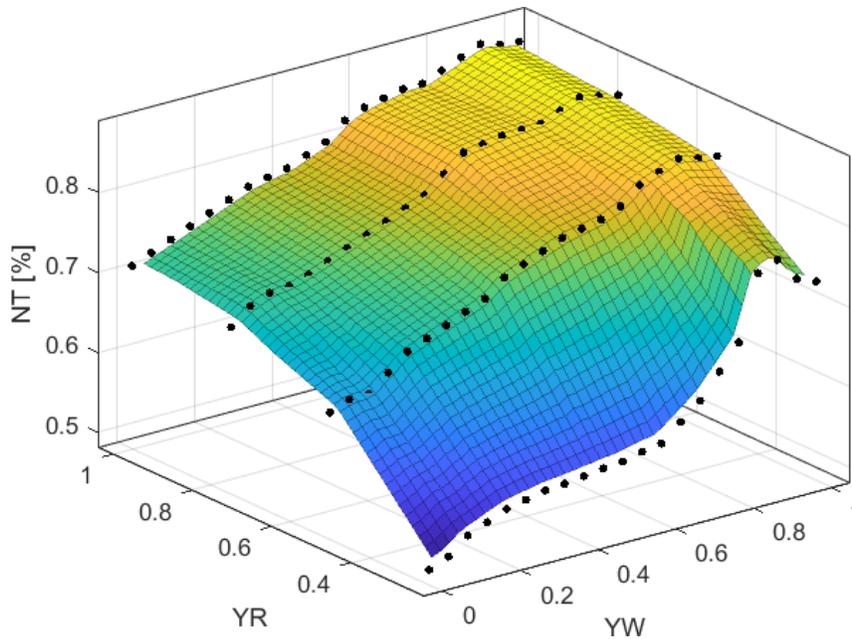


Figura 5 Grafica eficiencia turbina Kaplan.

FUENTE: Autores.

Las ecuaciones hidráulicas de la turbina son dadas de la siguiente forma

$$h = (Q/de)^2 * hc \quad \text{Ecuación (6)}$$

Dónde: h = altura [m], hc = altura de la cabeza de la turbina [m], Q = caudal [m³/s]

La variación del caudal a través del tiempo está dada por la ecuación 4.

$$\frac{dq}{dt} = (ho - h)/Tw \quad \text{Ecuación (7)}$$

Dónde: ho = altura inicial [m], Tw = tiempo inicial del agua [s]

El torque mecánico que genera la turbina está dado por la ecuación 5.

$$Tm = (h * nt * Q)/W \quad \text{Ecuación (8)}$$

Dónde: Tm = torque mecánico [Nm], W = velocidad de la turbina [rpm]

1.5.2 Ecuaciones del generador DC

El generador DC es una máquina que produce tensión, su funcionamiento se reduce siempre al principio de la bobina giratorio dentro de un campo magnético. Si una armadura gira entre dos polos magnéticos fijos, la corriente en la armadura circula en un sentido durante la mitad de cada revolución, y en el otro sentido durante la otra mitad. Para producir un flujo constante de corriente en un sentido, o corriente continua, en un aparato determinado, es necesario disponer de un medio para invertir el flujo de corriente fuera del generador una vez durante cada revolución. [7]

La ecuación 9 representa la velocidad de la turbina la cual corresponde a una sumatoria de torques en el eje.

Ecuación [9]

$$T_m - K * i - B_m * w = J_m * \frac{dw}{dt}$$

La ecuación 10 representa una sumatoria de voltajes en el estator.

Ecuación [10]

$$K * w - (R_a + R_c) * i = L * \frac{di}{dt}$$

La ecuación 11 representa el voltaje generado por la turbina

Ecuación [11]

$$V = R_c * i$$

Parámetro	Descripción	Unidad
K	Constante de fuerza	[rad/s]
B_m	Constante de fricción	[Kg/s]
J_m	Inercia del motor	[kg * m ²]
R_a	Resistencia de armadura	[Ω]

R_c	Resistencia de carga	$[\Omega]$
L	Inductancia	$[H]$

Tabla 1 Parámetros generador DC

FUENTE: Autores.

1.5.3 Validación modelo

Para validar el modelo se procedió a programar el modelo de la turbina y el generador en un Matlab función en simulink, comparando los datos teóricos vs experimentales, los alabes del rodete se dejaron el un valor constante debido a que solo se están manipulando los alabes directrices. Además, se estableció como puntos de operación o de equilibrio los que se observan en la tabla 2:

Parámetro	Valor	Unidad
V_{10}	90	$[V]$
Q_{10}	0.0241	$[m^3/s]$
W_{10}	58.6431	$[rad/s]$
I_{10}	4.8913	$[Amp]$
Y_R	1	$[P.u]$
Y_W	0.5	$[P.u]$

Tabla 2 Puntos de Equilibrio Turbina Kaplan

FUENTE: Autores.

Después de asignar los puntos de operación obtenemos las expresiones del punto de equilibrio.

$$I_{10} = \frac{K_v * W - I * (R_a + R_c)}{L}$$

$$h = \left(\frac{Q}{des}\right)^2 * hc$$

$$Q10 = \frac{ho - h}{Tw}$$

$$Th = \frac{h * nt * Q}{W}$$

$$W10 = \frac{Th - Kv * I - Bm * W}{Jm}$$

Con el procedimiento descrito, se obtiene los siguientes valores para los parámetros.

Parámetro	Descripción	Unidad
Tw	0.1	[s]
K	1.7182	[rad/s]
Tm	0.0227	[Nm]
Bm	0.1429	[Kg/s]
h	63	[m]
Jm	0.01	[kg * m ²]
Ra	2.2	[Ω]
Rc	18.4	[Ω]
L	1	[H]
hc	63	[m]
ho	100	[m]

Tabla 3 Valores de los parámetros de la turbina Kaplan

FUENTE: Autores.

Después obtenemos el modelo en espacio de estados como se muestra a continuación.

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{Ra + R}{L} & 0 & Kv/L & 1 \\ 0 & -\frac{2 * Q10 * hc}{Tw * des^2} & 0 & 1 \\ -\frac{Kv}{Jm} & \frac{3 * Q10^2 * hc * nt}{Jm * W10 * des^2} & -\frac{Bm + \frac{Q10^3 * hc * nt}{W10^2 * des^2}}{Jm} & 1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \frac{2 * Q10^2 * hc}{Tw * des^3} & 0 & 1 \\ -(2 * Q10^3 * hc * nt)/(Jm * W10 * des^3) & \frac{Q10^3 * hc}{Jm * W10 * des^2} & 1 \end{bmatrix}$$

$$C = [Rc \ 0 \ 0]$$

Luego reemplazamos los valores y nos queda el espacio de estados de la siguiente forma

$$A = \begin{bmatrix} 20.599999999967118 & 0 & 1.718206120875118 \\ 0 & -9.325767999550638e + 04 & 0 \\ -1.718206120881494e + 02 & 3.406133476413974e + 02 & -14.245894537258092 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1.242552732129809e + 03 & 0.0001e + 03 \\ 9.049077620559840 & 0.0001e + 03 \end{bmatrix}$$

$$C = [18.4 \ 0 \ 0]$$

$$D = [0]$$

En la figura 8 y 9 se observa la simulación del modelo de la turbina Kaplan en simulink.

Después de la simulación se obtuvieron los siguientes resultados. Donde se observa que el transitorio de la respuesta se cumple en lo teórico con lo experimental, la ganancia en estado estable hay una pequeña diferencia de 5 v

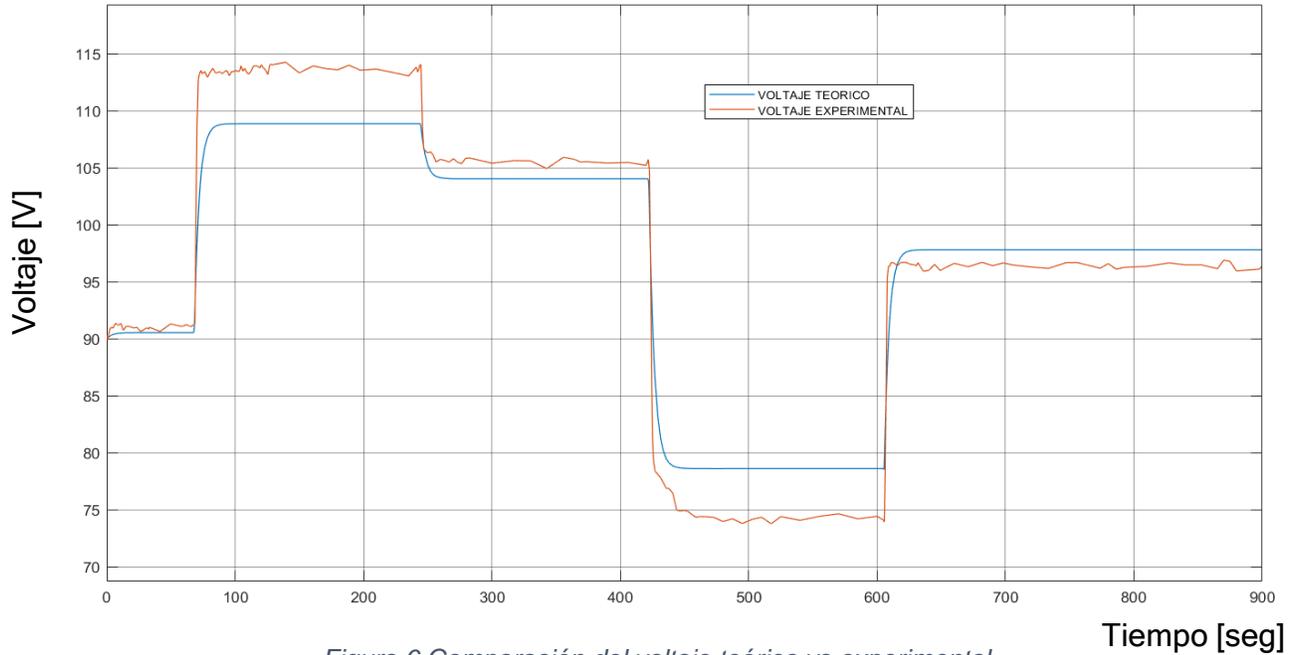


Figura 6 Comparación del voltaje teórico vs experimental.

FUENTE: Autores.

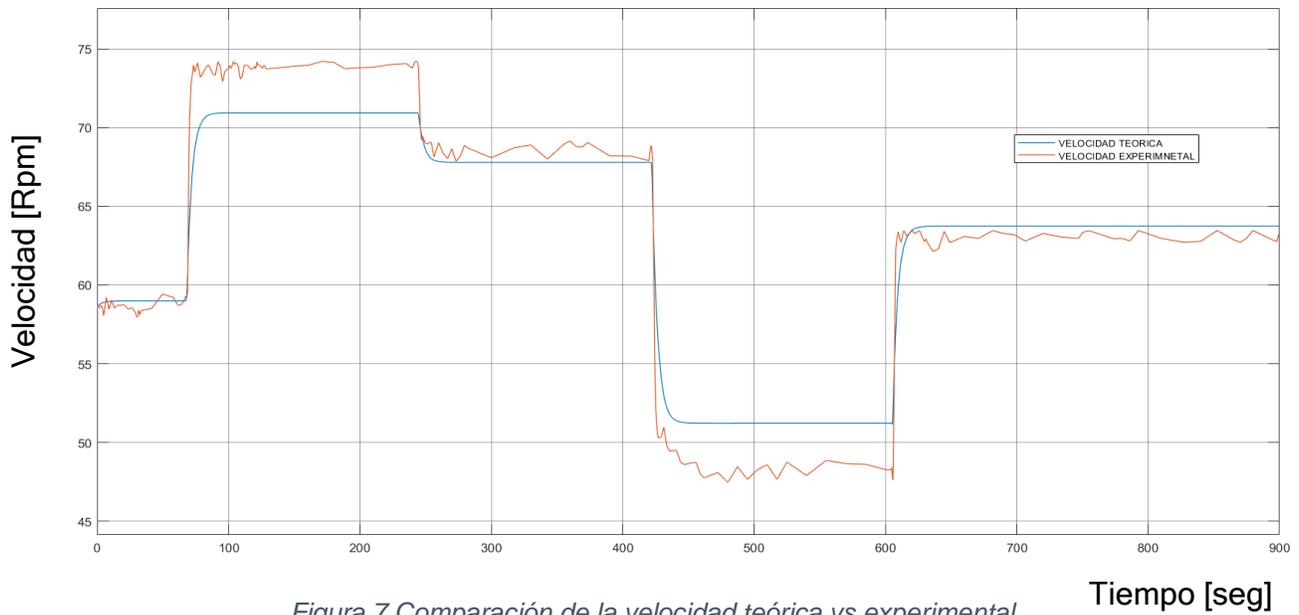


Figura 7 Comparación de la velocidad teórica vs experimental..

FUENTE: Autores.

1.6. Modelo matemático turbina Francis

La turbina Francis es de reacción, radial-axial, normalmente de eje vertical, aunque pueden ser de forma horizontal. Se utiliza en saltos de altura intermedia (hasta los 200m) y con caudales muy variados de agua, entre 2 y 200 metros cúbicos por segundo. El distribuidor está compuesto de aletas móviles para regular el caudal de agua que conduce al rodete. Para regular el caudal de agua que entra en el rodete se utilizan unas paletas directrices situadas en forma circular, y cuyo conjunto se denomina distribuidor. Se utiliza en sitios de muy diversas alturas de caída de agua y caudales. Esta turbina se puede utilizar en un gran rango de saltos y caudales de agua, es la más versátil. Algunas pueden variar el ángulo de sus palas durante su funcionamiento. [8]

La turbina Francis que se encuentra ubicada en el laboratorio de planta piloto posee la siguiente composición:

- Cuerpo turbina en aluminio, diámetro 600 mm
- Rotor de bronce de alabes, 140 mm de paso variable con junta de laberinto
- Distribuidor de 10 paletas de aluminio, 200 mm de paso variable con mando de apertura externo
- Caudal max $150 \text{ m}^3/\text{h}$
- Velocidad máx. 3500 rpm
- Potencia mayor que 1000 W

1.6.1 Ecuaciones de la turbina

El modelo matemático de la turbina Francis se basa en que solo dispone un conjunto de alabes, los cuales son los alabes directrices. De tal forma que la energía generada depende de la posición de estos alabes. El valor del tiempo de arranque del agua se obtiene en condiciones nominales utilizando la altura y caudal nominal como valores base. [9]

La variación del caudal con respecto al tiempo está dada por la ecuación 9.

$$\frac{dq}{dt} = (h_o - (Q/(K * g))^2) * G_a * A_{aaa}/l \quad \text{Ecuación (9)}$$

La ecuación 10 representa el torque que genera la turbina Francis

$$T_m = (e_{fi} * dens * G_a * Q * (Q/(K * g))^2)/W \quad \text{Ecuación (10)}$$

Dónde: g = posición del alabe directriz [P.u], h_o = altura inicial [m], Q = caudal [m³/s], K = constante proporcional, G_a = gravedad [m/s²], A_{aaa} = área transversal de la tubería [m], l = longitud de la tubería [m], e_{fi} = eficiencia de la turbina [%], $dens$ = densidad del agua [Kg/m³], W = velocidad de la turbina [rad/s]

En la figura 10 se observa la gráfica del caudal vs la apertura del alabe de la turbina Francis, según el ángulo obtiene un valor de caudal. Esta grafica esta descrita por la siguiente ecuación.

$$Q = -3.413 * (\sin(g - \pi)) + 0.2528 * ((g - 10)^2) + 18.77 \quad \text{Ecuación (11)}$$

Dónde: g = posición del alabe directriz [P.u], Q = caudal [m³/s]

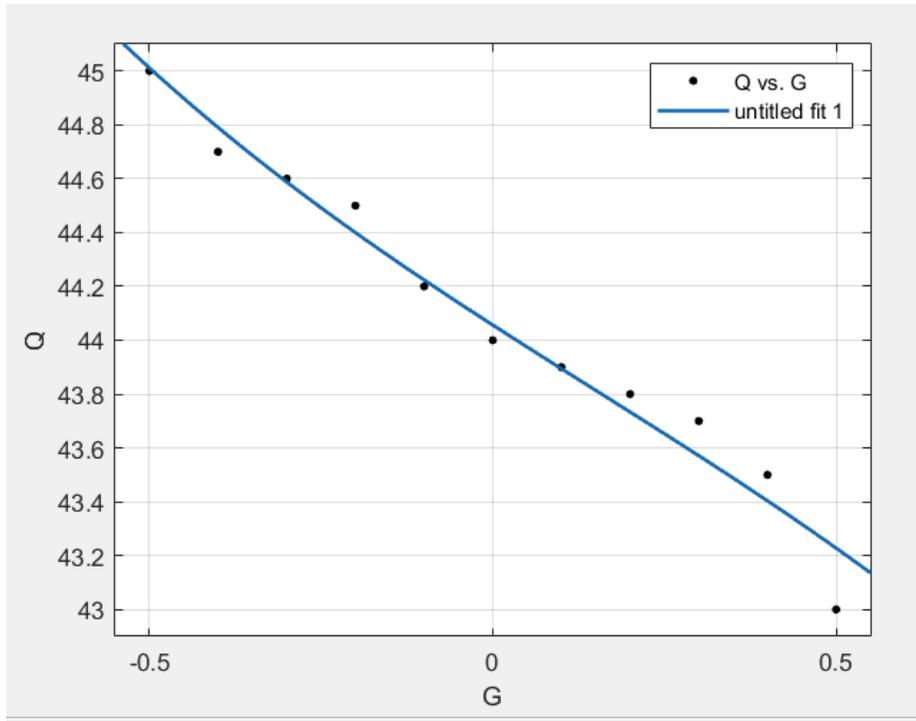


Figura 8 Grafica Q vs G (apertura del alabe turbina Francis).

FUENTE: Autores.

1.6.2 Ecuaciones del generador DC

Las ecuaciones del generador corresponden a las mismas de la sección 1.5.2

1.6.3 Validación modelo

Para validar el modelo se procedió a programar el modelo de la turbina y el generador en un Matlab función en simulink, comparando los datos teóricos vs experimentales. Además, se estableció como puntos de operación o de equilibrio:

Parámetro	Valor	Unidad
V10	71.1260	[V]
Q10	0.0114	[m ³ /s]
W10	44.8222	[rad/s]

I_{10}	3.8655	[Amp]
g	0.5	[P. u]

Tabla 4 Puntos de Equilibrio Turbina Francis

FUENTE: Autores.

Después de asignar los puntos de operación obtenemos las expresiones del punto de equilibrio.

$$I_{10} = \frac{K_v * W - I * (R_a + R_c)}{L} \quad \text{Ecuación (12)}$$

$$h = (h_o - f_p * Q^2 - \left(\frac{Q}{K * g}\right)^2) * G_a * \frac{A_{aaa}}{l} \quad \text{Ecuación (13)}$$

$$T_h = \frac{e_{fi} * \text{dens} * G_a * Q * \left(\frac{Q}{K * g}\right)^2}{w} \quad \text{Ecuación (14)}$$

$$W_{10} = \frac{T_h - K_v * I - B_m * W}{J_m} \quad \text{Ecuación (15)}$$

Para ajustar el modelo se utilizaron los siguientes valores para los diferentes parámetros.

Parámetro	Descripción	Unidad
K	0.0125	
K_v	1.7766	[rad/s]
T_m	0.0227	[Nm]
B_m	0	[Kg/s]
h_o	3.3012	[m]
J_m	0.8	[kg * m ²]
R_a	2.2	[Ω]
R_c	18.4	[Ω]
L	8.2400e - 04	[H]

l	15	[m]
$Aaaa$	0.2	[m]

Tabla 5 Valores de los parámetros de la turbina Francis

FUENTE: Autores.

Después de asignar los parámetros obtenemos el modelo en espacio de estados como se muestra a continuación.

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{Ra + Rc}{L} & 0 & \frac{Kv}{L} \\ 0 & -\frac{2 * Aaaa * Ga * Q}{K^2 * g^2 * l} & 0 \\ \frac{Kv}{Jm} & \frac{3 * Ga * Q^2 * dens * efi}{Jm * K^2 * W * g^2} & -\frac{Bm + \frac{Ga * Q^3 * dens * efi}{K^2 * W^2 * g^2}}{Jm} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2 * Aaaa * Ga * Q^2}{K^2 * g^3 * l} \\ -\frac{2 * Ga * Q^3 * dens * efi}{Jm * K^2 * W * g^3} \end{bmatrix}$$

$$C = [Rc \quad 0 \quad 0]$$

$$D = [0]$$

Luego reemplazamos los valores y nos queda el espacio de estados de la siguiente forma

$$A = \begin{bmatrix} -2.500000000005468e + 04 & 0 & 2.156042541584819e + 03 \\ 0 & -76.049434830721400 & 0 \\ -2.220723817823107 & 2.267818704501707e + 03 & -0.191519000992714 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1.7272 \\ -34.3372 \end{bmatrix}$$

$$C = [18.4 \quad 0 \quad 0]$$

$$D = [0]$$

La respuesta a la entrada escalón, dado el modelo lineal como se observa en la figura 11 presenta un $t_s = 10.3$ seg y $t_r = 6$ seg

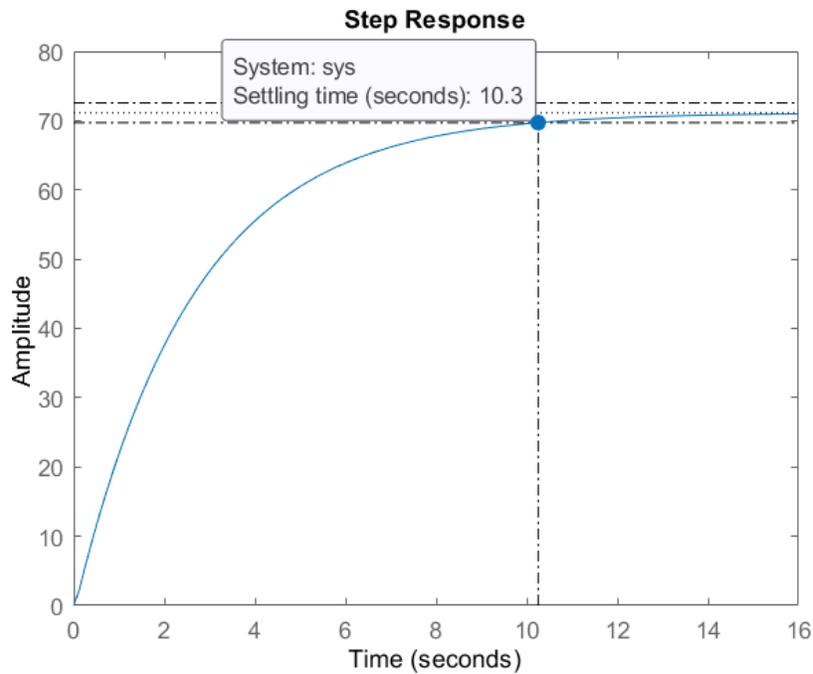


Figura 9 Respuesta ante una entrada escalón de la turbina Francis.

FUENTE: Autores.

También obtenemos el bode como se muestra en la figura 12 el cual tiene una frecuencia de 0.00126 Hz en estado estable.

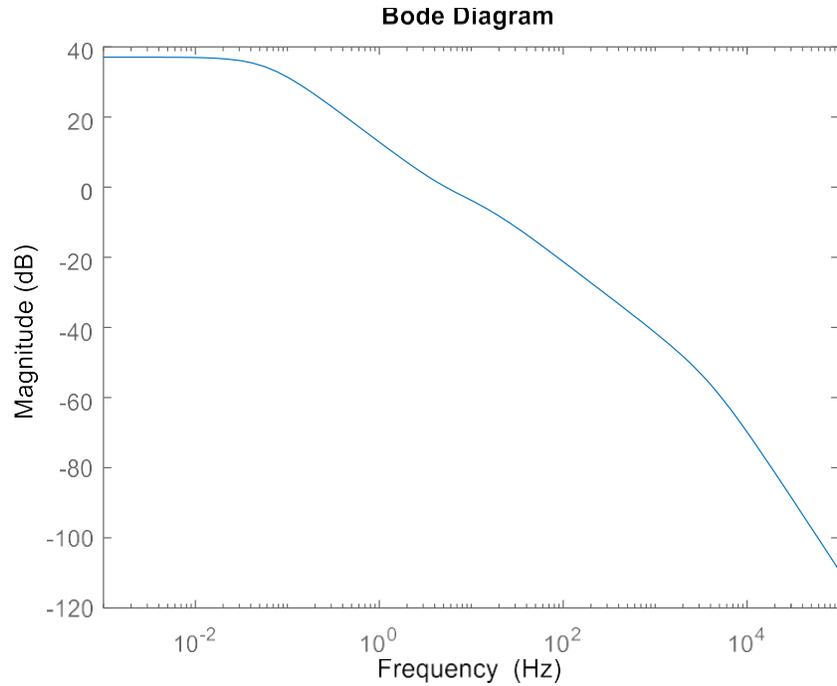


Figura 10 Diagrama de bode de la turbina Francis.

FUENTE: Autores.

Después de la simulación se obtuvieron los siguientes resultados. Donde se observa que el transitorio de la respuesta se cumple en lo teórico con lo experimental, la ganancia en estado estable hay una pequeña diferencia de 8 v.

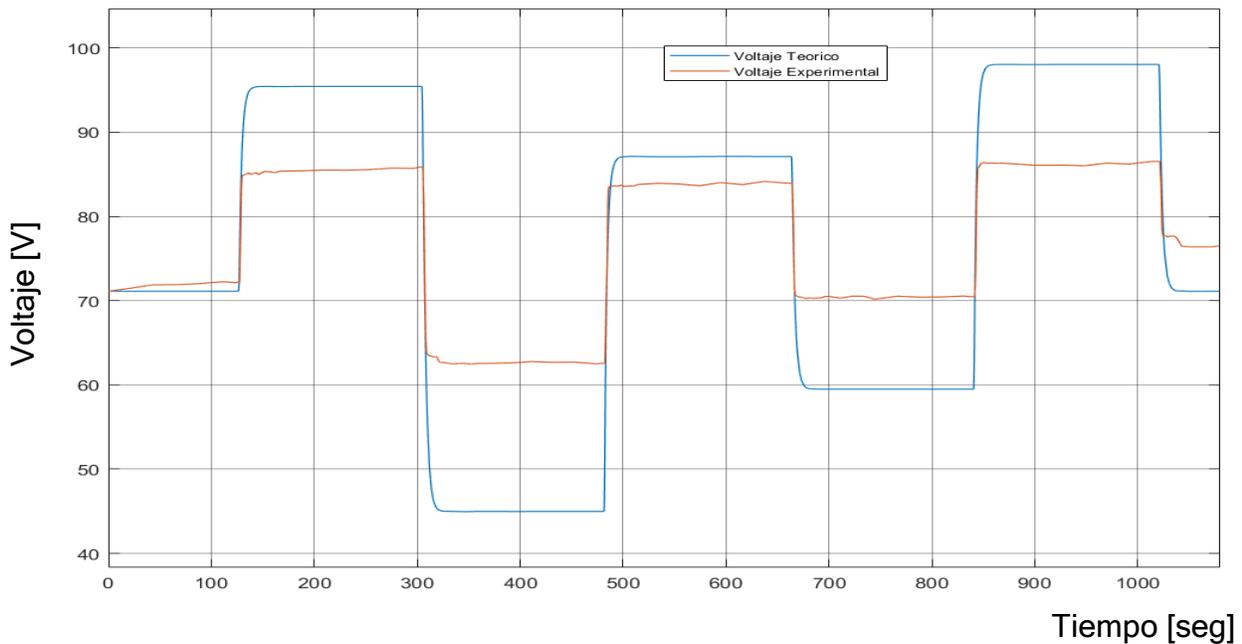


Figura 11 Comparación del voltaje teórico vs experimental.

FUENTE: Autores.

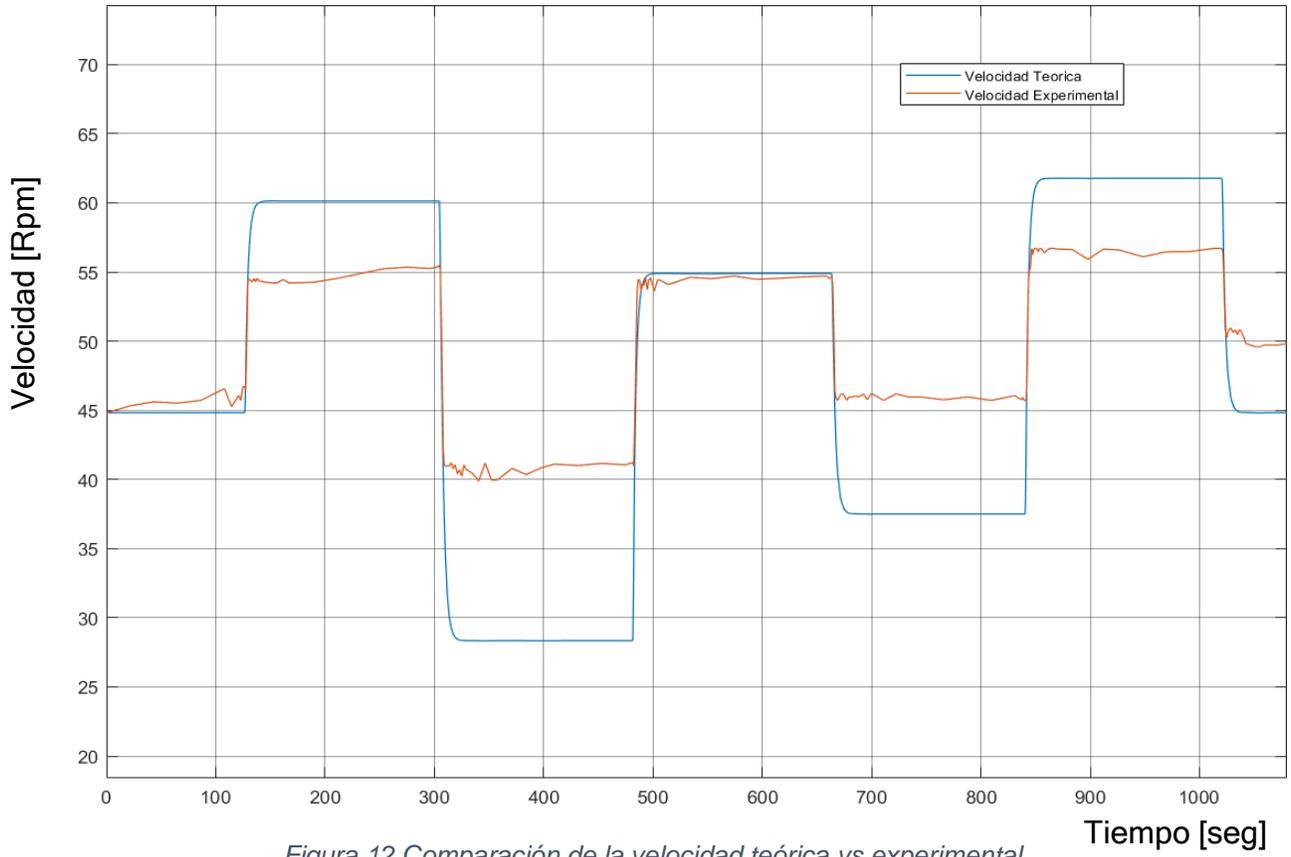


Figura 12 Comparación de la velocidad teórica vs experimental..

FUENTE: Autores.

CAPITULO 2: SISTEMA DE CONTROL

La turbina hidráulica es el elemento con mayor importancia para la generación de la energía eléctrica en centrales hidroeléctricas. Para que la energía eléctrica generada en dichas centrales sea prácticamente constante, se hace necesario tener un sistema de regulación de voltaje del generador con el fin de mantener el valor en voltios lo más cercano posible a la referencia.

2.1. Control técnica sensibilidad mixta

En esta subsección se presenta la sensibilidad mixta, para sintetizar un controlador robusto gracias a sencillos métodos de selección de las funciones de ponderación. Previamente es necesario definir las funciones de sensibilidad $S(z)$ y de sensibilidad complementaria $T(z)$. Para ello considérese el siguiente diagrama de bloques de control clásico por realimentación [10]:

Donde $K(z)$, $G(z)$ y $Gd(z)$ son respectivamente el controlador, el modelo de la planta y el modelo de las perturbaciones.

La entrada del controlador $K(z)$ es $r - y_m$ donde $y_m = y + n$ es la salida medida y n es el ruido de medida. Luego, la entrada a la planta es:

$$u = K(z) (r - y - n) \text{ Ecuación (16)}$$

El objetivo de control es manipular u (en el diseño de $K(z)$) tal que el error de control e permanezca pequeño a pesar de las perturbaciones d . El error de control e es definido como:

$$e = r - y \text{ Ecuación (17)}$$

Donde r corresponde al valor de referencia del sistema. El modelo de la planta es descrito como:

$$y = G(z)u + Gd(z)d \text{ Ecuación (18)}$$

Para un sistema con un controlador representado por la ecuación 14, se tienen un modelo de la planta, de la forma:

$$y = G(z)K(z)(r - y - n) + Gd(z)d \text{ Ecuación (19)}$$

Agrupando términos en la ecuación 17, se tiene:

$$(I + G(z)K(z))y = G(z)K(z)r + Gd(z)d - G(z)K(z)n \text{ (3.5) Ecuación (20)}$$

Finalmente, la respuesta en lazo cerrado es:

$$y = (I + G(z)K(z))^{-1} [G(z)K(z)r + Gd(z)d - G(z)K(z)n] \text{ Ecuación (21)}$$

Similar análisis es efectuado con el error de control e y la señal de entrada a la planta u , quedando las relaciones en lazo cerrado, entre la salida, y , el error, e , y la acción de control, u , respecto a la referencia, r , las perturbaciones, d , y el ruido, n , son:

$$y = T(z)r + S(z)Gd(z)d - T(z)n$$

$$e = r - y = S(z)r - S(z)Gd(z)d + T(z)n$$

$$u = K(r - y) = K(z)S(z)r - K(z)S(z)Gd(z)d - K(z)S(z)n \text{ Ecuación (22)}$$

A partir de las anteriores ecuaciones definidas en este capítulo, se definen los siguientes conceptos: Para la función de sensibilidad, se tiene:

$$S(z) = (I + L(z))^{-1} \text{ Ecuación (23)}$$

La función de sensibilidad complementaria se define:

$$T(z) = L(z)(I + L(z))^{-1} \text{ Ecuación (24)}$$

Se tiene la función de sensibilidad al control:

$$K(z)S(z) = K(z)(I + L(z))^{-1} \text{ Ecuación (25)}$$

Por último, se define la función en lazo abierto como:

$$L(z) = G(z)K(z) \text{ Ecuación (26)}$$

Nótese que tanto $S(z)$, como $T(z)$ y $K(z)S(z)$ son funciones de transferencia en lazo cerrado. Más específicamente, $S(z)$ es la función de transferencia que relaciona la perturbación con la salida del sistema, mientras que $T(z)$ relaciona la señal de referencia con la salida del sistema. Cabe aclarar que la función de sensibilidad complementaria para $T(z)$ viene de la siguiente expresión:

$$S(z) + T(z) = I \text{ Ecuación (27)}$$

Por lo tanto, un decremento de $S(z)$ es directamente proporcional al incremento de $T(z)$, y viceversa. Si el objetivo principal es diseñar un controlador que minimice $S(z)$, lo cual implica a establecer una condición de seguimiento, se conseguirá a cambio de un incremento de $T(z)$, o lo que es lo mismo a cambio de aumentar la señal de control. Minimizar $S(z)$ se puede entender como minimizar la norma infinita de su respuesta frecuencial, que sería diseñar respecto la frecuencia en la cual hay un mayor error de seguimiento. Por otro lado, se debe tener en cuenta que el valor elevado de $T(z)$ puede ser causa de inestabilidad, debido al efecto en lazo cerrado de la incertidumbre.

El diagrama de bloques general para un controlador robusto, incluyendo las funciones de ponderación, es de la forma

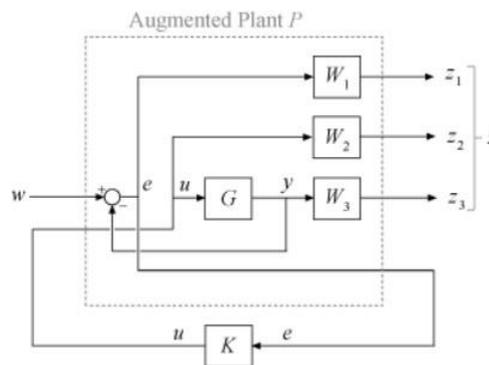


Figura 13 Esquema general de control robusto con sensibilidad mixta.

FUENTE: Autores.

Para la ganancia de bucle $L = GK$, para lograr un buen seguimiento de referencia y rechazo de perturbaciones, normalmente desea una ganancia de bucle alta a baja

frecuencia. Para lograr la robustez y la atenuación del ruido de medición, normalmente desea que L se reduzca a alta frecuencia. Esta forma de bucle es equivalente a una pequeña S a baja frecuencia y una pequeña T a alta frecuencia.

Para el modelado de bucle de sensibilidad mixta, elige funciones de ponderación para especificar esas formas objetivo para S y T, así como el esfuerzo de control KS. La restricción de diseño H_∞ [11].

$$M(s)_\infty = \begin{bmatrix} W_1 S \\ W_1 K S \\ W_1 T \end{bmatrix}_\infty \leq 1, \text{ Ecuación (28)}$$

significa que

$$S_\infty \leq |W_{1-1}|$$

$$KS_\infty \leq |W_{2-1}|$$

$$T_\infty \leq |W_{3-1}| \text{ Ecuación (29)}$$

Filtro pasa altas

Los filtros paso alto atenúan las señales situadas por debajo de una frecuencia de corte (banda de atenuación) y permite el paso de señales situadas por encima de la frecuencia de corte (banda de paso). La cantidad de atenuación depende del diseño del filtro.

Filtro pasa bajas

Los filtros paso bajo permiten el paso de señales por debajo de una frecuencia de corte (banda de paso) y atenúan señales por encima de la frecuencia de corte (banda de atenuación).

Por lo tanto, se establece las ponderaciones iguales a los recíprocos de las formas deseadas para S, KS, y T. En particular.

- Para un buen rendimiento de seguimiento de referencia y rechazo de perturbaciones, elija $W1$ grande dentro del ancho de banda de control para obtener S pequeño.
- Para obtener robustez y atenuación del ruido, elija $W3$ grande fuera del ancho de banda de control para obtener una T pequeña.
- Para limitar el esfuerzo de control en una banda de frecuencia particular, aumente la magnitud de $W2$ en esta banda de frecuencia para obtener un KS pequeño.

$$S_{\infty} \leq \gamma |W_{1-1}|$$

$$KS_{\infty} \leq \gamma |W_{2-1}|$$

$$T_{\infty} \leq \gamma |W_{3-1}| \quad \text{Ecuación (30)}$$

2.2. Diseño control sensibilidad mixta

2.2.1 Control sensibilidad mixta Turbina Kaplan

Para el diseño del control de sensibilidad mixta se parte del modelo en espacio de estados de la turbina. Luego disponemos a establecer las restricciones del error, la acción de control y la respuesta de transferencia

$$W1 = \frac{0.0004 s + 0.0004}{s + 0.001}$$

$$W2 = \frac{0.7 s + 4.62}{6.6 s + 66}$$

$$W3 = \frac{0.02 s + 0.132}{6.6 s + 66}$$

Con estas tres funciones procedemos a obtener el controlador de 6 estados, el cual reducimos a 5 a partir del diagrama de Hankel y discretizamos con un $T_m = 10$ ms para poder realizar la programación.

$$A_c = \begin{bmatrix} 1 & -3.202e-05 & -1.288e-05 & 1.315e-05 & 1.544e-06 \\ -3.202e-05 & 0.9888 & -0.01147 & 0.009474 & 0.001071 \\ 1.288e-05 & 0.01147 & 0.9911 & 0.01607 & 0.002223 \\ -1.315e-05 & -0.009474 & 0.01607 & 0.9303 & -0.02033 \\ 1.544e-06 & 0.001071 & -0.002223 & 0.02033 & 0.9925 \end{bmatrix}$$

$$B_c = \begin{bmatrix} 0.00199 \\ 0.003171 \\ -0.001272 \\ 0.0013 \\ -0.0001526 \end{bmatrix}$$

$$C_c = [0.1991 \quad 0.3175 \quad 0.1307 \quad -0.1372 \quad -0.01707]$$

$$D_c = [0]$$

De tal forma obtenemos los siguientes resultados de la acción de control y la respuesta transitoria que se muestran a continuación en los cuales tenemos un $t_s = 5.56$. y un sobrepaso del 3%

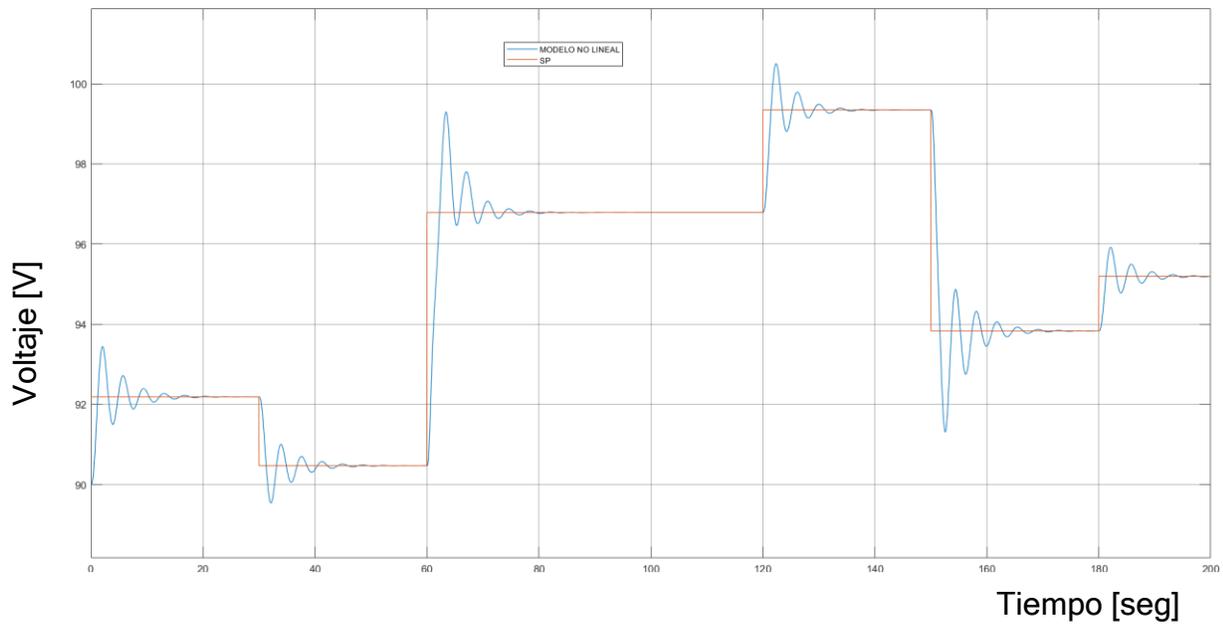


Figura 14 Respuesta transitoria del controlador sensibilidad mixta turbina Kaplan.

FUENTE: Autores.

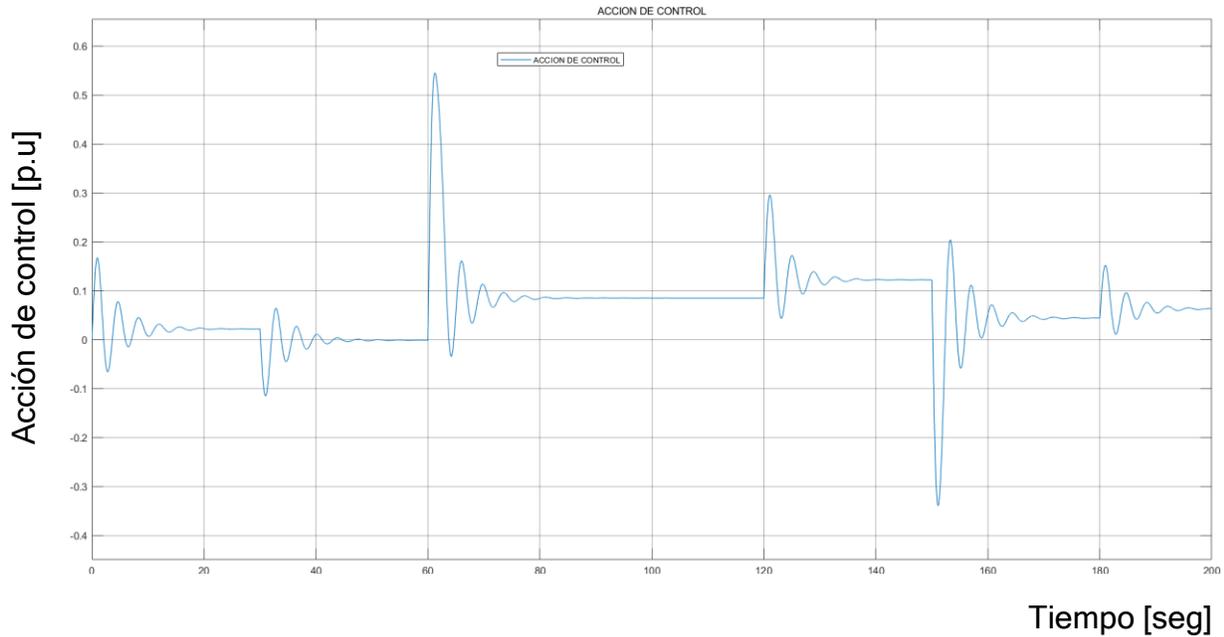


Figura 15 Acción de control del controlador sensibilidad mixta turbina Kaplan.

FUENTE: Autores.

2.2.2 Control sensibilidad mixta Turbina Francis

Para el diseño del control de sensibilidad mixta se parte del modelo en espacio de estados de la turbina. Luego disponemos a establecer las restricciones del error, la acción de control y la respuesta de transferencia

$$W1 = \frac{0.0006 s + 0.0006}{s + 0.001}$$

$$W2 = \frac{0.43 s + 2.838}{6.6 s + 66}$$

$$W3 = \frac{0.23 s + 1.518}{6.6 s + 66}$$

Con estas tres funciones procedemos a obtener el controlador de 6 estados, el cual reducimos a 4 y discretizamos para poder realizar la programación.

$$A_c = \begin{bmatrix} 1 & -9.164e-05 & -1.839e-05 & 7.26e-06 \\ -9.16e-05 & 0.9094 & -0.03704 & 0.01534 \\ -1.836e-05 & -0.03704 & 0.8588 & 0.1197 \\ 7.181e-06 & 0.01534 & 0.1197 & 0.4849 \end{bmatrix}$$

$$B_c = \begin{bmatrix} 0.0005137 \\ 0.002335 \\ 0.0004672 \\ -0.0001844 \end{bmatrix}$$

$$C_c = [0.05144 \quad 0.2464 \quad 0.05833 \quad -0.03498]$$

$$D_c = [0]$$

De tal forma obtenemos los siguientes resultados de la acción de control y la respuesta transitoria que se muestran a continuación en los cuales tenemos un $t_s = 20.4$

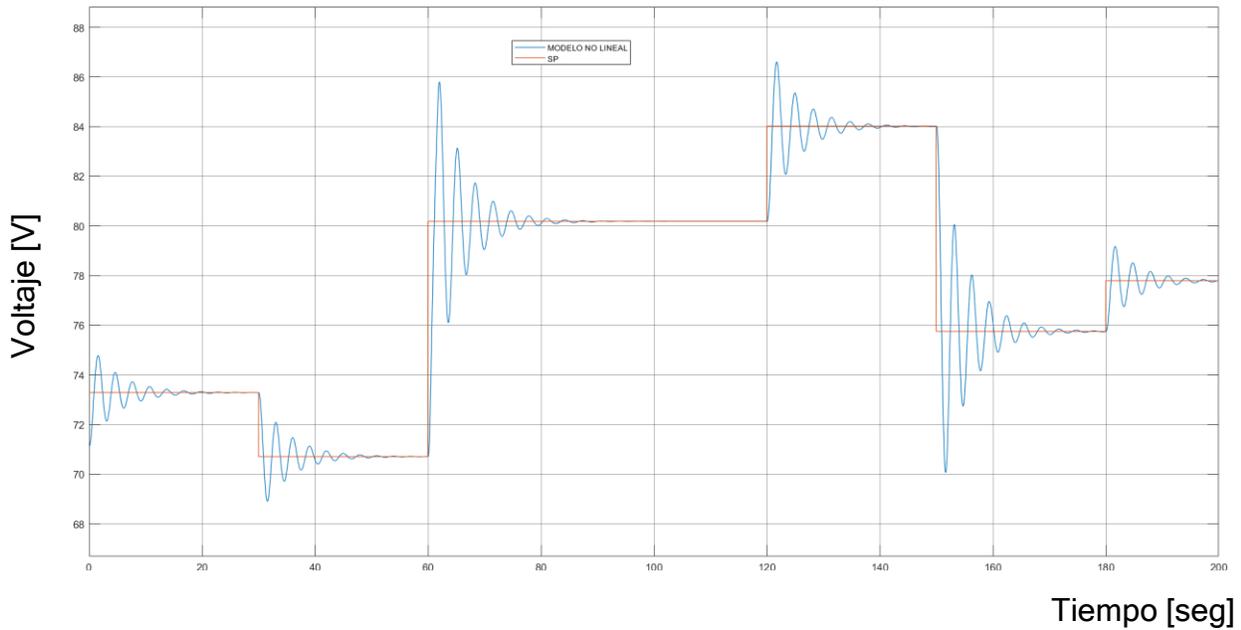


Figura 16 Respuesta transitoria del controlador sensibilidad mixta turbina Francis.

FUENTE: Autores.

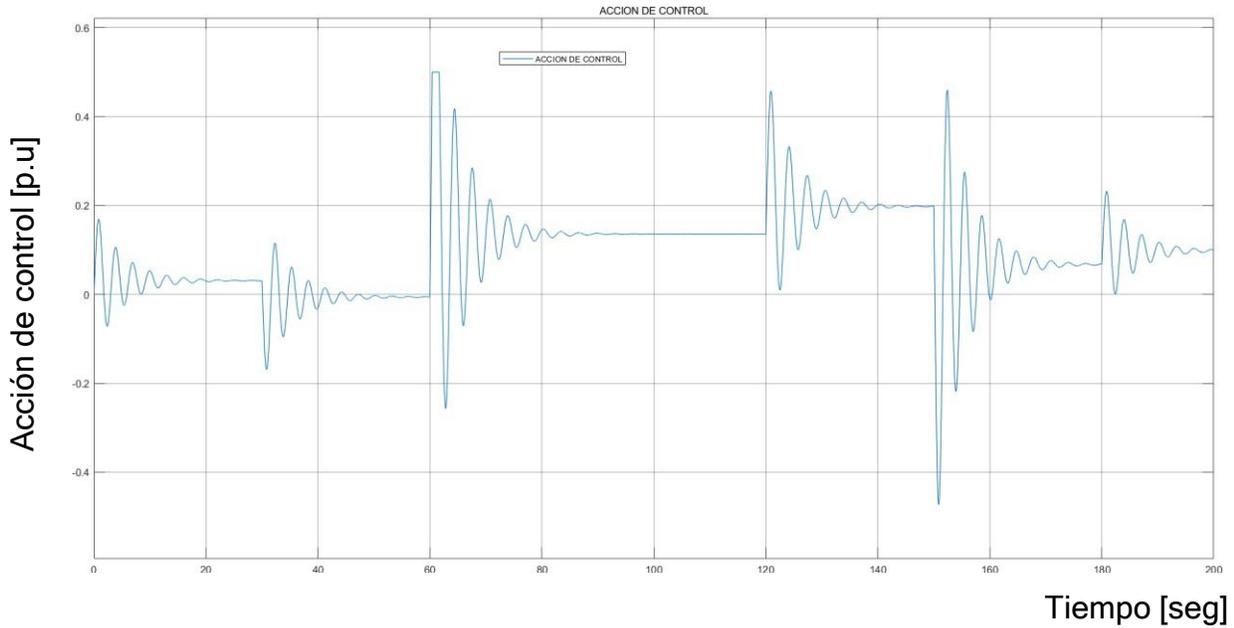


Figura 17 Acción de control del controlador sensibilidad mixta turbina Francis.

FUENTE: Autores.

2.3. Control Predictivo MPC

Una de las propiedades del controlador MPC es su formulación abierta, que permite la incorporación de distintos tipos de modelos de predicción, sean lineales o no lineales, monovariantes o multivariantes, y la consideración de restricciones sobre las señales del sistema. Entre las ventajas se puede destacar [12]:

- Formulación en el dominio del tiempo, flexible, abierta e intuitiva.
- La ley de control responde a criterios óptimos.
- Permite la incorporación de restricciones en la síntesis del controlador.

Partiendo de un modelo de una planta en espacio de estados en tiempo discreto, dado, se puede establecer un nuevo modelo en espacio de estados, definiendo

Ecuación [31]

$$\Delta x_m(k) = x_m(k) - x_m(k - 1) \text{ y } \Delta u(k) = u(k) - u(k - 1)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_L & 0 \\ C_L G_L & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_L \\ C_L H_L \end{bmatrix} \Delta u(k)$$

$$y(k) = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{bmatrix}$$

Basado en el modelo de espacio de estados, las variables de estado futuras son calculadas secuencialmente a través de

Ecuación [32]

$$x(k_i + N_p | k_i) = A^{N_p} x(k_i) + A^{N_p-1} B \Delta u(k_i) + A^{N_p-2} B \Delta u(k_i + 1) + \dots + A^{N_p-N_c} B \Delta u(k_i + N_c - 1)$$

Donde, se define como

Ecuación [33]

$$A = \begin{bmatrix} G_L & 0 \\ C_L G_L & 1 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} H_L \\ C_L H_L \end{bmatrix} \quad C = [0 \quad 1]$$

N_c y N_p son los horizontes de control y predicción, respectivamente. A partir de las variables de estado se calcula las variables de salida

Ecuación [34]

$$y(k_i + N_p | k_i) = C A^{N_p} x(k_i) + C A^{N_p-1} B \Delta u(k_i) + C A^{N_p-2} B \Delta u(k_i + 1) + \dots + C A^{N_p-N_c} B \Delta u(k_i + N_c - 1)$$

La trayectoria de control Δu se representa como la respuesta al impulso de un sistema estable dado por

Ecuación [35]

$$\Delta u(k) = L(k) \eta$$

donde $L(k)$ es una matriz constante que representa las funciones de Laguerre y η es un vector con los coeficientes de Laguerre. La matriz $L(k)$ contiene N funciones de Laguerre expresados en forma de vectores, como

Ecuación [36]

$$L(k) = [l_1(k) l_2(k) \dots l_N(k)]$$

La construcción de la matriz $L(k)$ se basa en la siguiente ecuación de diferencias

Ecuación [37]

$$L(k + 1) = A_l L(k)$$

donde la matriz $A_l(N \times N)$ es función de los parámetros α y $\beta = (1 - \alpha)^2$. La condición inicial para la construcción de la matriz $L(k)$ es dada por

Ecuación [38]

$$L(0)^T = \sqrt{\beta} [1 - \alpha \alpha^2 - \alpha^3 \dots (-\alpha)^{N-1}]$$

A continuación se observa un ejemplo de las matrices A_l y $L(0)^T$ para $N = 5$. Para la construcción de la matriz $L(k)$ se debe definir el número N de funciones de Laguerre por utilizar y el parámetro α (también llamado factor de escalamiento), el cual su valor debe estar entre $0 \leq \alpha < 1$. Una vez construida la matriz $L(k)$, esta será constante para el resto del programa.

$$A_l = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \beta & \alpha & 0 & 0 & 0 \\ -\alpha\beta & \beta & \alpha & 0 & 0 \\ \alpha^2\beta & -\alpha\beta & \beta & \alpha & 0 \\ -\alpha^3\beta & \alpha^2\beta & -\alpha\beta & \beta & \alpha \end{bmatrix} \quad L(0) = \sqrt{\beta} \begin{bmatrix} 1 \\ -\alpha \\ \alpha^2 \\ -\alpha^3 \\ \alpha^4 \end{bmatrix}$$

Para un sistema SISO, el objetivo del controlador DMPC es encontrar los coeficientes Laguerre η que minimicen la función costo

Ecuación [39]

$$J = \eta^T \Omega \eta + \eta^T \Psi x(k_i)$$

Donde

Ecuación [40]

$$\Phi = \sum_{i=0}^{N_p-1} A^{N_p-i-1} B L(i)^T$$

$$\Omega = \sum_{m=1}^{N_p} \phi(m) Q \phi(m)^T + R_L$$

$$\Psi = \sum_{m=1}^{N_p} \phi(m) Q A^m$$

$Q = C^T C$ y R_L es un escalar que penaliza la acción de control. Cuando el controlador no tiene restricciones y asumiendo que Ω^{-1} existe cuando $dj/dh = 0$, la solución óptima para η , se obtiene analíticamente como

Ecuación [41]

$$\eta = -\Omega^{-1}\Psi x(k_i)$$

En la práctica todos los procesos están sujetos a restricciones, por ejemplo, los actuadores tienen un campo limitado de acción, así como una determinada velocidad de cambio (slewrate), además el proceso presenta un rango de operación para cada una de las variables que intervienen, esto hace necesario la introducción de las restricciones en la función a minimizar.

2.4. Diseño Control Predictivo MPC

2.4.1 Control MPC Turbina Kaplan

Para el diseño del control MPC partimos del modelo en espacio de estados de la turbina.

Luego disponemos a discretizar el espacio de estados con un tiempo de establecimiento de 0.01

$$A_k = \begin{bmatrix} 0.800328073821793 & 6.073843473235697e - 05 & 0.016647071024067 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1.664707102412892 & 0.004155666716733 & 1.137937208261915 \end{bmatrix}$$

$$B_k = \begin{bmatrix} 3.802480658892585e - 04 \\ -0.013323864931979 \\ 0.048307964323168 \end{bmatrix}$$

$$C_k = [18.4 \quad 0 \quad 0]$$

$$D_k = [0]$$

Después declaramos las constantes de diseño y las constantes de Laguerre

$N_p = 300$ horizonte de predicción

$a = 0.9$ Polo

$N = 2$ Número de elementos

Luego de declarar las constantes obtenemos $L0$ y las constantes de reducción

$$L0 = \begin{bmatrix} 0.4359 \\ -0.3923 \end{bmatrix}$$

$$Mact = [0.0030 \quad -0.0027]$$

$$E = [14.7260 \quad 0.0011 \quad 0.3063 \quad 1]$$

Después procedemos a obtener el diseño de las constantes omega y phi para lo cual penalizamos la entrada.

$$R = 100000$$

$$Omegainv = \begin{bmatrix} 4.272938557713169e - 06 & -4.532573066485909e - 06 \\ -4.532573066485909e - 06 & 5.087258126904679e - 06 \end{bmatrix}$$

$$Psi = Psi11 = -177913202.8123708$$

$$Psi12 = 80651.22157014450$$

$$Psi13 = 22081865.8970887$$

$$Psi14 = 30313.37198684338;$$

$$Psi21 = -162233317.6327790;$$

$$Psi22 = 73432.30472739050;$$

$$Psi23 = 20105361.21070284;$$

$$Psi24 = 26712.60293734847;$$

Después procedemos a declarar Qn y Rn del observador para obtener la matriz Lk

$$Qn = 75$$

$$Rn = 50000$$

$$Lk = \begin{bmatrix} 3.296040610550276e - 04 \\ -2.975206661791121e - 22 \\ 0.004002919656072 \end{bmatrix}$$

Después de tener declaradas todas las matrices procedemos a programarlas y obtenemos los siguientes resultados de la acción de control y la respuesta transitoria que se muestran a continuación.

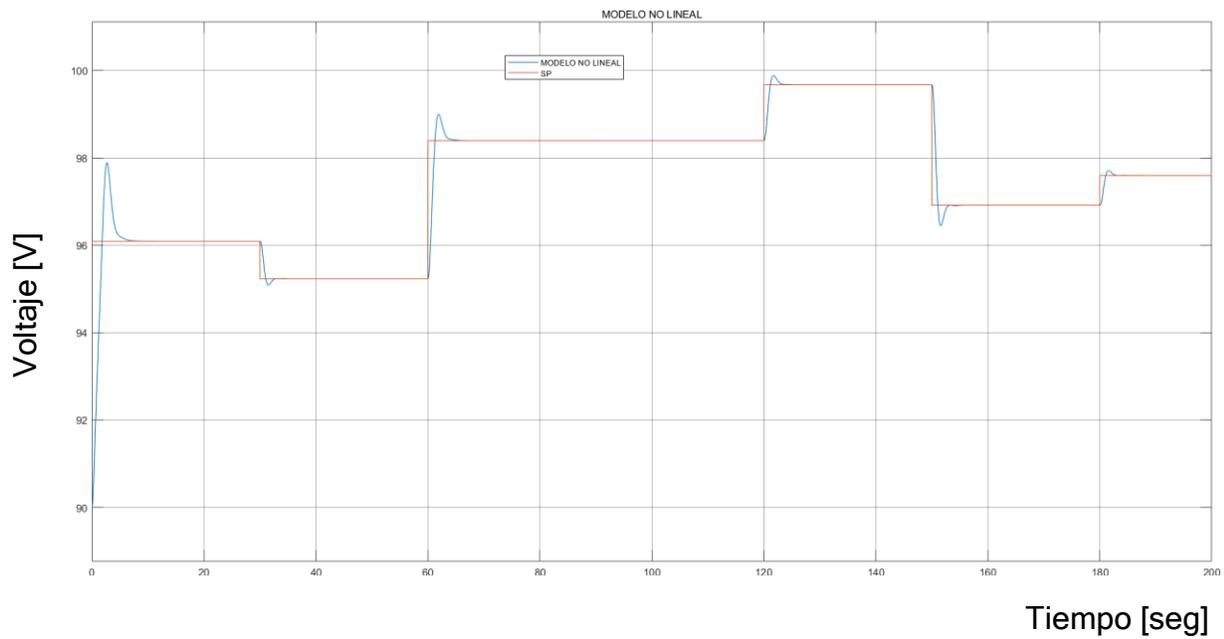


Figura 18 Respuesta transitoria del controlador MPC Kaplan.

FUENTE: Autores.

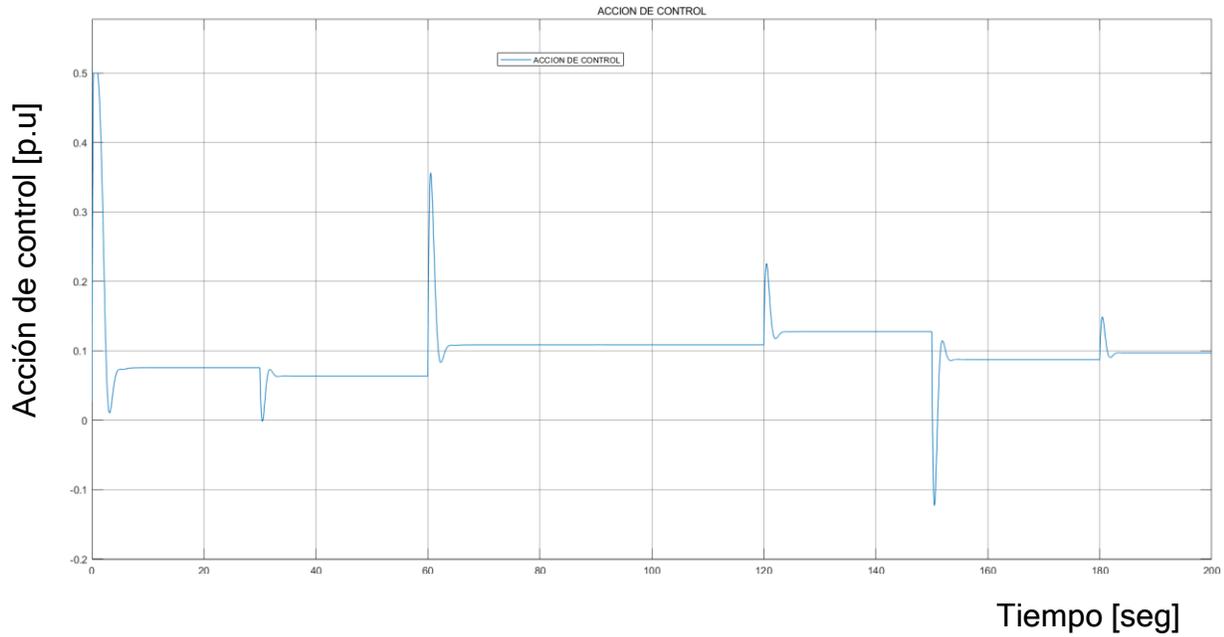


Figura 19 Acción de control del controlador MPC Kaplan.

FUENTE: Autores.

2.4.2 Control MPC Turbina Francis

Para el diseño del control MPC partimos del modelo en espacio de estados de la turbina. Luego disponemos a discretizar el espacio de estados con un tiempo de establecimiento de 0.01

A_f

$$= \begin{bmatrix} -7.631764645292386e - 06 & 1.363041005970612 & 0.0859139670242633 \\ 0 & 0.467435294038179 & 0 \\ -8.849138603462248e - 05 & 15.847184502892656 & 0.996184549060953 \end{bmatrix}$$

$$B_f = \begin{bmatrix} 0.016237574081667 \\ 0.012095411939801 \\ 0.188556180317038 \end{bmatrix}$$

$$C_f = [18.4 \quad 0 \quad 0]$$

$$D_f = [0]$$

Después declaramos las constantes de diseño y las constantes de Laguerre

$Np = 350$ horizonte de predicción

$a = 0.85$ Polo

$N = 2$ Número de elementos

Luego de declarar las constantes obtenemos $L0$ y las constantes de reducción

$$L0 = \begin{bmatrix} 0.5268 \\ -0.4478 \end{bmatrix}$$

$$Mact = [-0.1574 \quad 0.1338]$$

E

$$= [-1.404244694733799e - 04 \quad 25.079954509859267 \quad 1.580816993246446 \quad 1]$$

Después procedemos a obtener el diseño de las constantes omega y phi para lo cual penalizamos la entrada.

$$R = 50000$$

$$Omegainv = \begin{bmatrix} 8.939985588829800e - 06 & -9.210746761509470e - 06 \\ -9.210746761509470e - 06 & 9.701943771703472e - 06 \end{bmatrix}$$

$$Psi = Psi11 = -941.8669663754642;$$

$$Psi12 = 315861593.7151539;$$

$$Psi13 = 10602990.42900117;$$

$$Psi14 = 45940.79460900331;$$

$$Psi21 = -878.5074283735478;$$

$$Psi22 = 294660495.9227455;$$

$$Psi23 = 9889725.606044782;$$

$$Psi24 = 41729.03740897995;$$

Después procedemos a declarar Qn y Rn del observador para obtener la matriz Lk

$$Qn = 2000$$

$$Rn = 75000$$

$$0.002240486773741$$

$$Lk = [-3.058423384185738e - 05]$$

$$0.025975976858723$$

Después de tener declaradas todas las matrices procedemos a programarlas y obtenemos los siguientes resultados de la acción de control y la respuesta transitoria que se muestran a continuación.

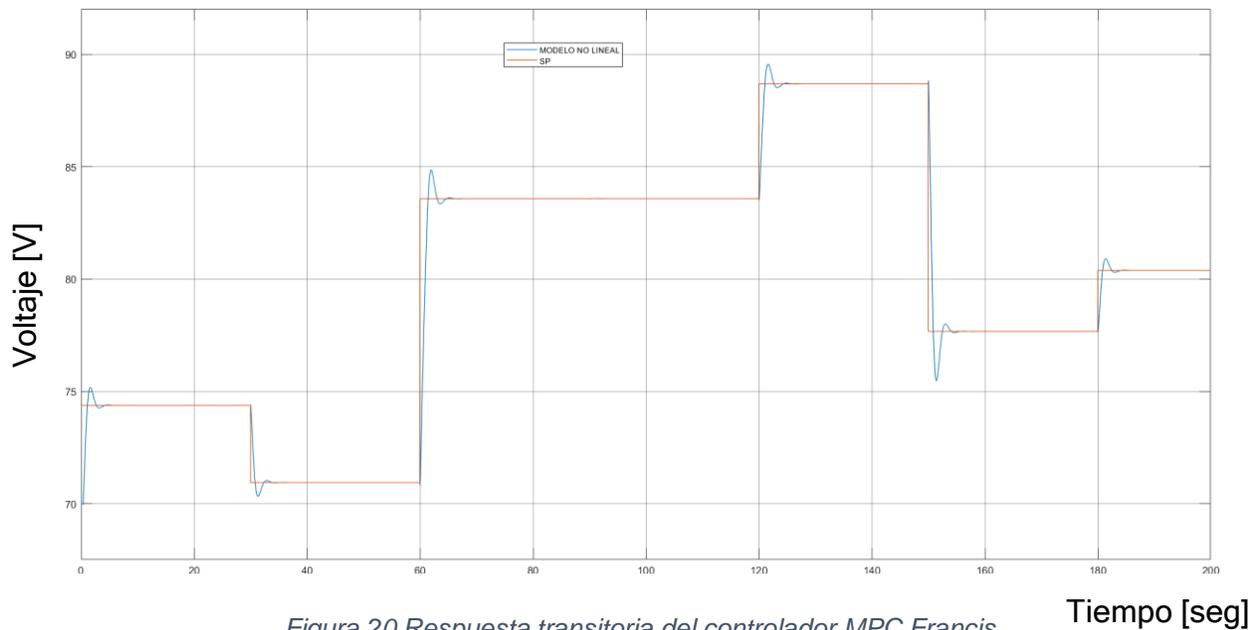


Figura 20 Respuesta transitoria del controlador MPC Francis.

FUENTE: Autores.

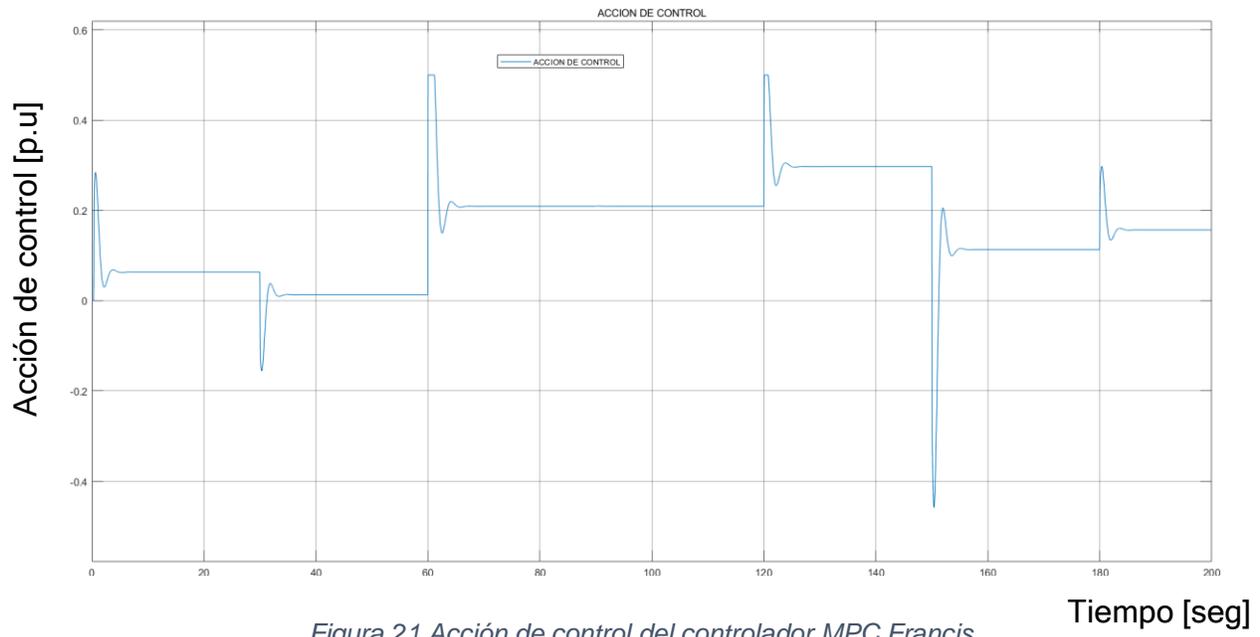


Figura 21 Acción de control del controlador MPC Francis.

FUENTE: Autores.

CAPITULO 3: VALIDACION EXPERIMENTAL

El sistema de control distribuido (DCS) DeltaV es un sistema de automatización fácil de usar que simplifica la complejidad operativa y disminuye los riesgos del proyecto. La plataforma de programación es multiusuario de forma que varios programadores pueden trabajar simultáneamente sobre el sistema de forma segura sin conflictos de versiones. Todos los equipos del sistema (ordenadores, servidores, controladores) están sincronizados con un mismo reloj, de forma que todas las medidas, alarmas y eventos tienen una misma marca de tiempo.

El software de control DCS dispone de herramientas para la gestión de la información de planta, integrándola verticalmente hacia la cadena de toma de decisiones y otros sistemas ubicados más arriba en la jerarquía de la producción. La integración embebida del sistema Delta V se extiende a aplicaciones de procesamiento de lotes, control avanzado, gestión de cambios, herramientas de ingeniería, diagnósticos y más.

Para llevar a cabo la automatización del proyecto se diseñó la HMI que se observa en la figura 25. La HMI está compuesta por un seleccionador de turbina donde la turbina Kaplan es el número 0 y la turbina Francis es el numero 1; también presenta el selector de controladores según se requieran se puede escoger el controlador para cualquiera de las dos turbinas donde 1 es el controlador robusto de sensibilidad mixta de la turbina Francis, 2 es el controlador robusto de sensibilidad mixta de la turbina Kaplan, 3 es el controlador MPC de la turbina Kaplan, 4 es el controlador MPC de la turbina Francis, 5 es el controlador PID de la turbina Kaplan y 6 es el controlador PID de la turbina Francis, también se pueden visualizar las diferentes variables de los 3 sensores que se le integraron al sistema. Por otro lado, se tiene una gráfica donde se evidencia la variable del proceso (voltaje generado) y el setpoint.

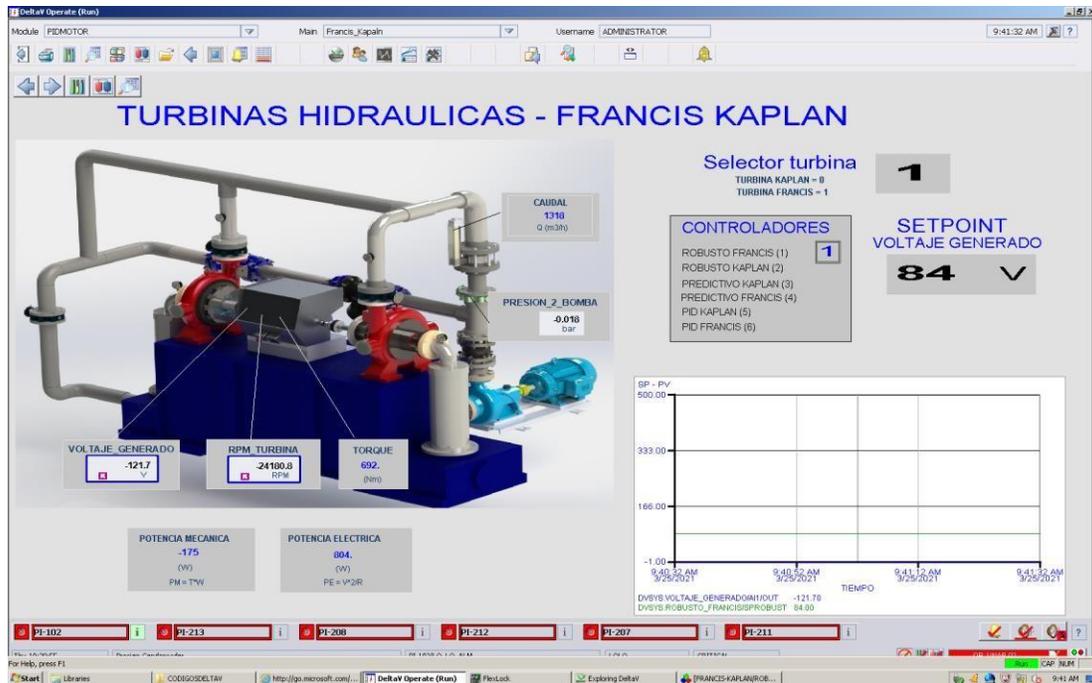


Figura 22 HMI.

FUENTE: Autores.

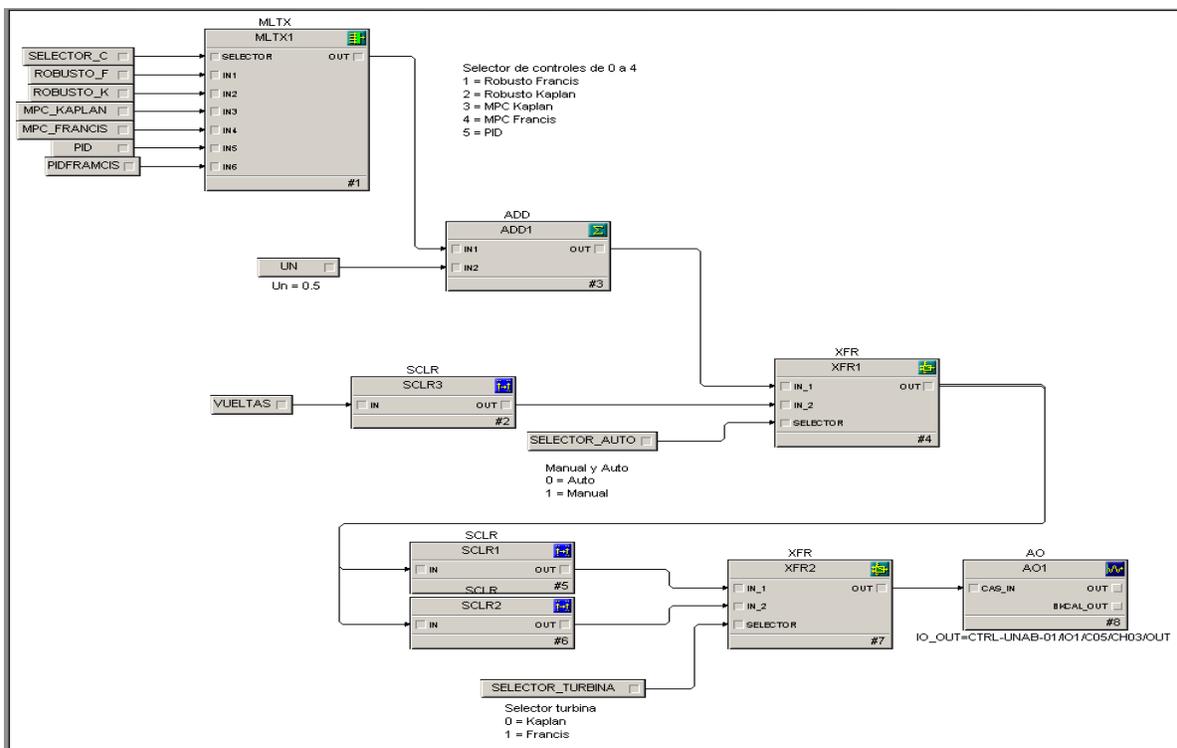


Figura 23 Programación selectores controladores.

FUENTE: Autores.

3.1. Implementación control sensibilidad mixta turbina Kaplan

La implementación de este controlador se lleva a cabo mediante una computadora, en la cual se programa el código del controlador, como entrada 1 tenemos el Setpoint, en la entrada 2 tenemos la retroalimentación la cual es el voltaje generado y en la salida 1 tenemos la acción de control que genera el controlador.

La siguiente grafica muestra la respuesta transitoria del controlador ante variaciones de Setpoint

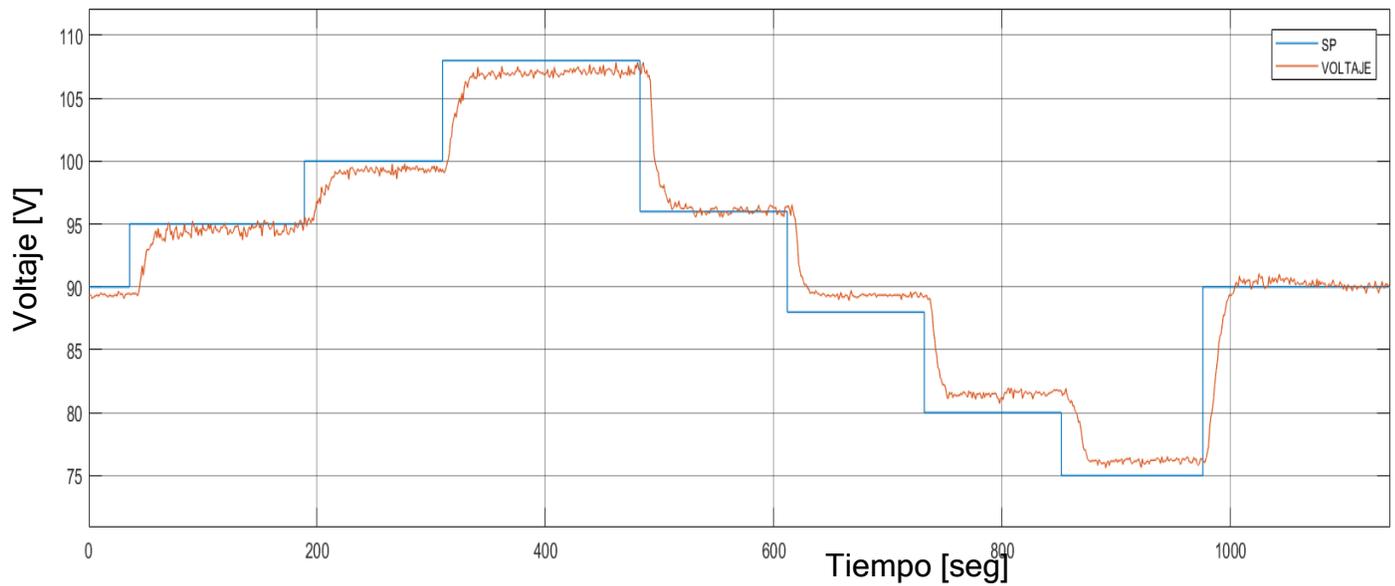


Figura 24 Setpoint vs voltaje generado.

FUENTE: Autores.

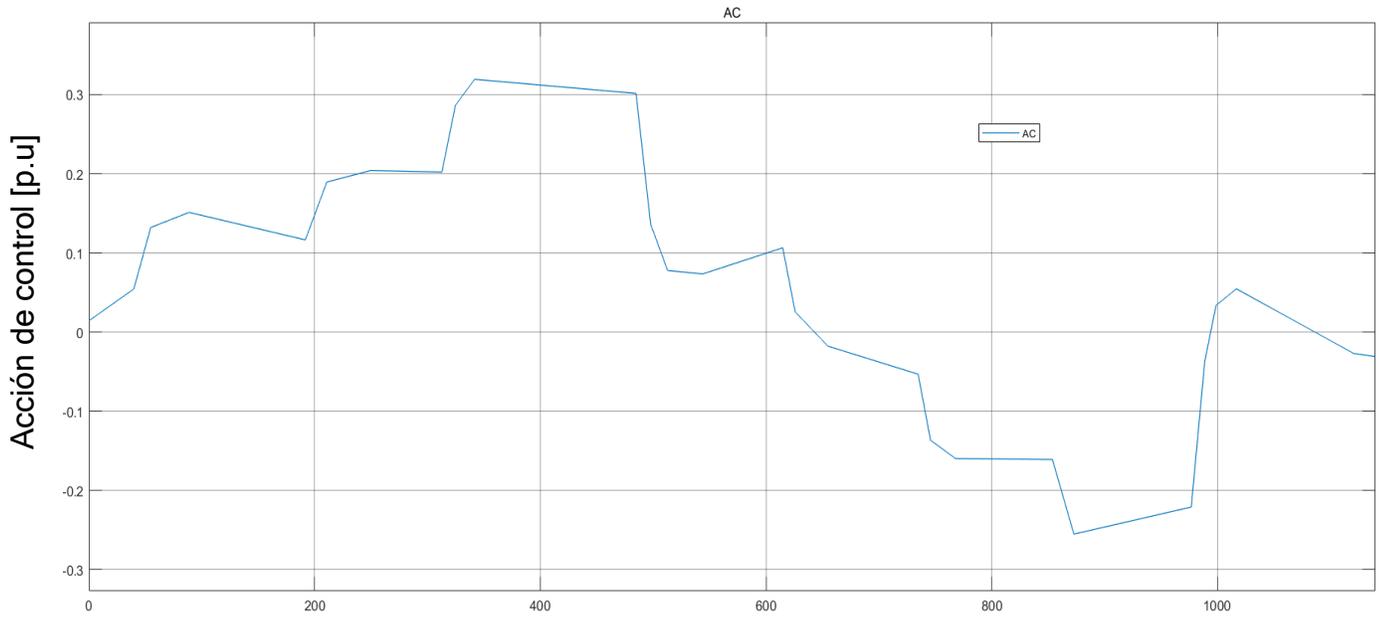


Figura 25 Acción de control.

FUENTE: Autores.

La siguiente grafica muestra la respuesta transitoria del controlador ante variaciones de Voltaje modificando el valor de la resistencia de campo del generador DC, las perturbaciones evidencian variando la resistencia de campo en 5 ohm.

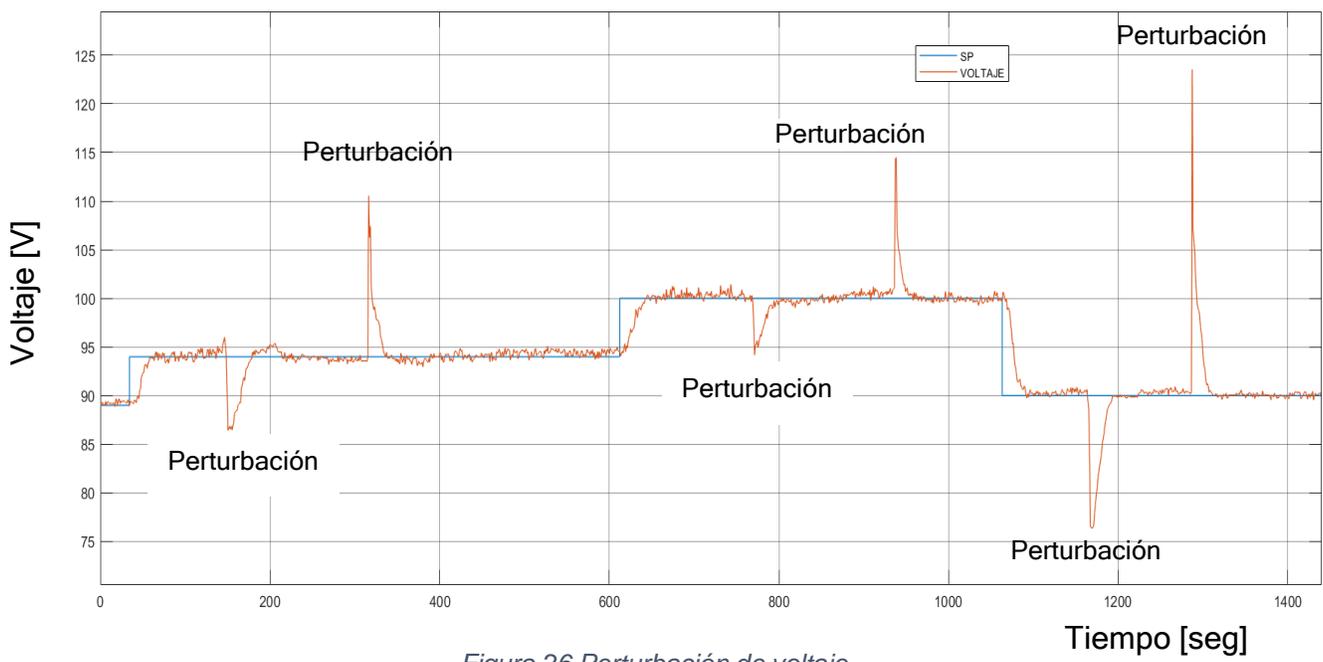


Figura 26 Perturbación de voltaje.

FUENTE: Autores.

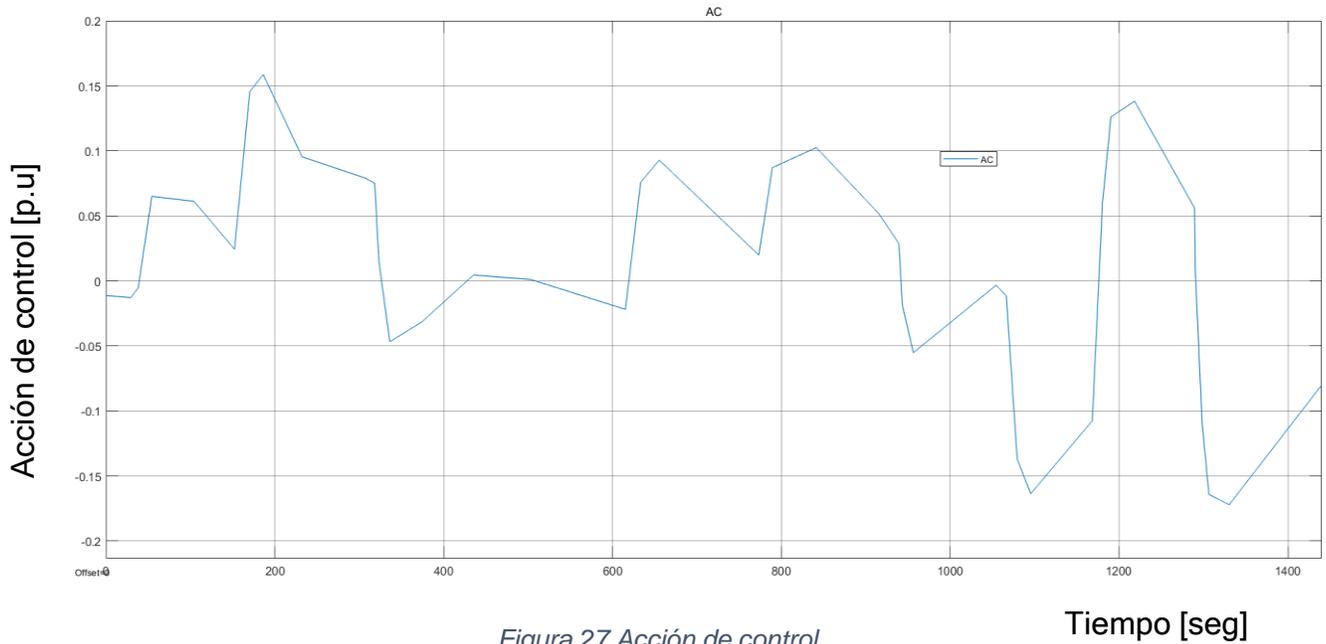


Figura 27 Acción de control.

FUENTE: Autores.

La siguiente grafica muestra la respuesta transitoria del controlador ante perturbaciones de caudal que se realizaron modificando la posición de la válvula de control manual. Las perturbaciones se evidencian variando la apertura de la válvula, el numero 1 indica donde se aplicaron las perturbaciones.

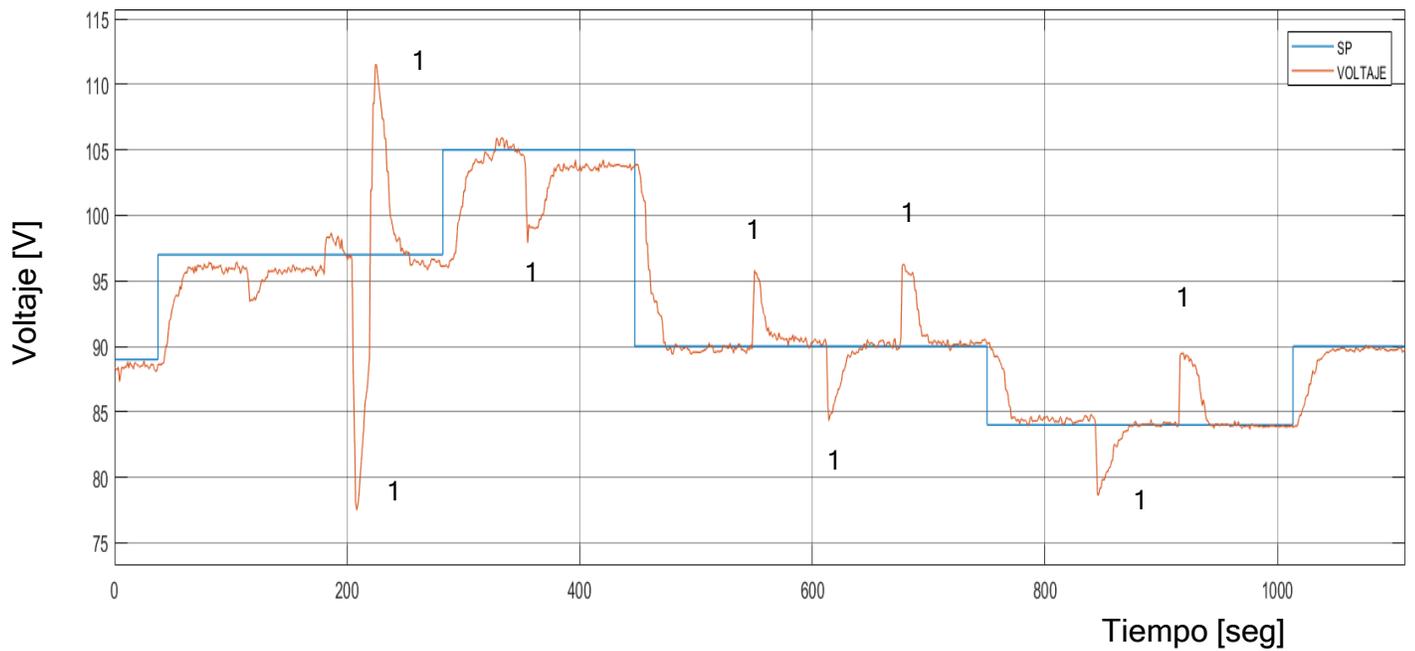


Figura 28 Perturbación de caudal.

FUENTE: Autores.

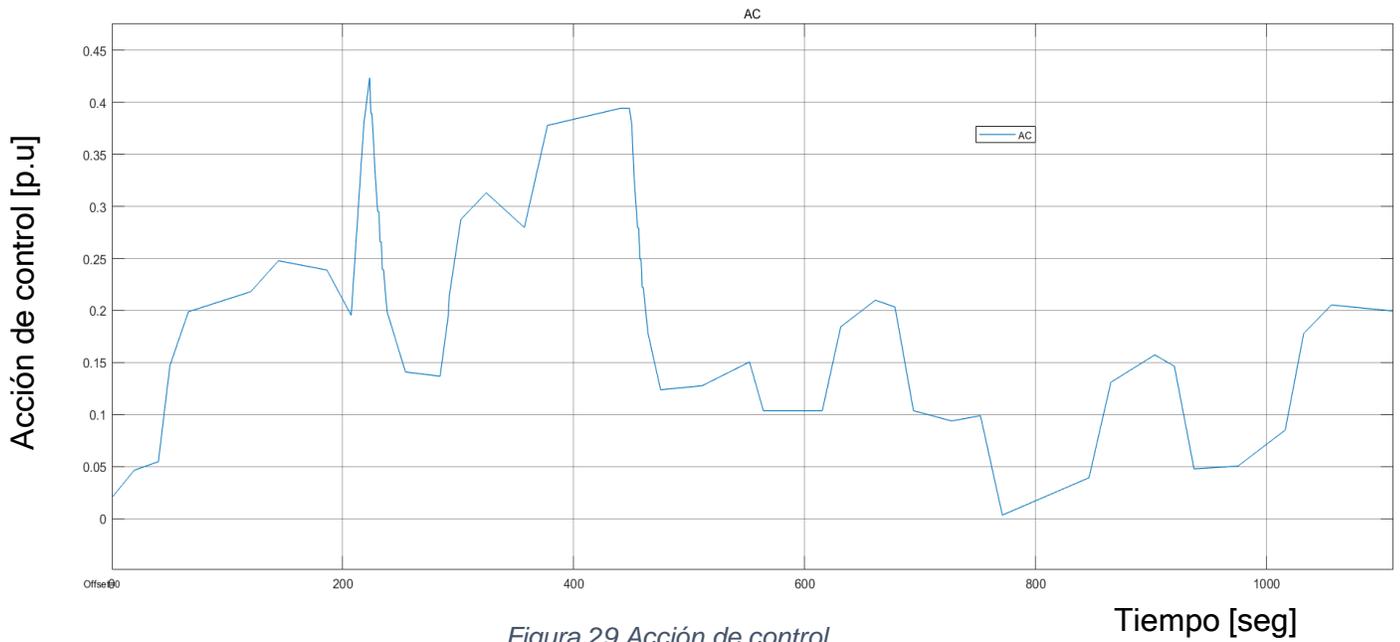


Figura 29 Acción de control.

FUENTE: Autores.

3.2. Implementación control MPC turbina Kaplan

La siguiente grafica muestra la respuesta transitoria del controlador ante variaciones de Setpoint

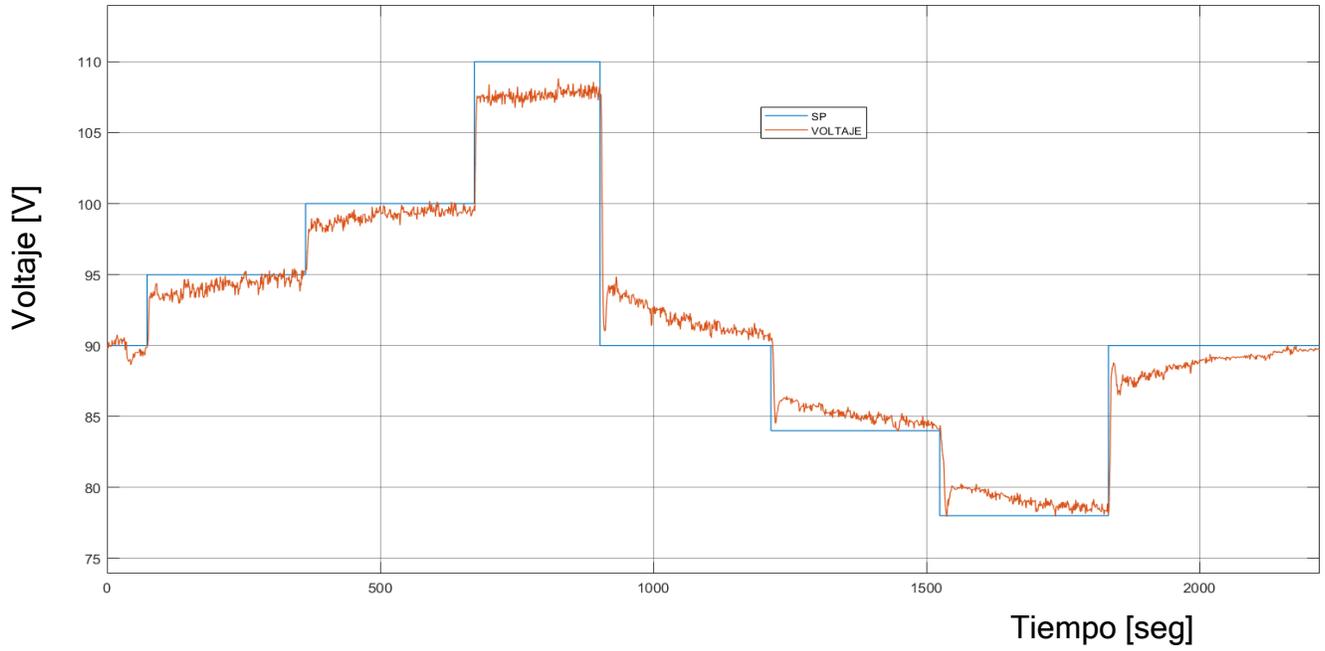


Figura 30 Respuesta transitoria ante diferentes cambios de setpoint.

FUENTE: Autores.

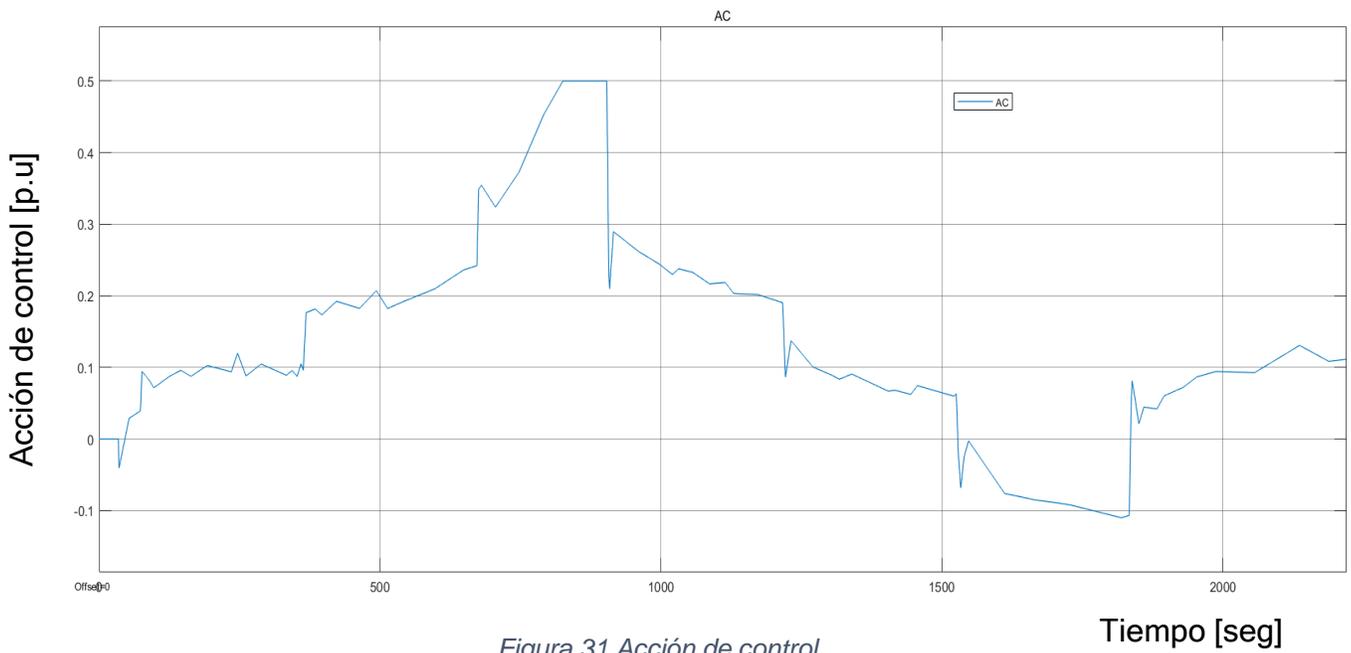


Figura 31 Acción de control.

FUENTE: Autores.

La siguiente grafica muestra la respuesta transitoria del controlador ante variaciones de Voltaje. Las perturbaciones evidencian variando la resistencia de campo en 5 ohm. El numero 1 indica donde se aplican las perturbaciones.

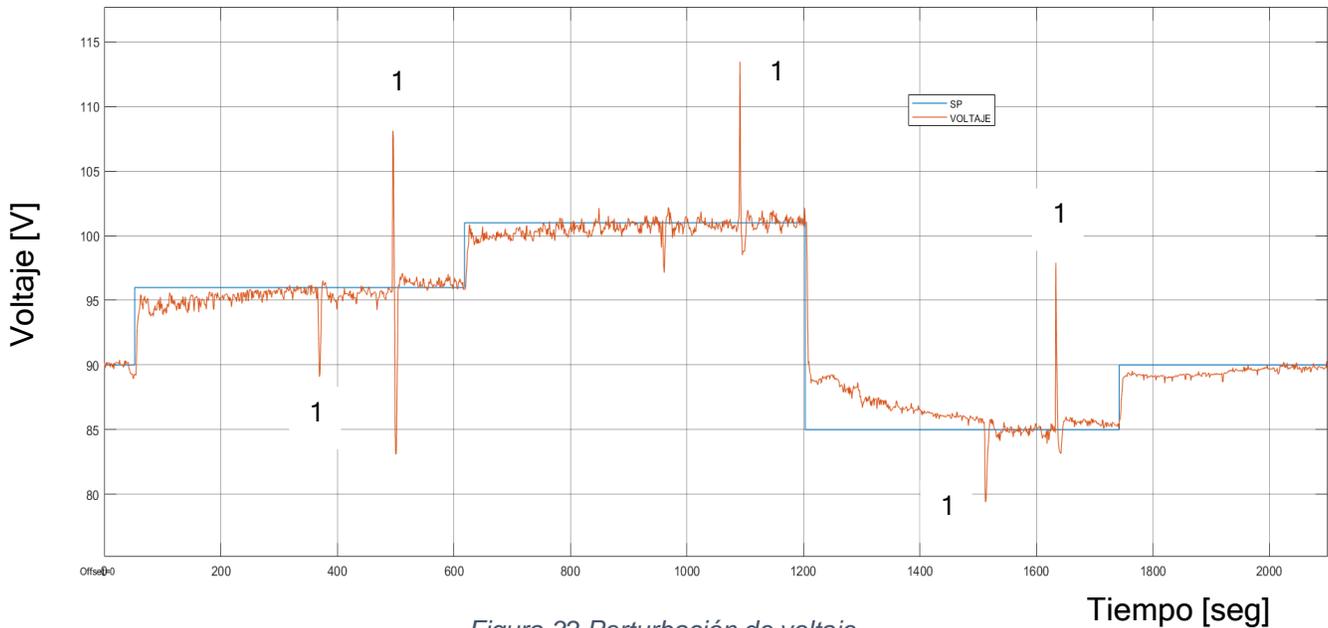


Figura 32 Perturbación de voltaje.

FUENTE: Autores.

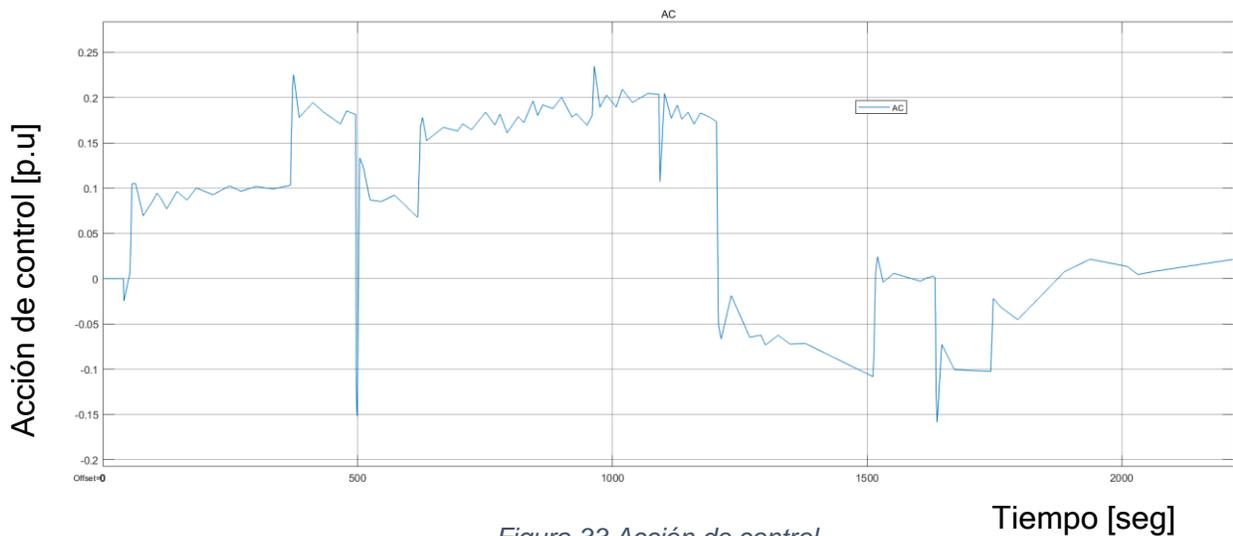


Figura 33 Acción de control.

FUENTE: Autores.

La siguiente grafica muestra la respuesta transitoria del controlador ante perturbaciones de caudal. Las perturbaciones se evidencian variando la apertura de la válvula, el numero 1 indica donde se aplicaron las perturbaciones.

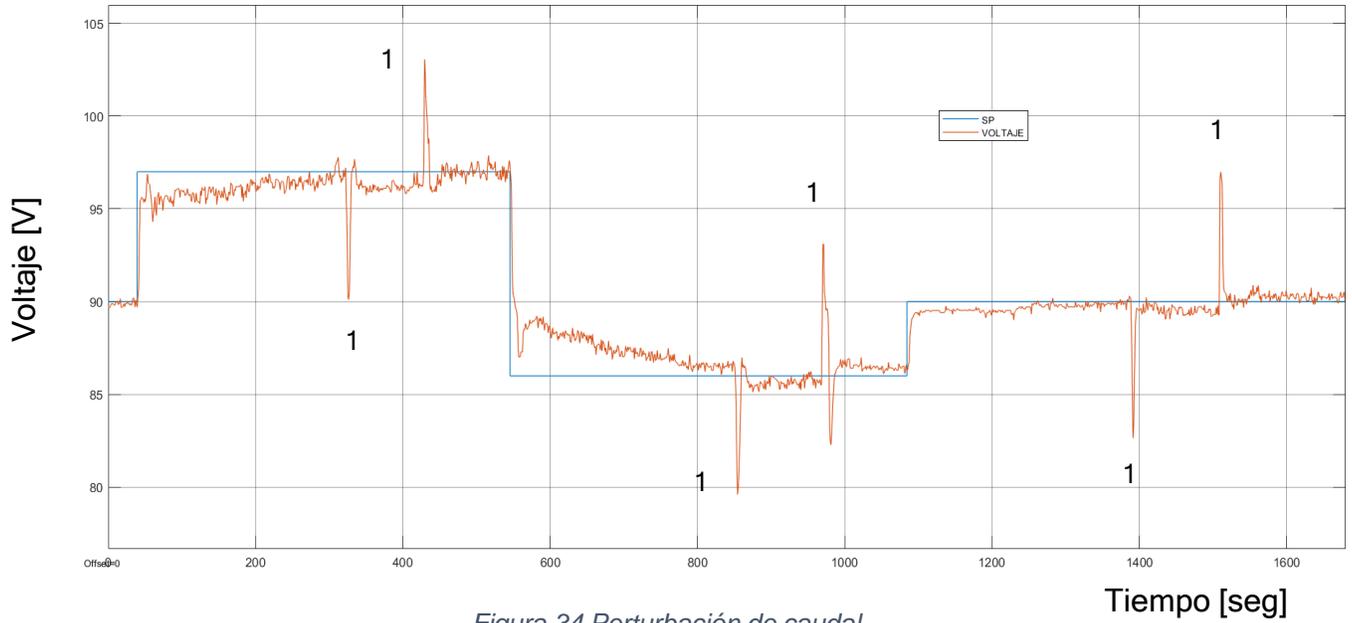


Figura 34 Perturbación de caudal.

FUENTE: Autores.

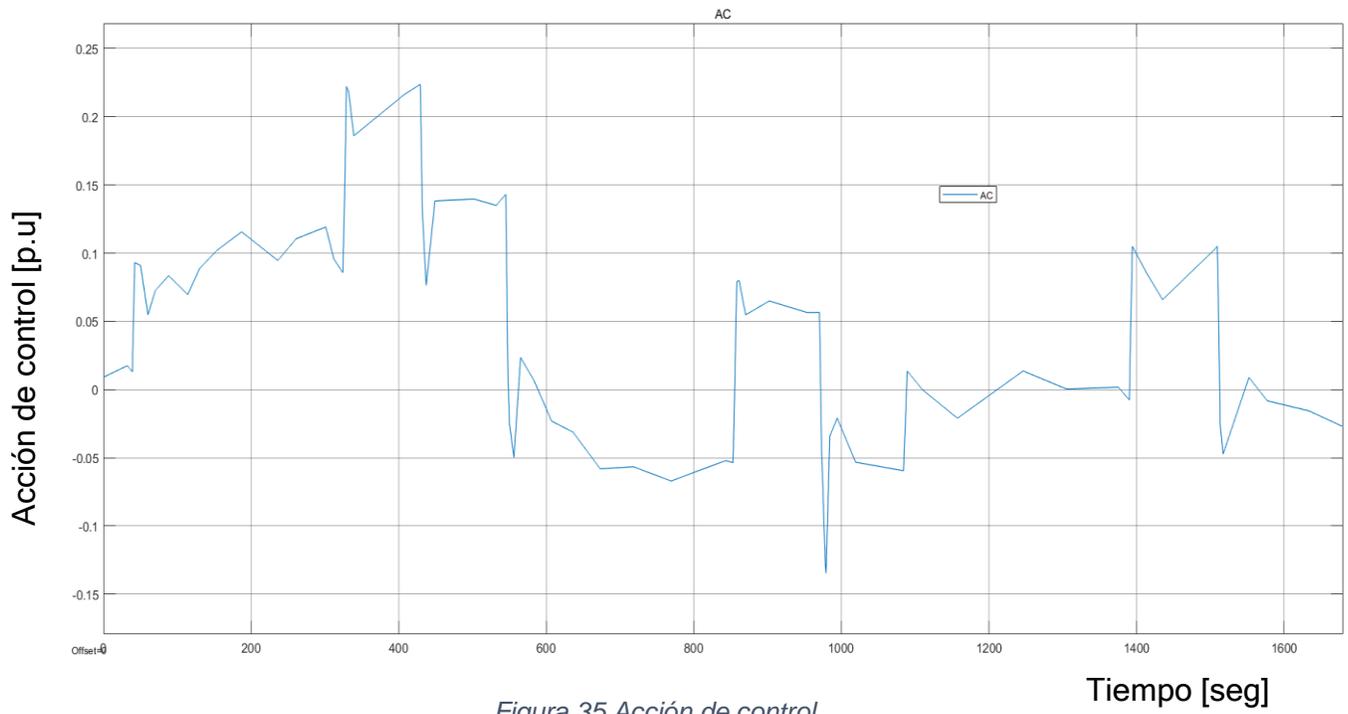


Figura 35 Acción de control.

FUENTE: Autores.

3.3. Implementación control sensibilidad mixta turbina Francis

La implementación de este controlador se lleva a cabo mediante una computadora, en la cual se programa el código del controlador, como entrada 1 tenemos el Setpoint, en la entrada 2 tenemos la retroalimentación la cual es el voltaje generado y en la salida 1 tenemos la acción de control que genera el controlador

La siguiente grafica muestra la respuesta transitoria del controlador ante variaciones de Setpoint

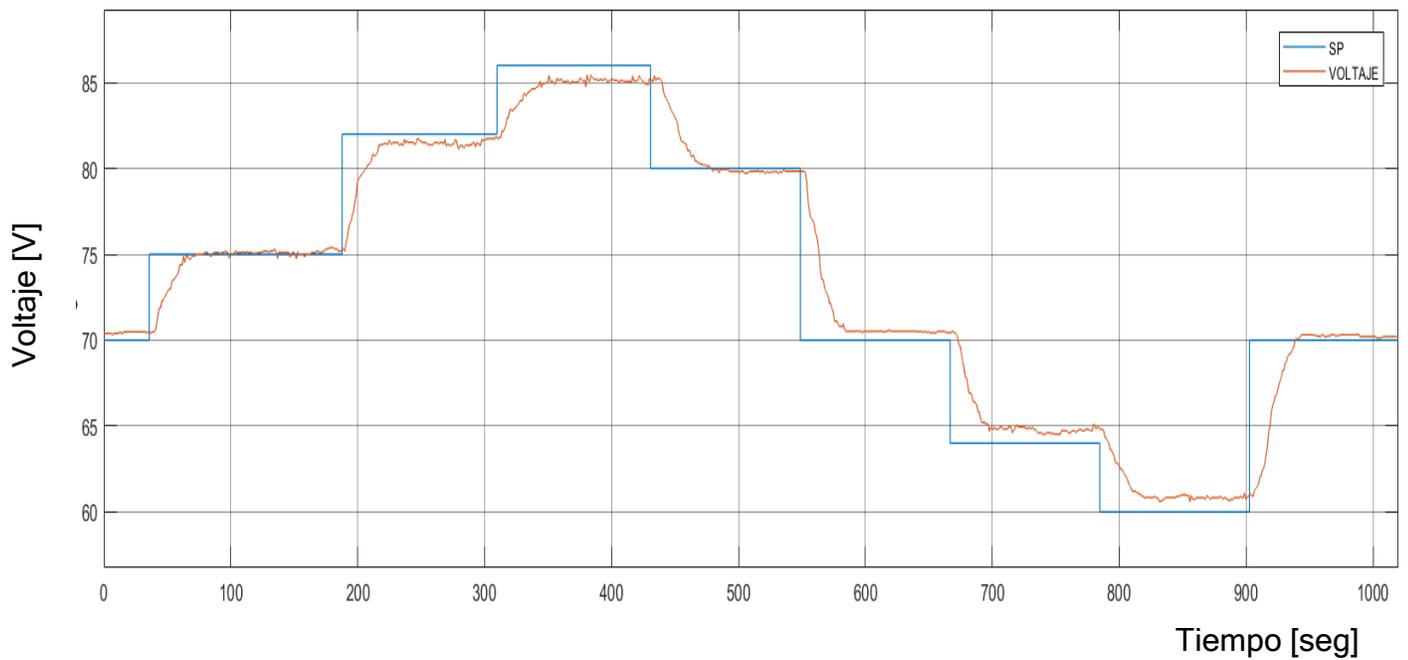


Figura 36 Respuesta transitoria ante diferentes cambios de setpoint.

FUENTE: Autores.

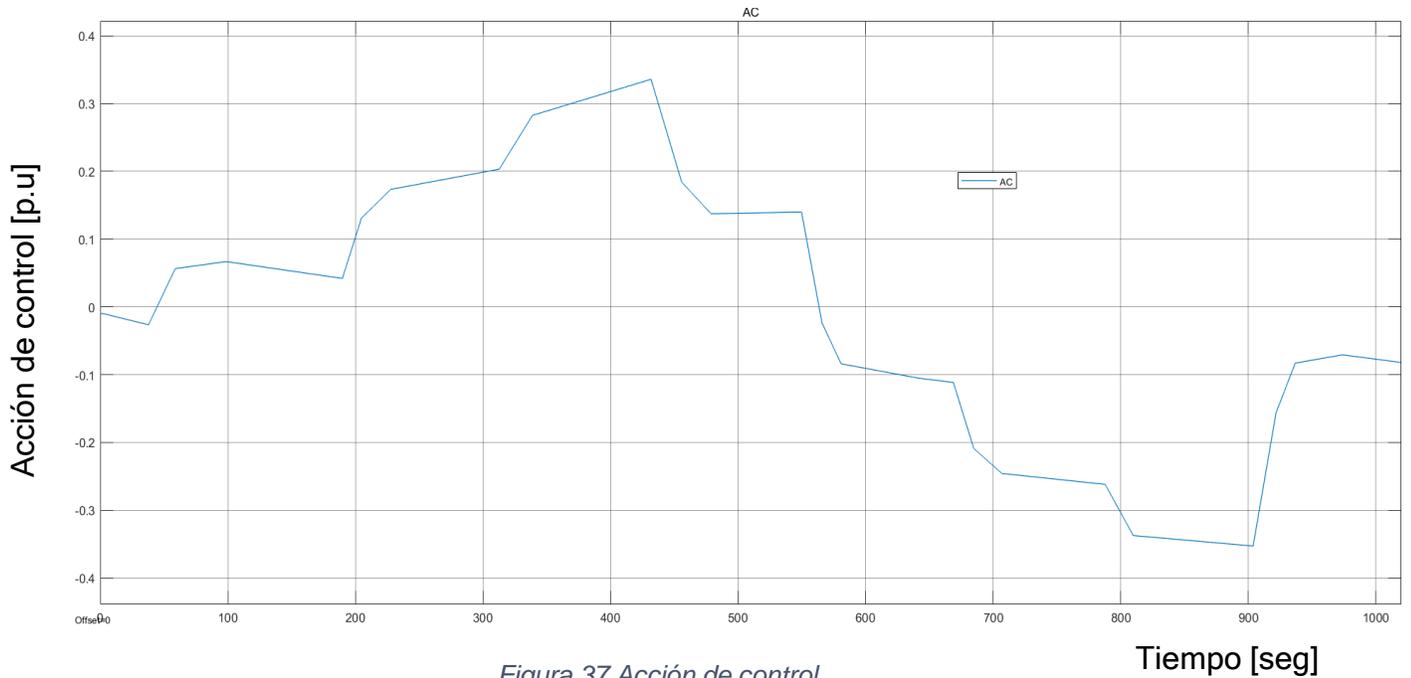


Figura 37 Acción de control.

FUENTE: Autores.

La siguiente grafica muestra la respuesta transitoria del controlador ante variaciones de Voltaje. Las perturbaciones evidencian variando la resistencia de campo en 5 ohm. El numero 1 indica donde se aplican las perturbaciones.

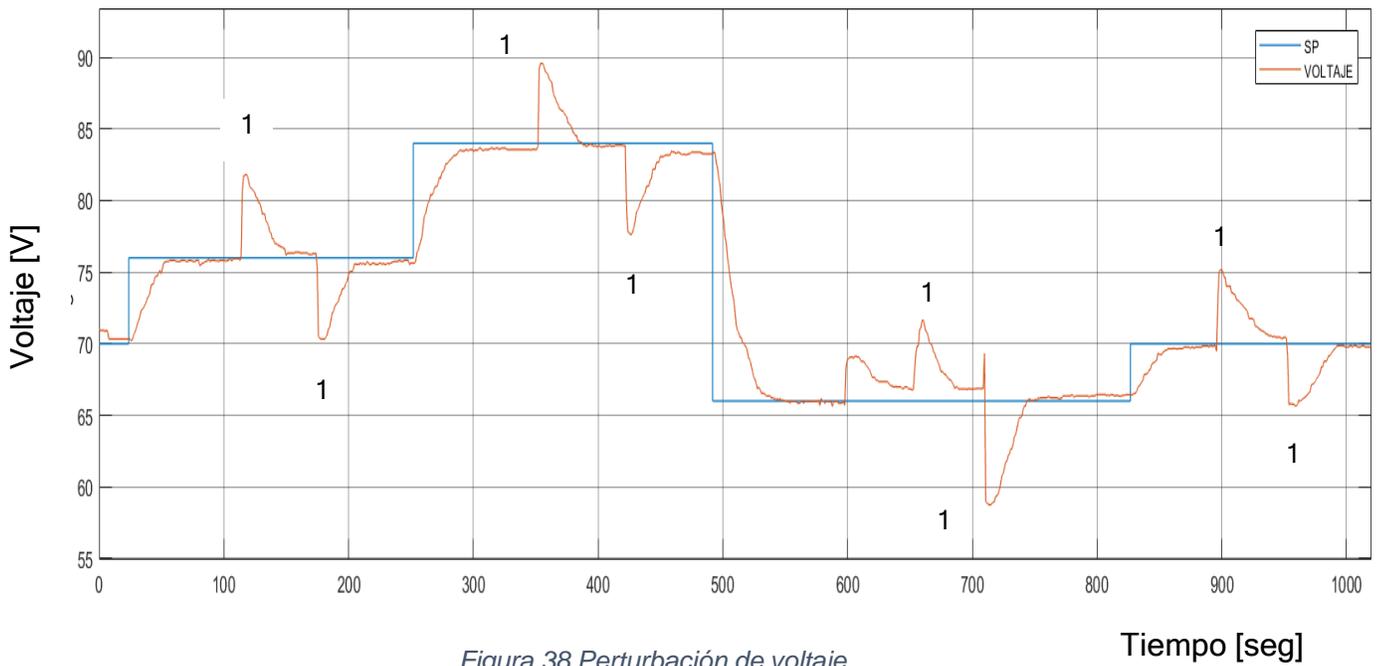


Figura 38 Perturbación de voltaje.

FUENTE: Autores.

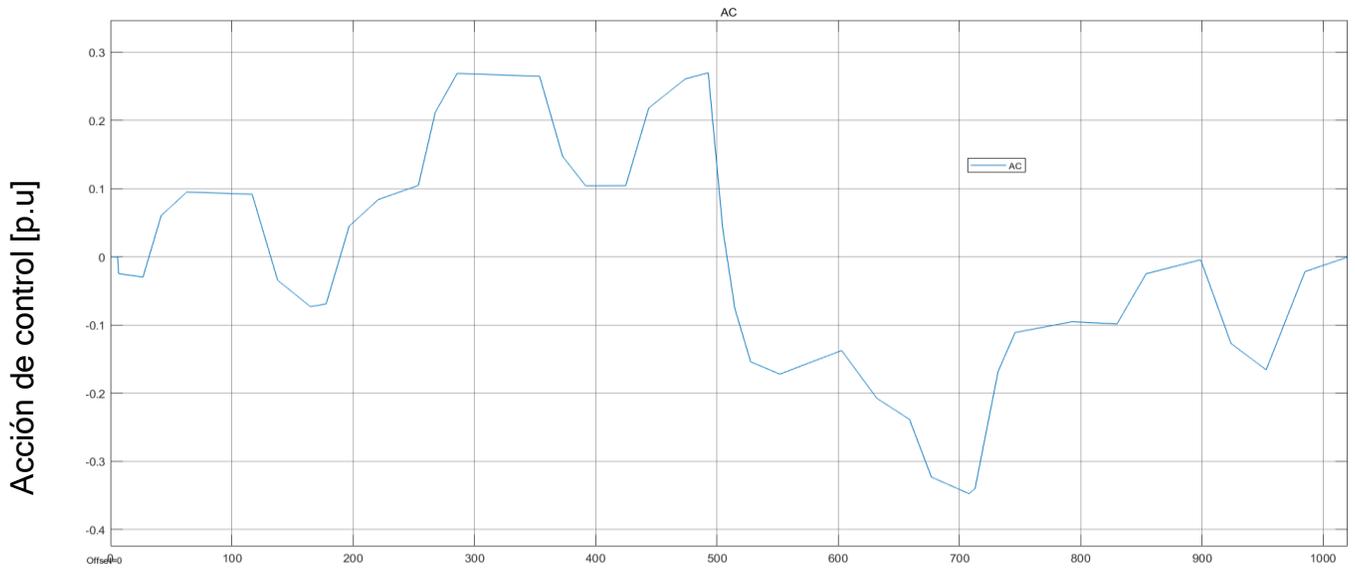


Figura 39 Acción de control.

FUENTE: Autores.

Tiempo [seg]

La siguiente grafica muestra la respuesta transitoria del controlador ante perturbaciones de caudal. Las perturbaciones se evidencian variando la apertura de la válvula, el numero 1 indica donde se aplicaron las perturbaciones.

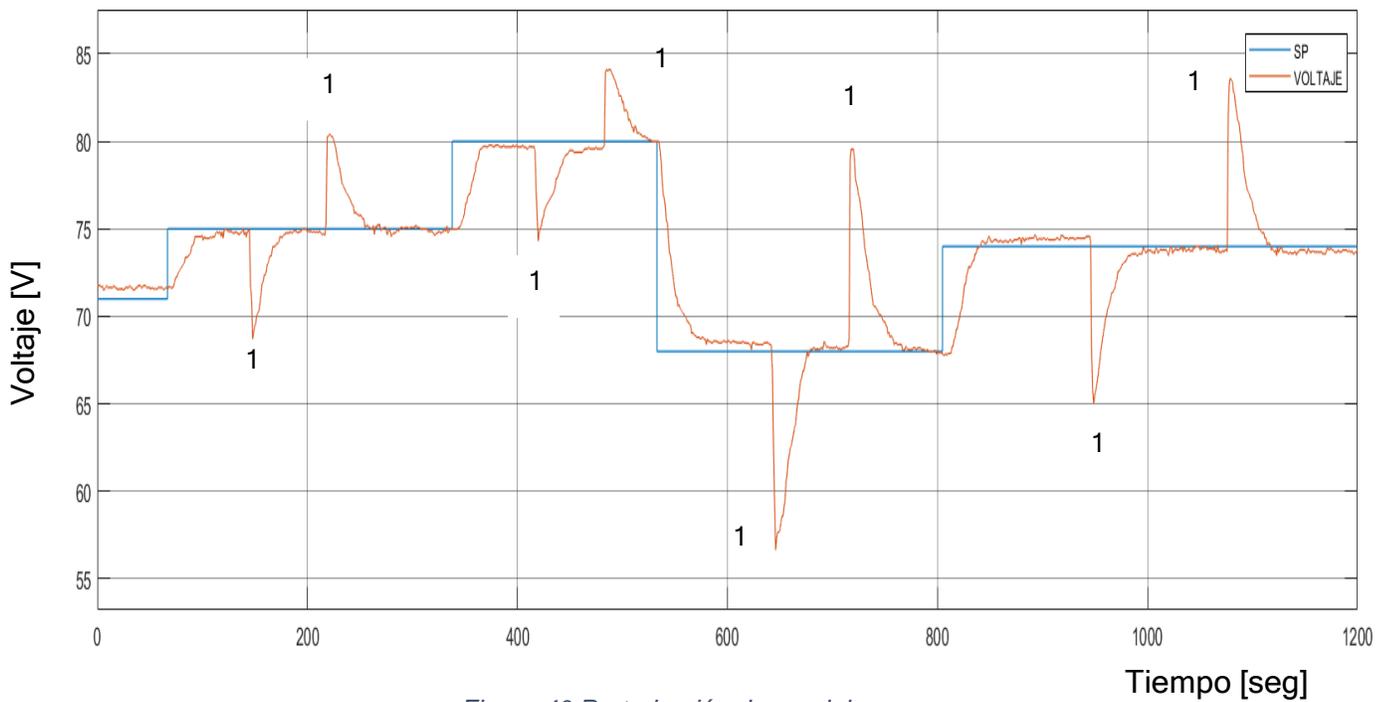


Figura 40 Perturbación de caudal.

FUENTE: Autores.

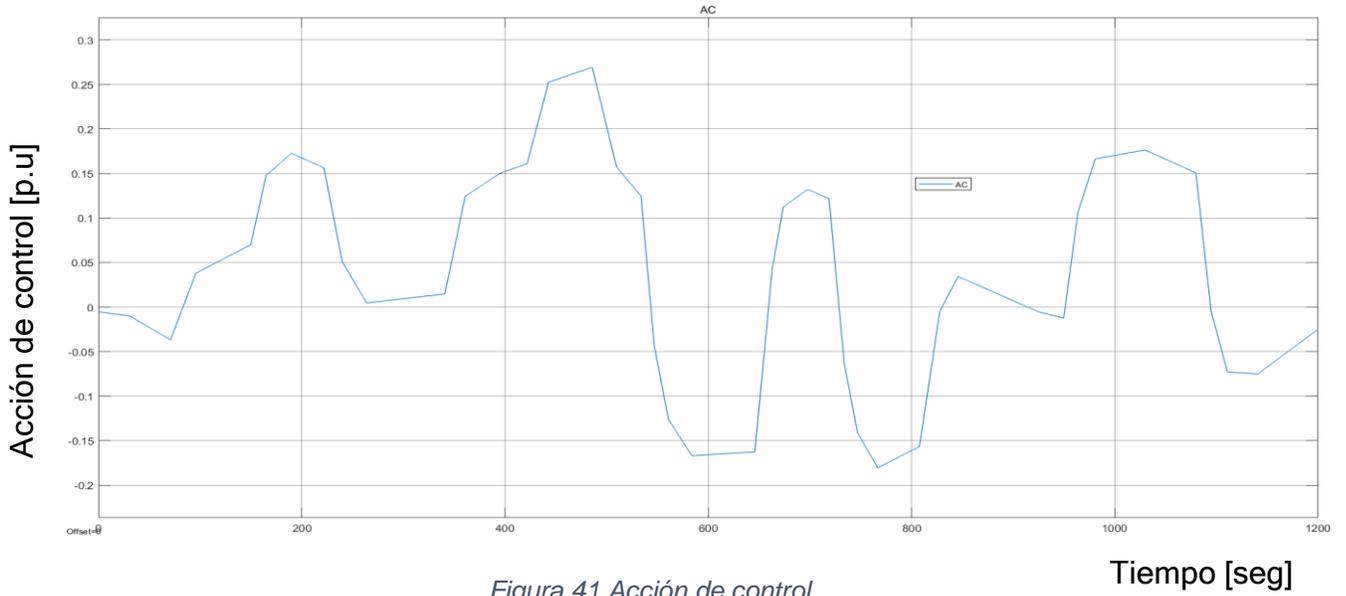


Figura 41 Acción de control.

FUENTE: Autores.

3.4. Implementación control MPC turbina Francis

La implementación de este controlador se lleva a cabo mediante una calculadora, en la cual se programa el código del controlador, como entrada 1 tenemos la resta del Setpoint y la ganancia DC, en la entrada 2 tenemos la retroalimentación menos la ganancia DC y en la salida 1 tenemos la acción de control que genera el controlador

La siguiente grafica muestra la respuesta transitoria del controlador ante variaciones de Setpoint

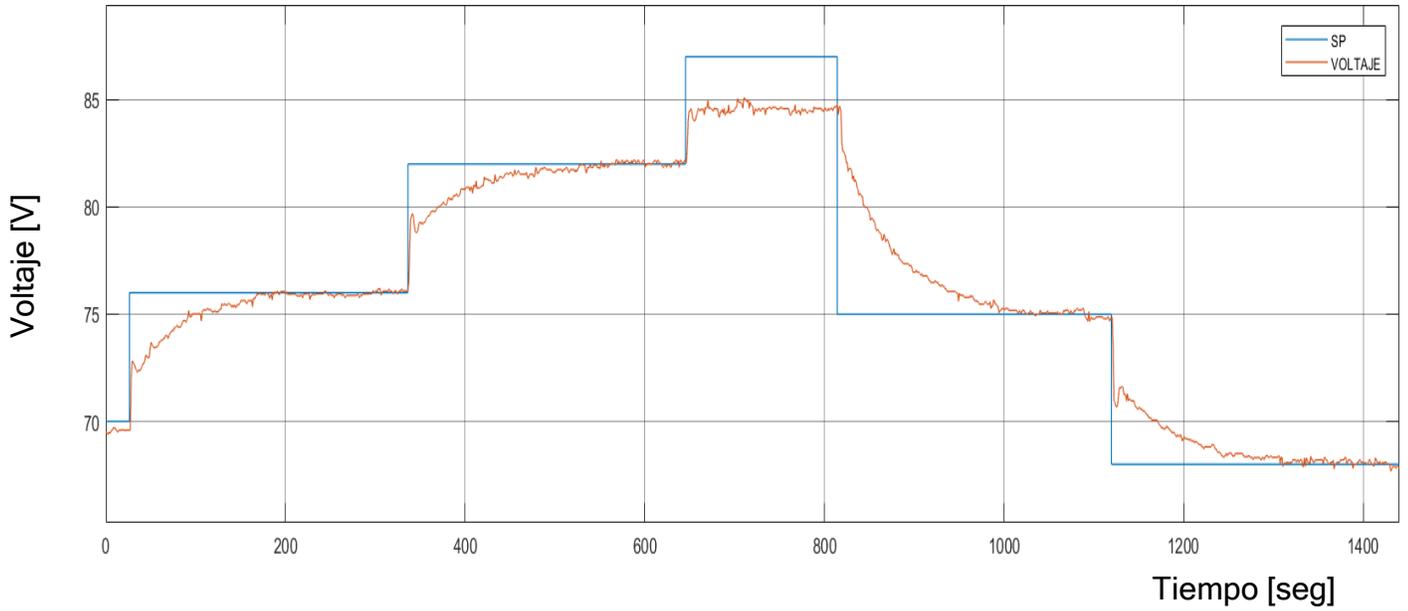


Figura 42 Respuesta transitoria ante diferentes cambios de setpoint.

FUENTE: Autores.

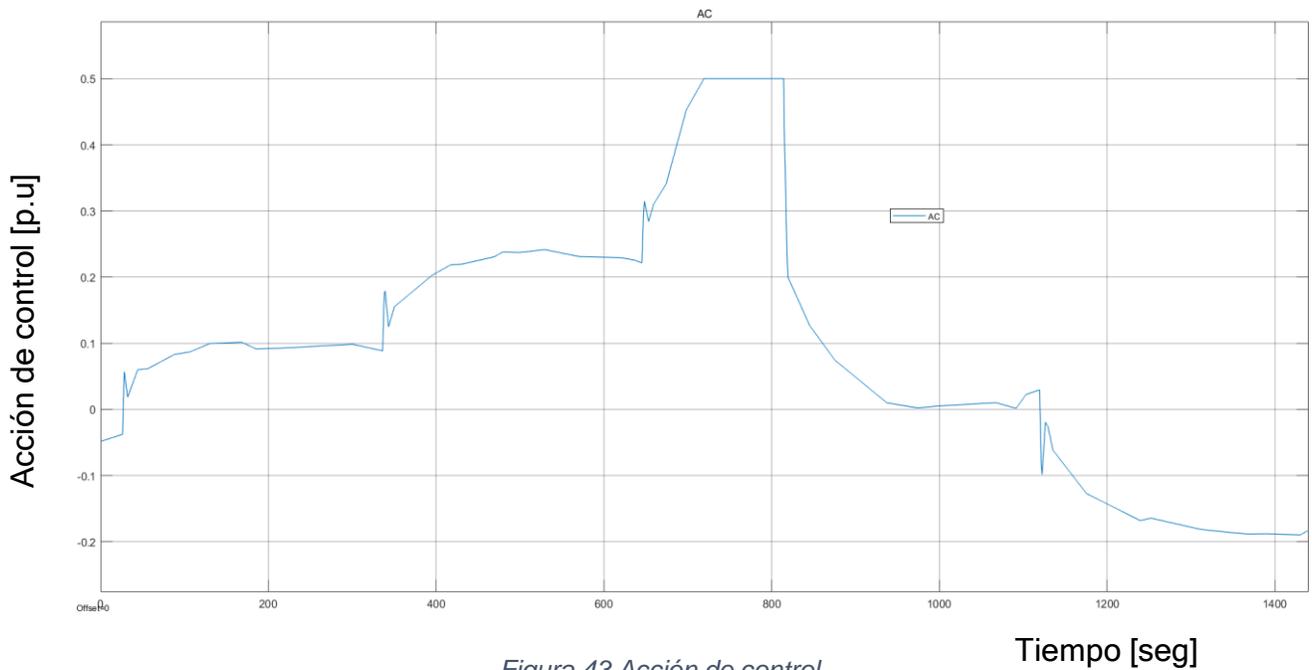


Figura 43 Acción de control.

FUENTE: Autores.

La siguiente grafica muestra la respuesta transitoria del controlador ante variaciones de Voltaje. Las perturbaciones evidencian variando la resistencia de campo en 5 ohm. El numero 1 indica donde se aplican las perturbaciones.

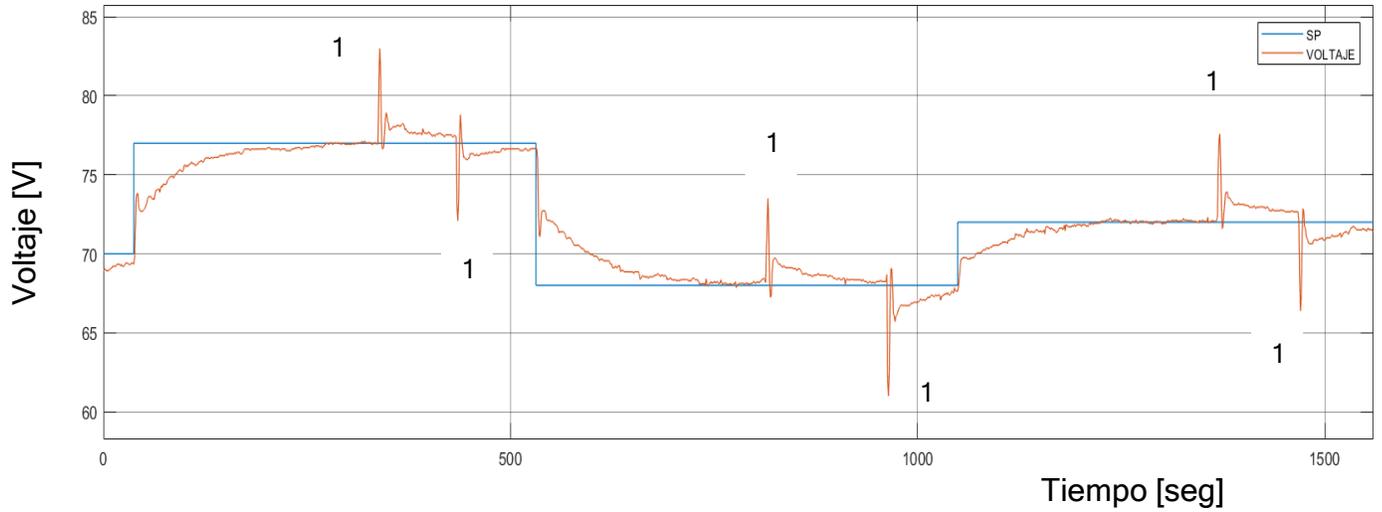


Figura 44 Perturbación de voltaje.

FUENTE: Autores.

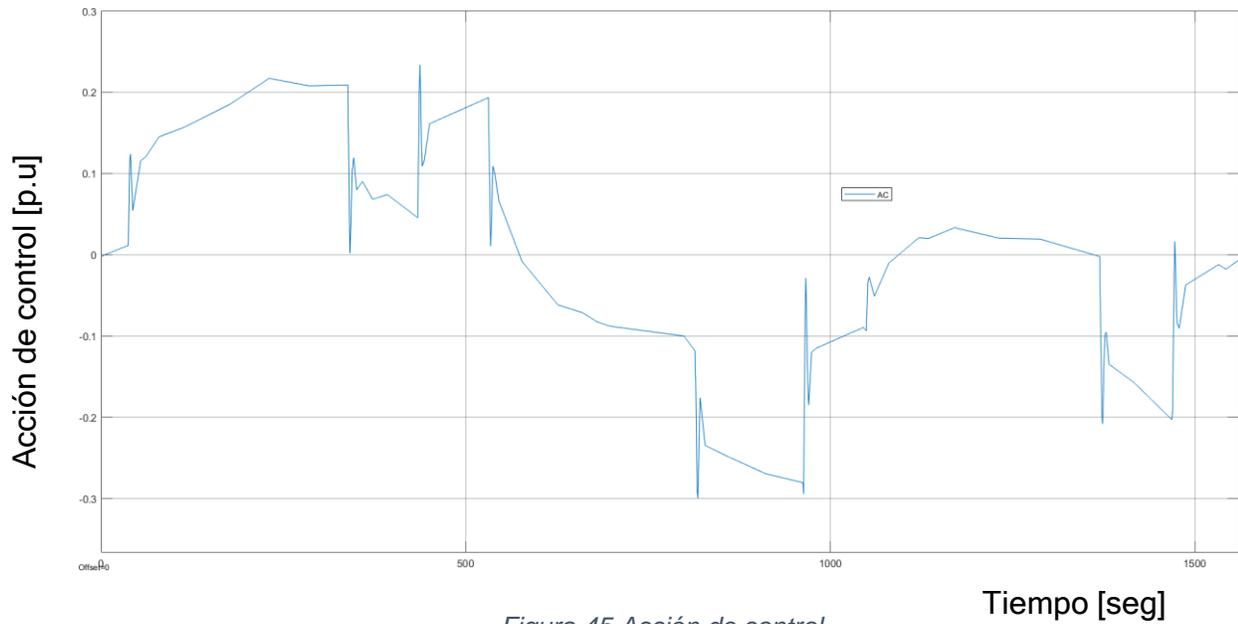


Figura 45 Acción de control.

FUENTE: Autores.

La siguiente grafica muestra la respuesta transitoria del controlador ante perturbaciones de caudal. Las perturbaciones se evidencian variando la apertura de la válvula, el numero 1 indica donde se aplicaron las perturbaciones.

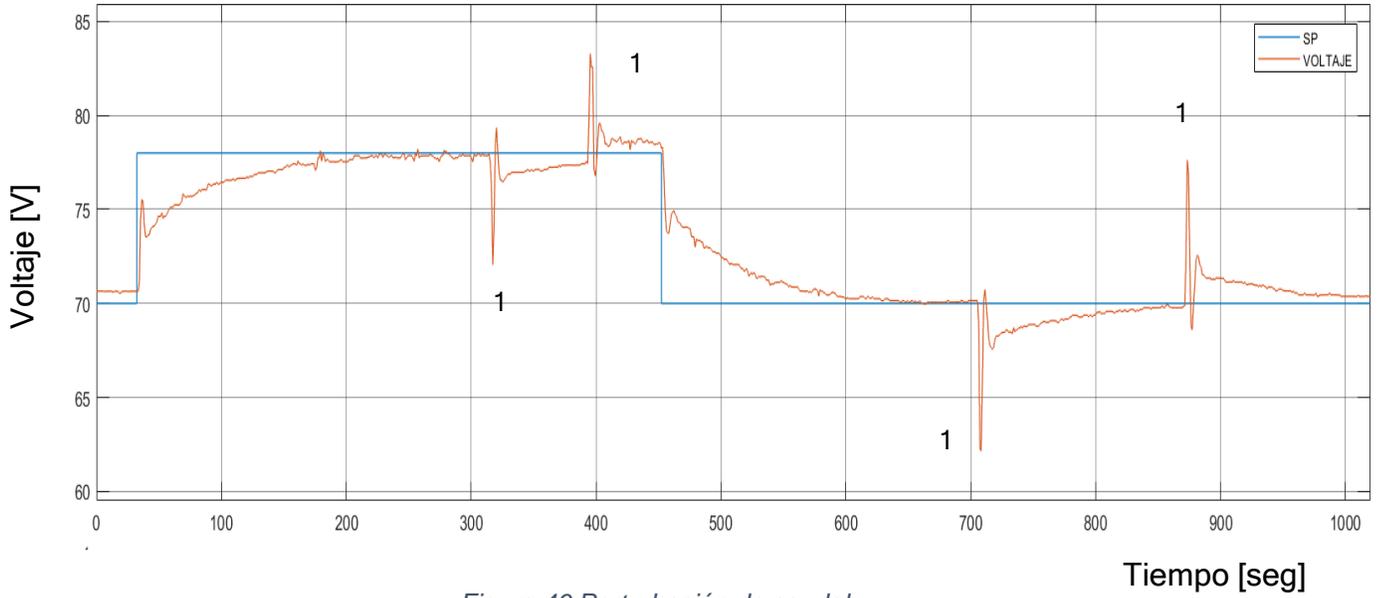


Figura 46 Perturbación de caudal.

FUENTE: Autores.

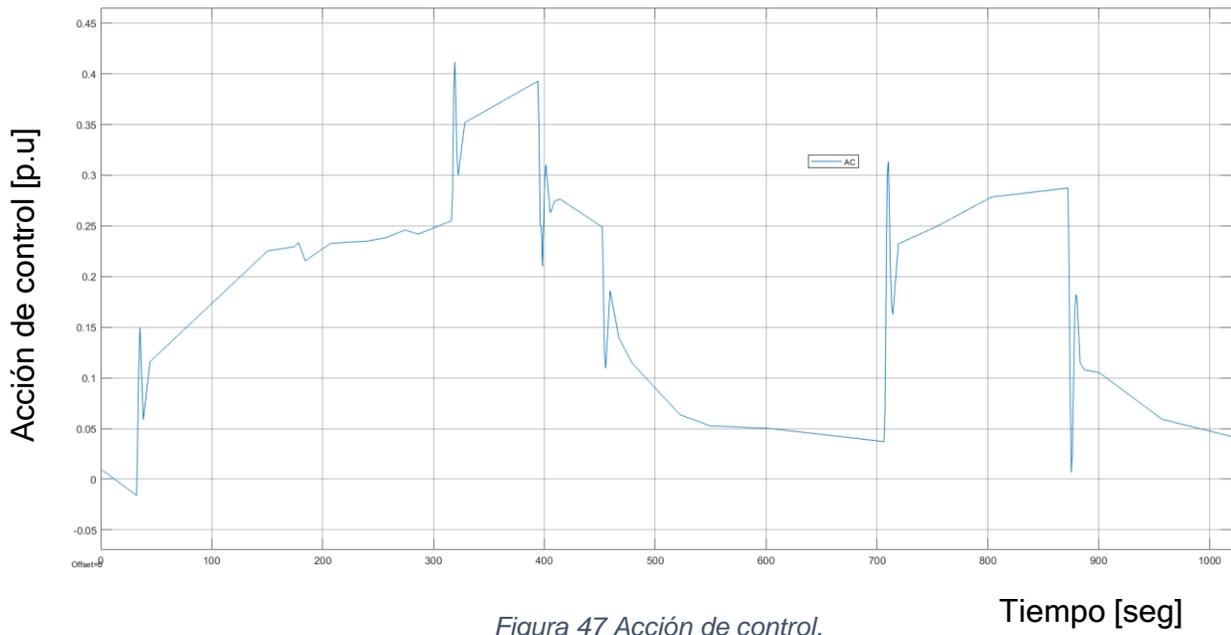


Figura 47 Acción de control.

FUENTE: Autores.

CAPITULO 4: CONTROL PI

En este capítulo se trabajó la herramienta autotuning del sistema Delta V donde se utilizó con el fin de crear un control PI para las dos turbinas hidráulicas y poder observar los resultados de este controlador. Dependiendo del controlador que seleccionamos nos arroja los parámetros de nuestro controlador. Para lo cual debemos introducir el rango de voltaje de operación y el rango de acción de control. Después de esto obtendremos nuestros variables en este caso será Gain que representa la constante proporcional y Reset que representa la constante integral.

4.1. Control PI turbina Francis

Los parámetros introducidos en el autotuning para la turbina Francis fueron:

$$V_{max} = 80, V_{min} = 60, AC_{max} = 0.5, AC_{min} = -0.5$$

El controlador PI de la turbina Francis se sintonizó con las siguientes constantes

$$Gain = 5 \text{ y } Reset = 5$$

4.2. Control PI turbina Kaplan

Los parámetros introducidos en el autotuning para la turbina Francis fueron:

$$V_{max} = 103, V_{min} = 80, AC_{max} = 0.5, AC_{min} = -0.5$$

El controlador PI de la turbina Francis se sintonizó con las siguientes constantes

$$Gain = 3 \text{ y } Reset = 5.9$$

4.3. Implementación control PI turbina Francis

La siguiente gráfica muestra la respuesta transitoria del controlador ante variaciones de Setpoint donde se puede observar que el controlador tiene un tiempo de establecimiento rápido.

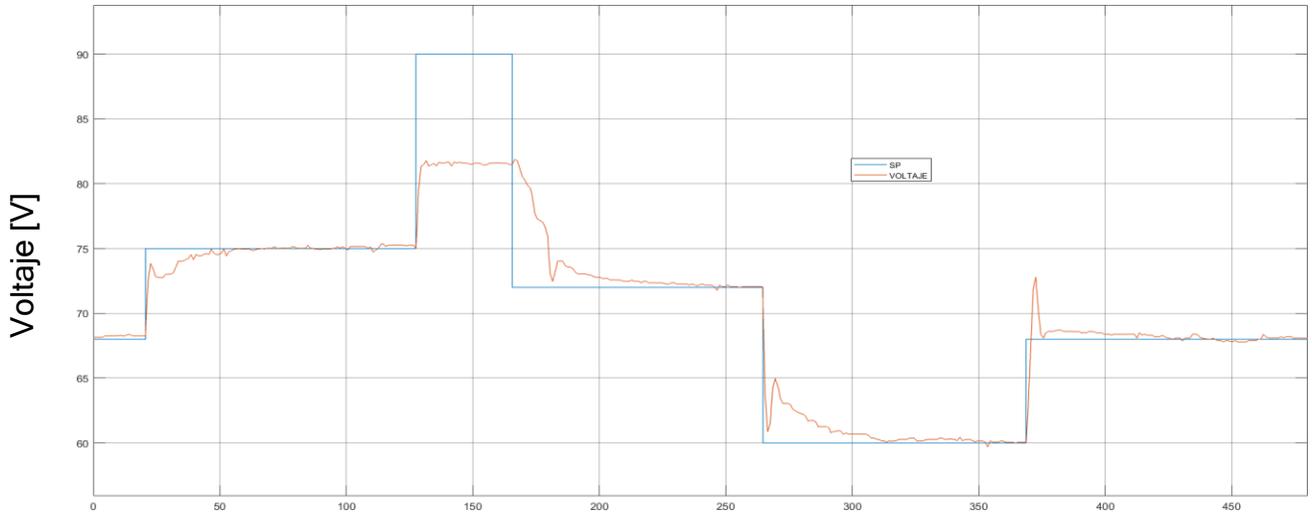


Figura 48 Respuesta transitoria ante diferentes cambios de setpoint.

Tiempo [seg]

FUENTE: Autores.

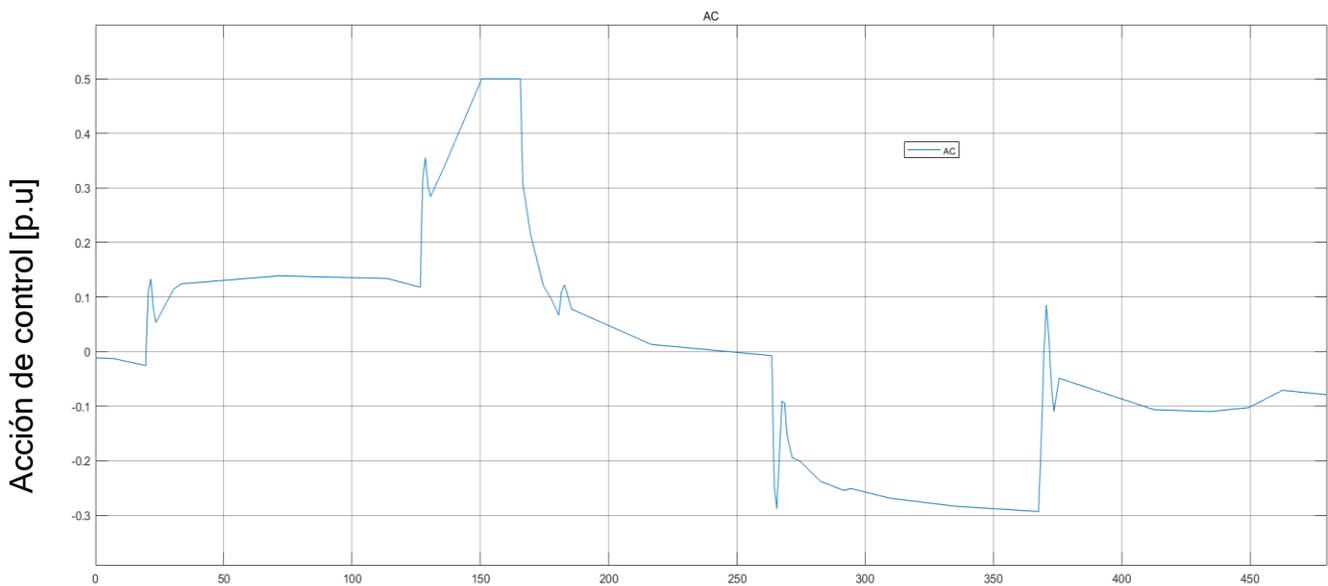


Figura 49 Acción de control.

Tiempo [seg]

FUENTE: Autores.

La siguiente grafica muestra la respuesta transitoria del controlador ante variaciones de Voltaje. Donde se observa que se demora en volver al SP ante las perturbaciones de voltaje. Las perturbaciones evidencian variando la resistencia de campo en 5 ohm. El numero 1 indica donde se aplican las perturbaciones

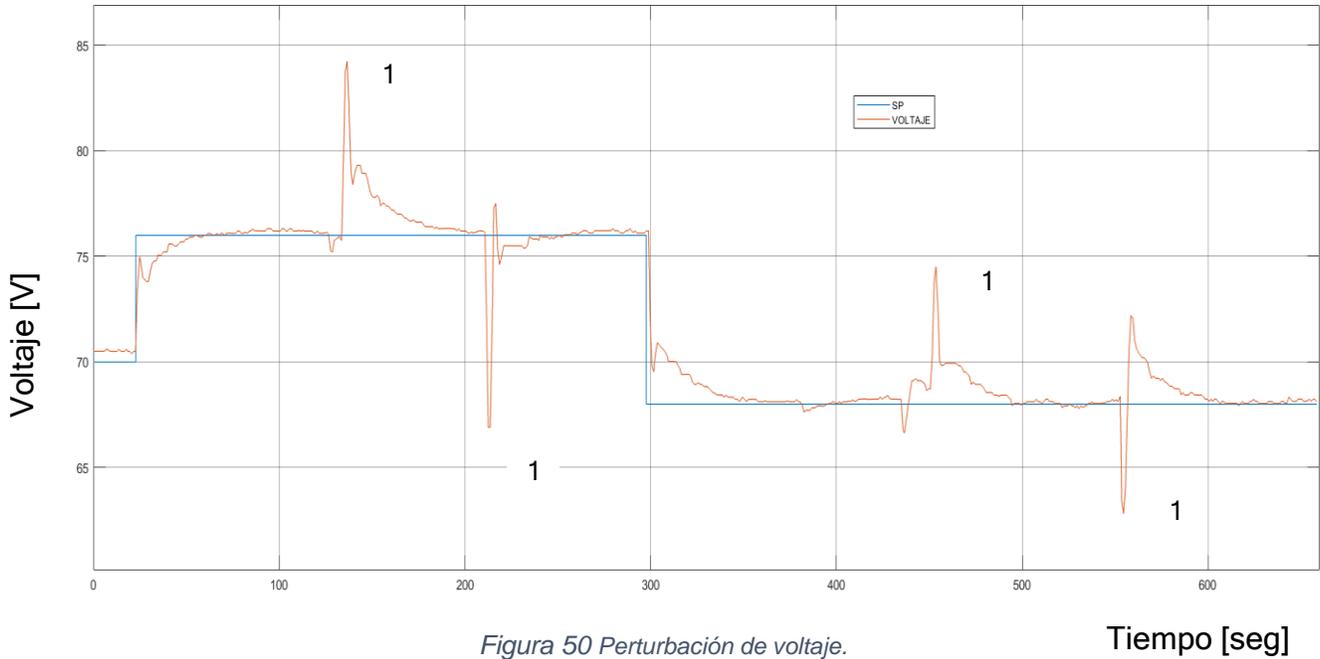


Figura 50 Perturbación de voltaje.

FUENTE: Autores.

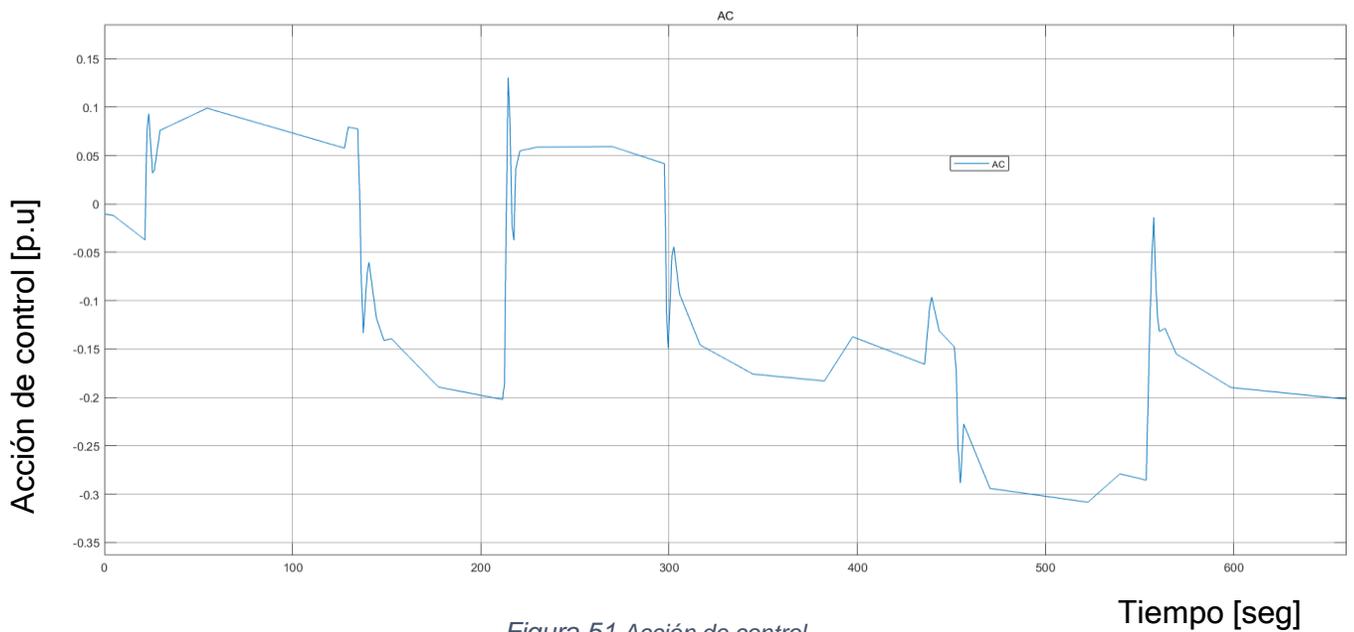


Figura 51 Acción de control.

FUENTE: Autores.

La siguiente grafica muestra la respuesta transitoria del controlador ante perturbaciones de caudal. Las perturbaciones se evidencian variando la apertura de la válvula, el numero 1 indica donde se aplicaron las perturbaciones.

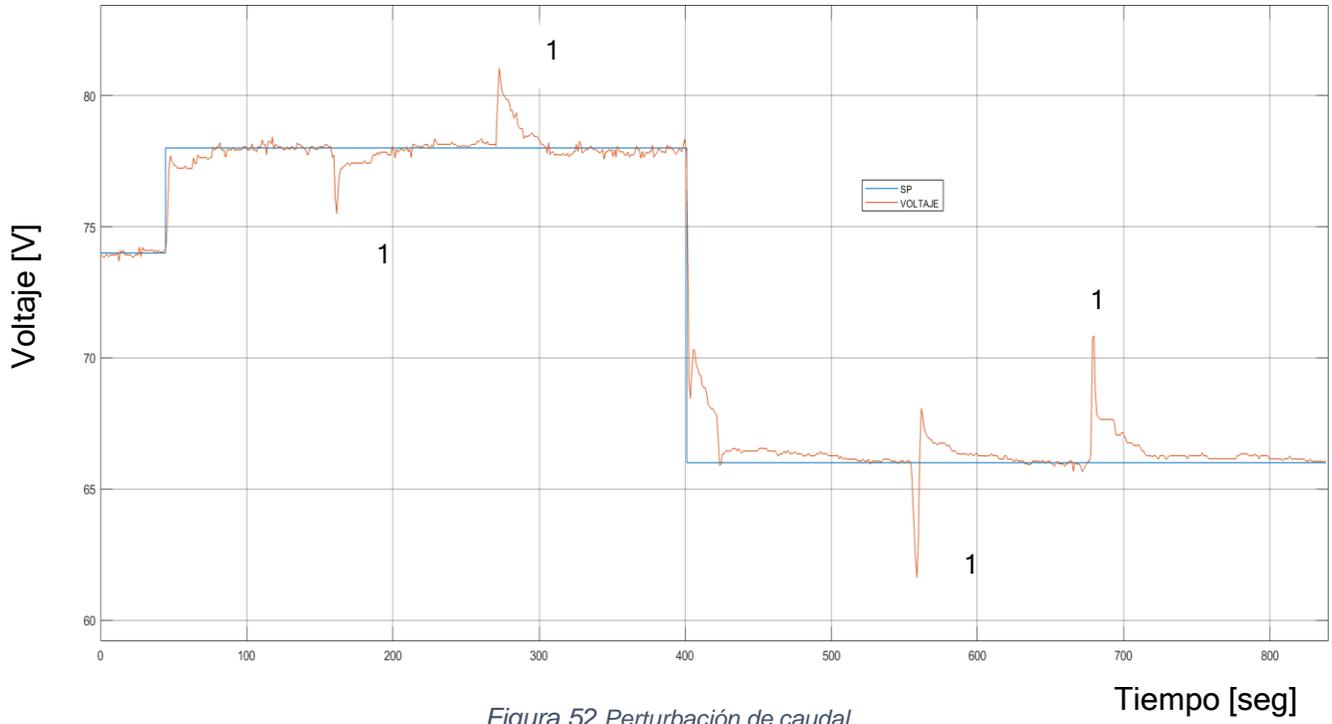


Figura 52 Perturbación de caudal.

FUENTE: Autores

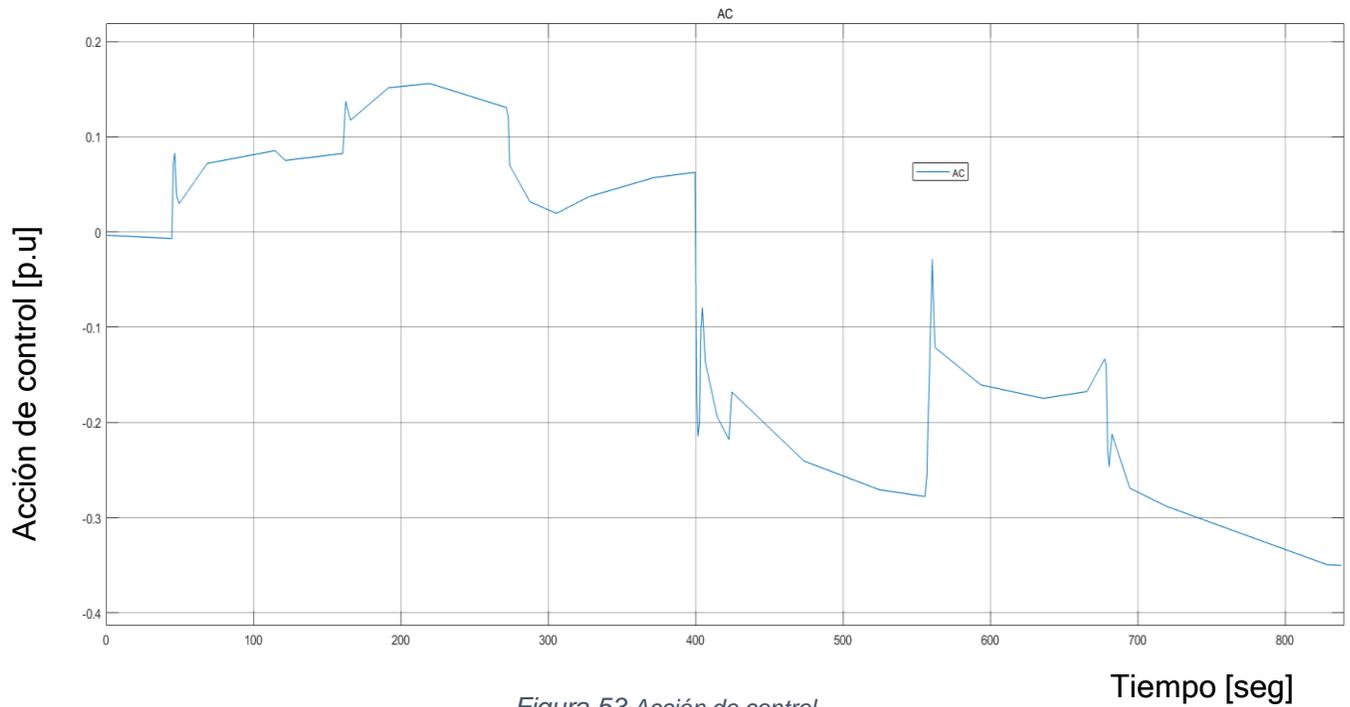


Figura 53 Acción de control.

FUENTE: Autores.

4.4. Implementación control PI turbina Kaplan

La siguiente grafica muestra la respuesta transitoria del controlador ante variaciones de Setpoint donde se puede observar que el controlador tiene un tiempo de establecimiento rápido.

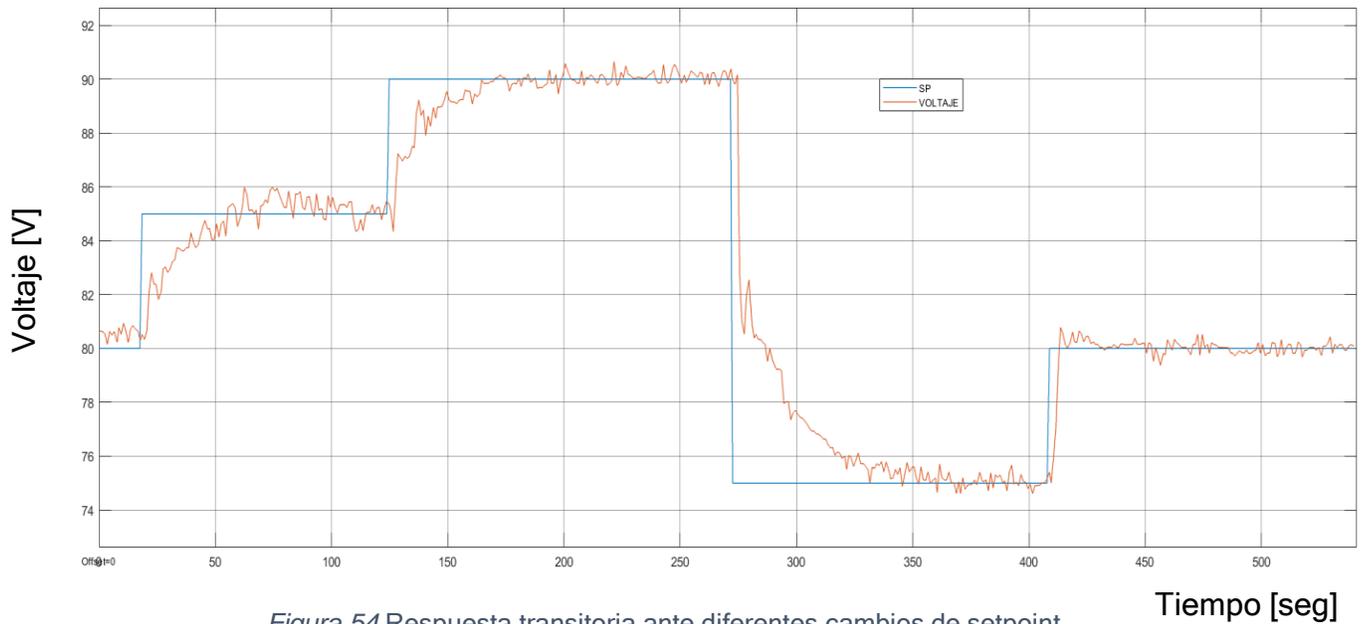


Figura 54 Respuesta transitoria ante diferentes cambios de setpoint.

FUENTE: Autores.

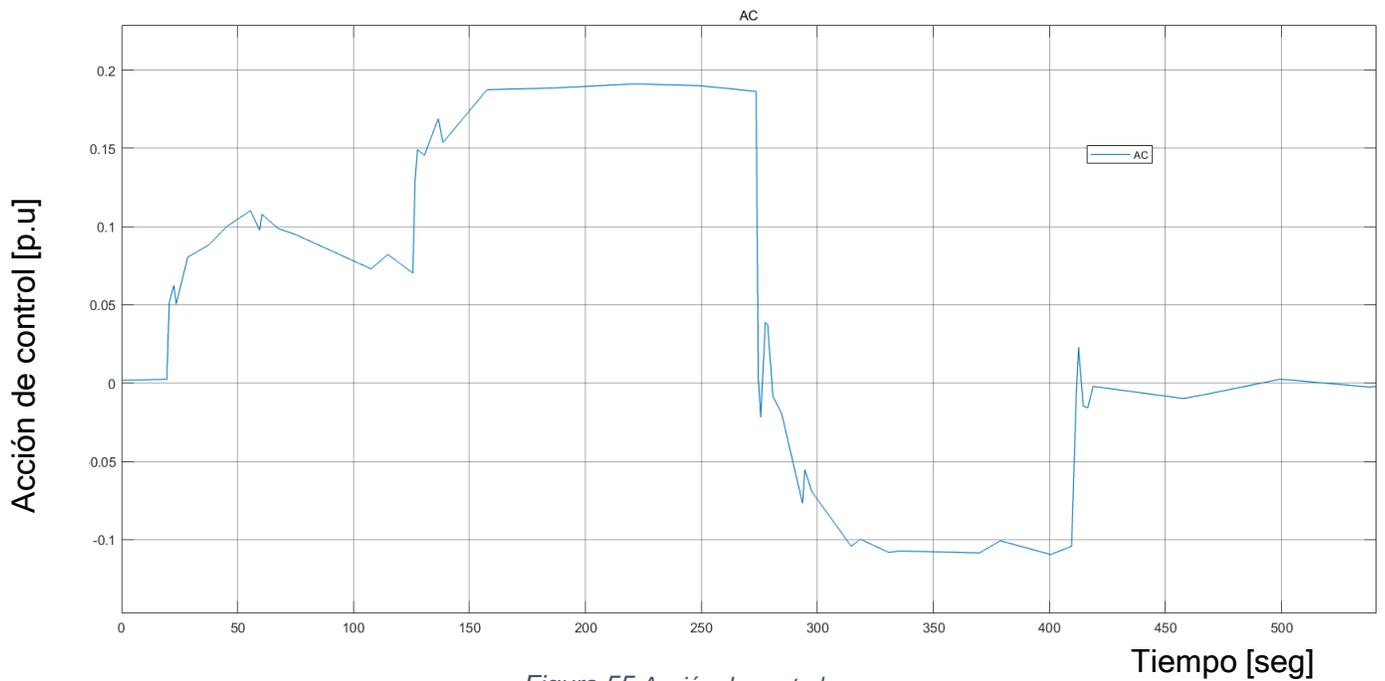


Figura 55 Acción de control.

FUENTE: Autores.

La siguiente grafica muestra la respuesta transitoria del controlador ante variaciones de Voltaje. Donde se observa que se demora en volver al SP ante las perturbaciones de voltaje Las perturbaciones evidencian variando la resistencia de campo en 5 ohm. El numero 1 indica donde se aplican las perturbaciones

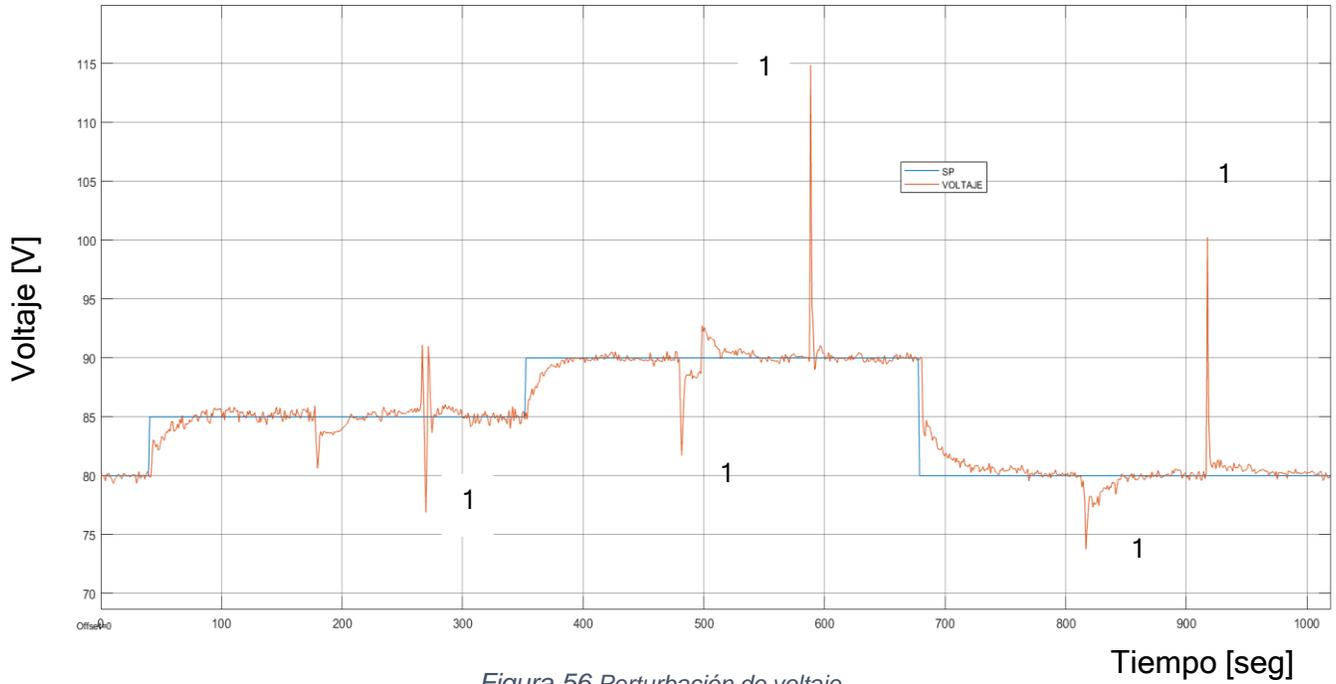


Figura 56 Perturbación de voltaje.

FUENTE: Autores.

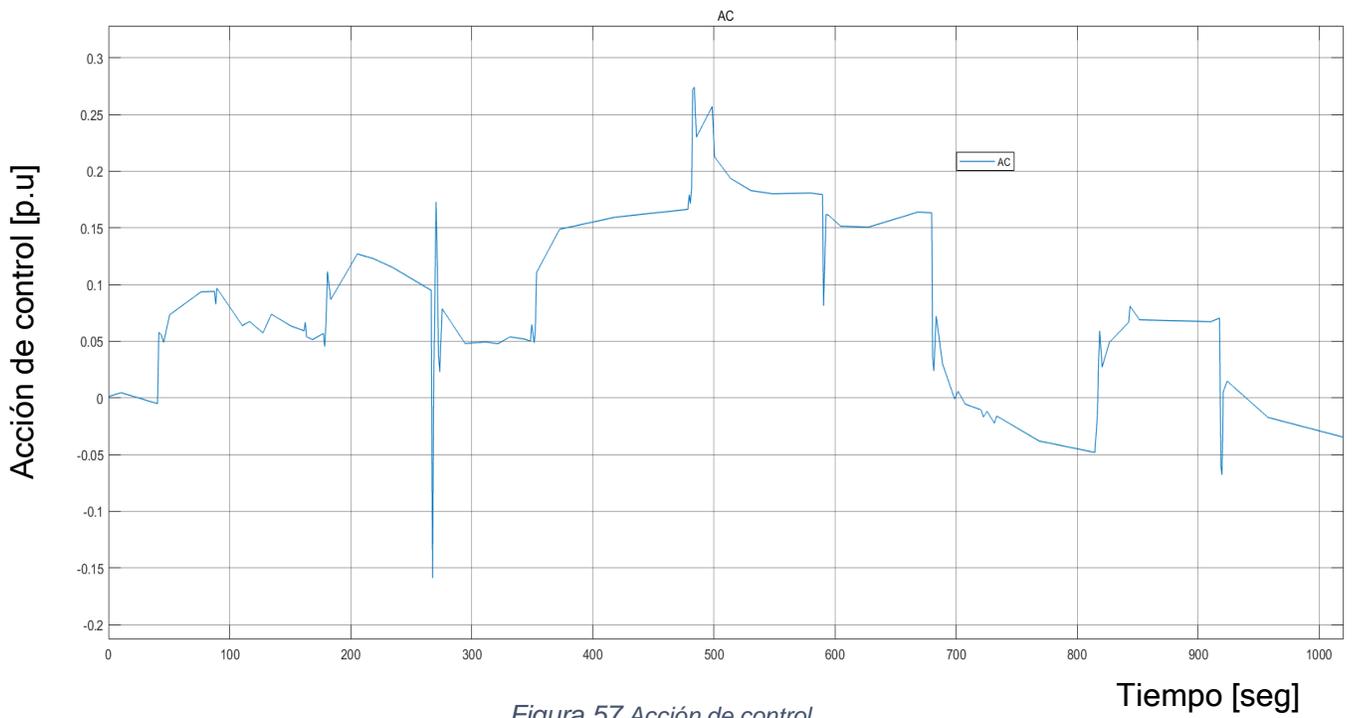


Figura 57 Acción de control.

FUENTE: Autores.

La siguiente grafica muestra la respuesta transitoria del controlador ante perturbaciones de caudal. Las perturbaciones se evidencian variando la apertura de la válvula, el numero 1 indica donde se aplicaron las perturbaciones.

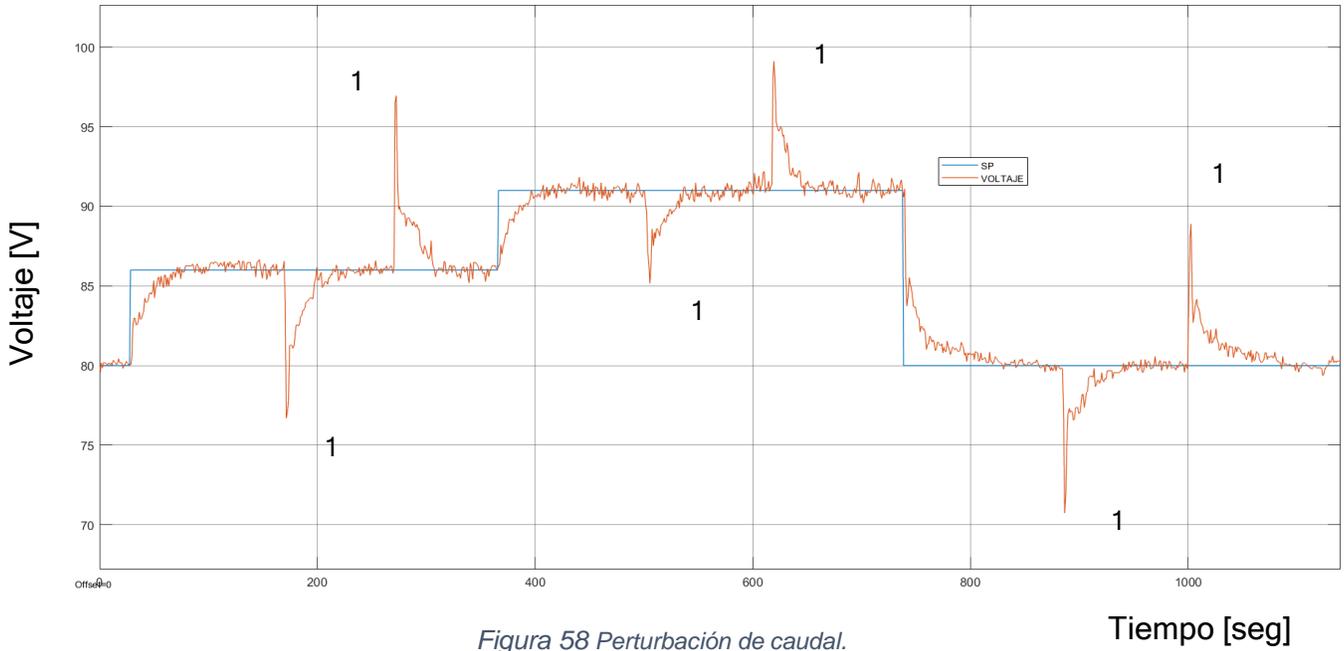


Figura 58 Perturbación de caudal.

FUENTE: Autores.

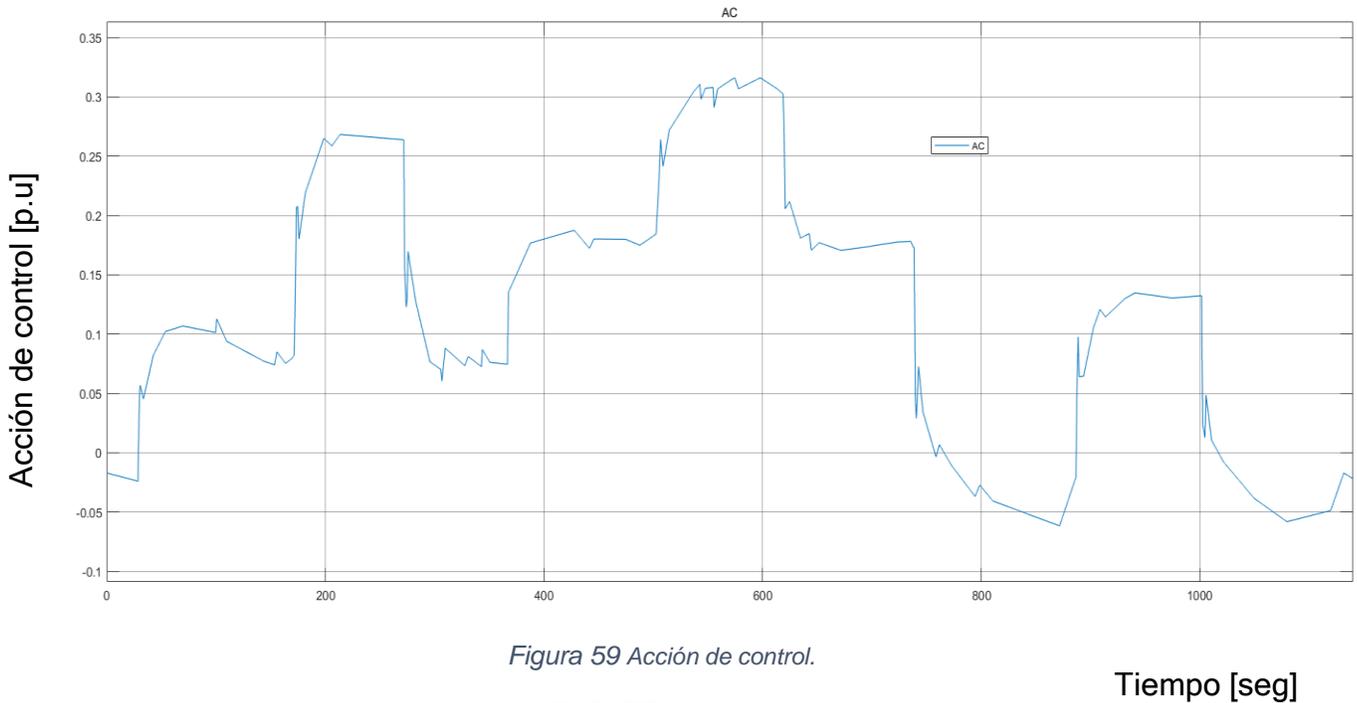


Figura 59 Acción de control.

FUENTE: Autores.

CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

- El mejor controlador para la turbina Francis y Kaplan fueron el de sensibilidad mixta debido a que presenta tiempos de establecimiento menores a los del MPC, los controladores MPC tienen una respuesta más rápida cuando se aplica una perturbación al sistema y logran estabilizarse más rápido.
- El controlador PI en las dos turbinas hidráulicas presenta una respuesta transitoria con un tiempo de establecimiento rápido, pero cuando llega al SP presenta pequeñas oscilaciones, antes perturbaciones el controlador no es rápido para volver al SP.
- Para un mejor estudio del modelo matemático de la turbina Kaplan se debe construir un sistema mecánico que permita la variación de los alabes del rodete, de esta forma se podrán trabajar más puntos de operación.
- La programación de los controladores consume un gasto computacional grande debido a que debe realizar las operaciones en cuestión de segundos, también porque la velocidad de transmisión hace que el proceso sea lento, sin embargo se cuenta con un tiempo de muestreo de 10 ms.
- Como trabajo a futuro se debe diseñar un sistema mecánico que permita cambiar el acople del eje de la turbina con el del generador de forma rápida y automática entre una turbina y la otra debido a que como está compuesta actualmente el cambio de turbinas hay que realizarlo manualmente.
- Para próximos trabajos se debe terminar de instrumentar el banco instalándole más sensores de presión en los manómetros que hace falta, de igual forma se debe instalar un sensor de caudal de tal forma que permita adquirir dicha información para que no se tenga que calibrar con la presión debido a que genera errores en caudales bajos, también se debe instalar un sensor de torque para poder tener todas las variables en el sistema SCADA.
- Como trabajo a futuro se debe diseñar el sistema eléctrico que permita trabajar el variador de frecuencia de la turbina al mismo tiempo con el circuito de excitación, de esta forma se podrá tener enlazado el variador de

frecuencia con Delta V y así poder hacer variaciones de caudal variando la frecuencia de la bomba.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Voltímetro digital escalizable programable multirango MT4W-DV-41 autonics 180423 Colombia. (2021). Retrieved 3 May 2021, from <https://www.viaindustrial.com/producto.asp?codigo=180423>
- [2] Tacómetro digital escalizable MP5W44 autonics 221007 Colombia. (2021). Retrieved 3 May 2021, from <https://www.viaindustrial.com/producto.asp?codigo=221007>
- [3] Sensor de presión industrial amplificado AEP TP3 - Sensing, Sensores de Medida. (2021). Retrieved 3 May 2021, from <https://sensores-de-medida.es/catalogo/sensor-de-presion-industrial-amplificado-aep-tp3/>
- [4] CELDAS DE CARGA TIPO S -SS-100-200-500-1000KG - Zeus Equipos - Balanzas, Básculas Industriales Bogotá, Colombia. (2021). Retrieved 3 May 2021, from <https://www.zeusequipos.com/product/celdas-de-carga-tipo-s-tek-ss-1000/>
- [5] Electromecanicos, E., Solenoides, M., & Paso, M. (2021). Servomotor NEMA 34 86HB250-118, 8.5N•m, 4A-DRIVER MOTOR, SERVOMOTOR, CONTROLADOR MOTOR, MOTOR PASO A PASO-KIT-86HB250-118. Retrieved 3 February 2021, from <https://didacticaselectronicas.com/index.php/elementos-electromecanicos/motores-y-solenoides-1/motores-paso-a-paso/kit-86hb250-118,-servo-motor-industriales-servomotores-motores-paso-a-paso-con-encoder-encoder-motorreductores-motores-hibridos-nema34-nema-34-detail>
- [6] Nonlinear digital simulation model of hydroelectric power unit with Kaplan turbine. (2021). Retrieved 1 February 2021, from <https://ieeexplore.ieee.org/document/1597342>
- [7] Retrieved 5 April 2021, from <http://www.scielo.org.co/pdf/itec/v15n1/1692-1798-itec-15-01-00051.pdf>

- [8] A. tecnologia, «Area tecnologia,» 12 Agosto 2012. [En línea]. Available: <https://www.areatecnologia.com/mecanismos/turbinas-hidraulicas.html>. [Último acceso: 20 Agosto 2019].
- [9] Munoz-Hernandez, G., Mansoor, S., & Jones, D. Modelling and Controlling Hydropower Plants (1st ed.).
- [10] (2021). Retrieved 15 March 2021, from <http://personales.upv.es/asala/DocenciaOnline/material/mxs.pdf>
- [11] Mixed-Sensitivity Loop Shaping- MATLAB & Simulink- MathWorks América Latina. (2021). Retrieved 14 March 2021, from <https://la.mathworks.com/help/robust/gs/using-mixsyn-for-h-infinity-loop-shaping.html>
- [12] Control Predictivo Basado en Modelo - MPC  (Ejemplos y Códigos MATLAB). (2021). Retrieved 15 April 2021, from <https://controlautomaticoeducacion.com/control-predictivo/>
- [13]. Khan, M.J., Bhuyan, G., Iqbal, M.T., Quaicoe, J.E.: Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: a technology status review. Appl. Energy 86, 1823-1835 (2009)
- [14]. Lago, L.I., Ponta, F.L., Chen, L.: Advances and trends in hydrokinetic turbine systems. Energy Sustain. Dev. 14, 287-296 (2010)
- [15]. Güneş, M.S., Kaygusuz, K.: Hydrokinetic energy conversion systems: a technology status review. Renew. Sustain. Energy Rev. 14, 2996-3004 (2010)

ANEXOS

1. DATASHEET DEL Servomotor NEMA34

NEMA 34 Encoder stepper motor 86mm

1.8 degrees 12NM 6A

AB differential signal

Encoder 1000 line



AC18-70V DC24-100V

Common to AC and DC

High performance and low noise

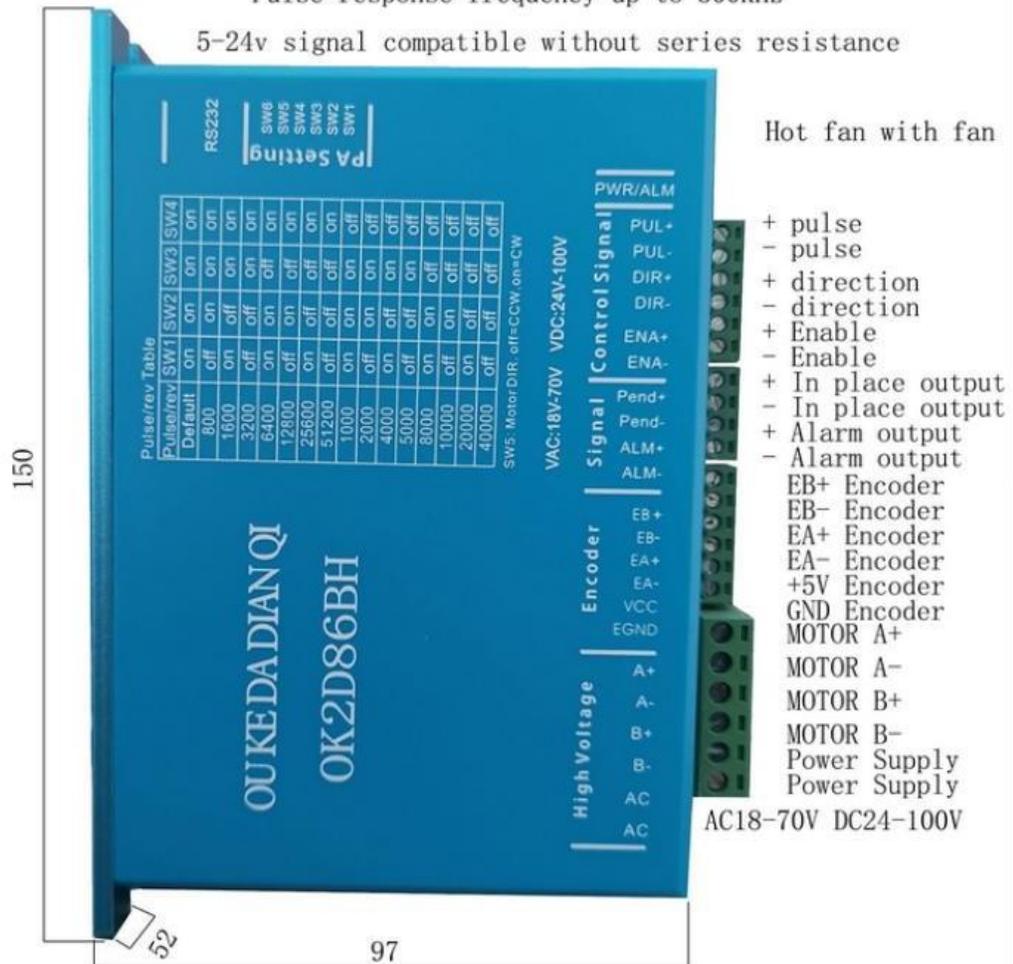
技术规格 Technique Specification		静力矩 (n.m)	电流 (Amps DC)	电阻 (ohms)	电压 (V)	电感 (mH /KHZ)	备注 (remark)
		8.5	6	0.5	3	7	

机械尺寸 Dimension		绕线图 Wiring Diagram																																																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">技术参数 Technique Parameter</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>步距角 Step angle</td> <td>1.8°</td> <td>环境温度 Ambient Temperature</td> <td>-10° +50°</td> </tr> <tr> <td>步距角精度 Step angle Accuracy</td> <td>5%</td> <td>绝缘电阻 Insulation Resistance</td> <td>100MΩ 500VDC</td> </tr> <tr> <td>电阻精度 Resistance Accuracy</td> <td>10%</td> <td>介电强度 Dielectric Strength</td> <td>500VAC</td> </tr> <tr> <td>电感精度 Inductance Accuracy</td> <td>20%</td> <td>绝缘等级 Insulation class</td> <td>B</td> </tr> <tr> <td>温升 Temperature Rise</td> <td>80°C Max</td> <td>重量 Weight</td> <td>4.1Kg</td> </tr> </tbody> </table>		技术参数 Technique Parameter				步距角 Step angle	1.8°	环境温度 Ambient Temperature	-10° +50°	步距角精度 Step angle Accuracy	5%	绝缘电阻 Insulation Resistance	100MΩ 500VDC	电阻精度 Resistance Accuracy	10%	介电强度 Dielectric Strength	500VAC	电感精度 Inductance Accuracy	20%	绝缘等级 Insulation class	B	温升 Temperature Rise	80°C Max	重量 Weight	4.1Kg	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">ENCODER 编码器</th> </tr> <tr> <th>COLOR 颜色</th> <th>DESCRIPTION</th> <th>对应描述</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RED 红</td> <td>+V DC</td> <td>电源</td> </tr> <tr> <td>BLACK 黑</td> <td>GROUND</td> <td>接地</td> </tr> <tr> <td>YELLOW 黄</td> <td>CHANNEL A+</td> <td>通道</td> </tr> <tr> <td>GREEN 绿</td> <td>CHANNEL A</td> <td>通道</td> </tr> <tr> <td>BLUE 蓝</td> <td>CHANNEL B+</td> <td>通道</td> </tr> <tr> <td>WHITE 白</td> <td>CHANNEL B-</td> <td>通道</td> </tr> </tbody> </table>		ENCODER 编码器			COLOR 颜色	DESCRIPTION	对应描述	RED 红	+V DC	电源	BLACK 黑	GROUND	接地	YELLOW 黄	CHANNEL A+	通道	GREEN 绿	CHANNEL A	通道	BLUE 蓝	CHANNEL B+	通道	WHITE 白	CHANNEL B-	通道
技术参数 Technique Parameter																																																			
步距角 Step angle	1.8°	环境温度 Ambient Temperature	-10° +50°																																																
步距角精度 Step angle Accuracy	5%	绝缘电阻 Insulation Resistance	100MΩ 500VDC																																																
电阻精度 Resistance Accuracy	10%	介电强度 Dielectric Strength	500VAC																																																
电感精度 Inductance Accuracy	20%	绝缘等级 Insulation class	B																																																
温升 Temperature Rise	80°C Max	重量 Weight	4.1Kg																																																
ENCODER 编码器																																																			
COLOR 颜色	DESCRIPTION	对应描述																																																	
RED 红	+V DC	电源																																																	
BLACK 黑	GROUND	接地																																																	
YELLOW 黄	CHANNEL A+	通道																																																	
GREEN 绿	CHANNEL A	通道																																																	
BLUE 蓝	CHANNEL B+	通道																																																	
WHITE 白	CHANNEL B-	通道																																																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">型号 Type</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>OK86STH115EC-1000</td> <td colspan="2">技术规格书</td> </tr> </tbody> </table>		型号 Type			OK86STH115EC-1000	技术规格书		<p style="text-align: center;">常州市鸥柯达电器有限公司</p>																																											
型号 Type																																																			
OK86STH115EC-1000	技术规格书																																																		

NEMA 34 Encoder motor step driver 86mm

Pulse response frequency up to 300kHz

5-24v signal compatible without series resistance



Subdivide 16 gear settings (400-51200), High performance and low noise
special subdivide can be changed according to customer requirements

2. CODIGOS EN CONTROL STUDIO - DELTA V

CODIGO CONTROLADOR TECNICA SENSIBILIDAD MIXTA TURBINA KAPLAN

A11 := 0.999989930025641;
A12 := -0.00003201591457495299;
A13 := -0.00001287533636697256;
A14 := 0.00001315153990878731;
A15 := 0.000001544305049873751;
A21 := -0.00003201591457496442;
A22 := 0.988757368711688;
A23 := -0.011466424092526;
A24 := 0.009473733462554;

```

A25 := 0.001071008325205;
A31 := 0.00001287533636698083;
A32 := 0.011466424092527;
A33 := 0.991081329872237;
A34 := 0.016073156583245;
A35 := 0.002223177569218;
A41 := -0.00001315153990879713;
A42 := -0.009473733462560;
A43 := 0.016073156583242;
A44 := 0.930311206365884;
A45 := -0.020331591273967;
A51 := 0.000001544305049862607;
A52 := 0.001071008325202;
A53 := -0.002223177569208;
A54 := 0.020331591273929;
A55 := 0.992505826317743;

```

```

B11 := 0.001990493620437;
B21 := 0.003171372565841;
B31 := -0.001271814550682;
B41 := 0.001299661552929;
B51 := -0.0001526244713949409;

```

```

C11 := 0.199053694940415;
C12 := 0.317517546725832;
C13 := 0.130694940771845;
C14 := -0.137219855615704;
C15 := -0.017065714627598;

```

```

En := 'IN1.CV'-'IN2.CV';

```

```

Xest1 := (A11*Xest1_1 + A12*Xest2_1 + A13*Xest3_1 + A14*Xest4_1 +
A15*Xest5_1) + (B11*En);
Xest2 := (A21*Xest1_1 + A22*Xest2_1 + A23*Xest3_1 + A24*Xest4_1 +
A25*Xest5_1) + (B21*En);
Xest3 := (A31*Xest1_1 + A32*Xest2_1 + A33*Xest3_1 + A34*Xest4_1 +
A35*Xest5_1) + (B31*En);
Xest4 := (A41*Xest1_1 + A42*Xest2_1 + A43*Xest3_1 + A44*Xest4_1 +
A45*Xest5_1) + (B41*En);
Xest5 := (A51*Xest1_1 + A52*Xest2_1 + A53*Xest3_1 + A54*Xest4_1 +
A55*Xest5_1) + (B51*En);

```

```

U := (C11*Xest1_1 + C12*Xest2_1 + C13*Xest3_1 + C14*Xest4_1 + C15*Xest5_1);

```

```

IF (U <= -0.5) THEN
'OUT1.CV' := -0.5;
END_IF;

```

```
IF (U > -0.5 AND U < 0.5) THEN
'OUT1.CV' := U;
END_IF;
```

```
IF (U >= 0.5) THEN
'OUT1.CV' := 0.5;
END_IF;
```

```
'OUT2.CV' := En;
```

```
Xest1_1 := Xest1;
Xest2_1 := Xest2;
Xest3_1 := Xest3;
Xest4_1 := Xest4;
Xest5_1 := Xest5;
```

CODIGO CONTROLADOR MPC TURBINA KAPLAN

```
Lk1 := 0.0003296040610550694;
Lk2 := -0.000000000000000000004487968306242107;
Lk3 := 0.00400291956072;
```

```
C11 := 18.400000000000000;
C12 := 0;
C13 := 0;
```

```
GI11 := 0.800328073821793;
GI12 := 0.00006073843473235697;
GI13 := 0.016647071024067;
GI21 := 0;
GI22 := 0;
GI23 := 0;
GI31 := -1.664707102412892;
GI32 := 0.004155666716733;
GI33 := 1.137937208261915;
```

```
HI1 := 0.0003802480658892585;
HI2 := -0.013323864931979;
HI3 := 0.048307964323168;
```

```
Omegainv11 := 0.000004272938557713170;
Omegainv12 := -0.000004532573066485910;
Omegainv21 := -0.000004532573066485910;
Omegainv22 := 0.000005087258126904681;
```

Psi11 := -177913202.8123708;
Psi12 := 80651.22157014450;
Psi13 := 22081865.8970887;
Psi14 := 30313.37198684338;
Psi21 := -162233317.6327790;
Psi22 := 73432.30472739050;
Psi23 := 20105361.21070284;
Psi24 := 26712.60293734847;

L0t11 := 0.435889894354067;
L0t12 := -0.392300904918661;

M_act11 := 0.003049731722546;
M_act12 := -0.002744758550291;

E11 := 14.726036558320986;
E12 := 0.001117587199075;
E13 := 0.306306106842836;
E14 := 1;

u_min := -0.5;
u_max := 0.5;
deltau_min := -0.3;
deltau_max := 0.3;
y_min := -25;
y_max := 25;
y_bar_min := y_min - 'IN1.CV';
y_bar_max := y_max - 'IN1.CV';

Xest1 := 'IN2.CV'*Lk1+u1*HI1+(Xest1_1*(GI11-Lk1*C11))+(Xest2_1*(GI12-Lk1*C12))+(Xest3_1*(GI13-Lk1*C13));
Xest2 := 'IN2.CV'*Lk2+u1*HI2+(Xest1_1*(GI21-Lk2*C11))+(Xest2_1*(GI22-Lk2*C12))+(Xest3_1*(GI23-Lk2*C13));
Xest3 := 'IN2.CV'*Lk3+u1*HI3+(Xest1_1*(GI31-Lk3*C11))+(Xest2_1*(GI32-Lk3*C12))+(Xest3_1*(GI33-Lk3*C13));

Xf11 := Xest1-Xest1_1;
Xf21 := Xest2-Xest2_1;
Xf31 := Xest3-Xest3_1;
Xf41 := 'IN2.CV'-'IN1.CV';

```

eta11          :=          -Xf11*(Omegainv11*Psi11+Omegainv12*Psi21)-
Xf21*(Omegainv11*Psi12+Omegainv12*Psi22)-
Xf31*(Omegainv11*Psi13+Omegainv12*Psi23)-
Xf41*(Omegainv11*Psi14+Omegainv12*Psi24);
eta21          :=          -Xf11*(Omegainv21*Psi11+Omegainv22*Psi21)-
Xf21*(Omegainv21*Psi12+Omegainv22*Psi22)-
Xf31*(Omegainv21*Psi13+Omegainv22*Psi23)-
Xf41*(Omegainv21*Psi14+Omegainv22*Psi24);

```

```

deltau := L0t11*eta11+L0t12*eta21;
beta:=
M_act11*eta11+M_act12*eta21+E11*Xf11+E12*Xf21+E13*Xf31+E14*Xf41;

```

```

IF (beta<y_bar_min) THEN

```

```

M_act11_1 := -M_act11;
M_act12_1 := -M_act12;

```

```

lambda          :=          -(E11*Xf11-M_act11_1*eta11-M_act12_1*eta21-
y_bar_min+E12*Xf21+E13*Xf31+E14*Xf41)/(M_act11_1*(M_act11_1*Omegainv11
+M_act12_1*Omegainv21)+M_act12_1*(M_act11_1*Omegainv12+M_act12_1*Om
egainv22));

```

```

eta11          :=          -
Omegainv11*(Psi11*Xf11+Psi12*Xf21+Psi13*Xf31+Psi14*Xf41+M_act11_1*lambda)
-

```

```

Omegainv12*(Psi21*Xf11+Psi22*Xf21+Psi23*Xf31+Psi24*Xf41+M_act12_1*lambda)
a);

```

```

eta21          :=          -
Omegainv21*(Psi11*Xf11+Psi12*Xf21+Psi13*Xf31+Psi14*Xf41+M_act11_1*lambda)
-

```

```

Omegainv22*(Psi21*Xf11+Psi22*Xf21+Psi23*Xf31+Psi24*Xf41+M_act12_1*lambda)
a);

```

```

deltau := L0t11*eta11+L0t12*eta21;
END_IF;

```

```

IF (beta>y_bar_max) THEN

```

```

lambda          :=          (M_act11*eta11-
y_bar_max+M_act12*eta21+E11*Xf11+E12*Xf21+E13*Xf31+E14*Xf41)/(M_act11*
(M_act11*Omegainv11+M_act12*Omegainv21)+M_act12*(M_act11*Omegainv12+
M_act12*Omegainv22));

```

```

eta11          :=          -
Omegainv11*(Psi11*Xf11+Psi12*Xf21+Psi13*Xf31+Psi14*Xf41+M_act11*lambda)-
Omegainv12*(Psi21*Xf11+Psi22*Xf21+Psi23*Xf31+Psi24*Xf41+M_act12*lambda);

```

```

eta21          :=          -
Omegainv21*(Psi11*Xf11+Psi12*Xf21+Psi13*Xf31+Psi14*Xf41+M_act11*lambda)-
Omegainv22*(Psi21*Xf11+Psi22*Xf21+Psi23*Xf31+Psi24*Xf41+M_act12*lambda);

```

```
deltau := L0t11*eta11+L0t12*eta21;  
END_IF;
```

```
IF (deltau>deltau_max) THEN  
deltau := deltau_max;  
END_IF;
```

```
IF (deltau<deltau_min) THEN  
deltau := deltau_min;  
END_IF;
```

```
'OUT1.CV' := u1+deltau;
```

```
IF ('OUT1.CV'>u_max) THEN  
deltau := u_max-u1;  
'OUT1.CV' := u_max;  
END_IF;
```

```
IF ('OUT1.CV'<u_min) THEN  
deltau := u_min-u1;  
'OUT1.CV' := u_min;  
END_IF;
```

```
Xest1_1 := Xest1;  
Xest2_1 := Xest2;  
Xest3_1 := Xest3;  
u1 := 'OUT1.CV';
```

CODIGO CONTROLADOR TECNICA SENSIBILIDAD MIXTA TURBINA FRANCIS

```
A11 := 0.999979088081435;  
A12 := -0.00001015133221951813;  
A13 := -0.00005697385355053589;  
A14 := 0.00003589221145681114;  
A21 := 0.00001015133221951358;  
A22 := 0.999999979201795;  
A23 := -0.000001943253949569434;  
A24 := 0.000001205629741862587;  
A31 := -0.00005697385355059222;  
A32 := 0.000001943253949573877;  
A33 := 0.99425988922231;  
A34 := 0.007451176979266;  
A41 := -0.00003589221145550817;  
A42 := 0.000001205629741849768;  
A43 := -0.007454176979066;  
A44 := 0.935231337006397;
```

```
B11 := -0.002311166157072;  
B21 := 0.00006821455472767414;  
B31 := -0.003169840484854;  
B41 := -0.001982748797619;
```

```
C11 := -0.231124283067687;  
C12 := -0.006822446454357;  
C13 := -0.317122181037294;  
C14 := 0.206227427031250;
```

```
En := 'IN1.CV'-'IN2.CV';
```

```
Xest1 := (A11*Xest1_1 + A12*Xest2_1 + A13*Xest3_1 + A14*Xest4_1) + (B11*En);  
Xest2 := (A21*Xest1_1 + A22*Xest2_1 + A23*Xest3_1 + A24*Xest4_1) + (B21*En);  
Xest3 := (A31*Xest1_1 + A32*Xest2_1 + A33*Xest3_1 + A34*Xest4_1) + (B31*En);  
Xest4 := (A41*Xest1_1 + A42*Xest2_1 + A43*Xest3_1 + A44*Xest4_1) + (B41*En);
```

```
U := (C11*Xest1_1 + C12*Xest2_1 + C13*Xest3_1 + C14*Xest4_1);
```

```
IF (U <= -0.5) THEN  
'OUT1.CV' := -0.5;  
END_IF;
```

```
IF (U > -0.5 AND U < 0.5) THEN  
'OUT1.CV' := U;  
END_IF;
```

```
IF (U >= 0.5) THEN  
'OUT1.CV' := 0.5;  
END_IF;
```

```
'OUT2.CV' := En;
```

```
Xest1_1 := Xest1;  
Xest2_1 := Xest2;  
Xest3_1 := Xest3;  
Xest4_1 := Xest4;
```

CODIGO CONTROLADOR MPC TURBINA FRANCIS

```
LK1 := 0.002240486773741;  
LK2 := -0.00003058423384185720;  
LK3 := 0.025975976858723;
```

C11 := 18.400000000000000;
C12 := 0;
C13 := 0;

GI11 := -0.000007631764645;
GI12 := 1.363041005970612;
GI13 := 0.085913967024263;
GI21 := 0;
GI22 := 0.467435294038179;
GI23 := 0;
GI31 := -0.000088491386035;
GI32 := 15.847184502892656;
GI33 := 0.996184549060953;

HI1 := -0.016237574081667;
HI2 := 0.012095411939801;
HI3 := 0.188556180317038;

Omegainv11 := 0.000007388909159219261;
Omegainv12 := -0.000007814074706847140;
Omegainv21 := -0.000007814074706847140;
Omegainv22 := 0.000008412013378716522;

Psi11 := -941.8669663754642;
Psi12 := 315861593.7151539;
Psi13 := 10602990.42900117;
Psi14 := 45940.79460900331;
Psi21 := -878.5074283735478;
Psi22 := 294660495.9227455;
Psi23 := 9889725.606044782;
Psi24 := 41729.03740897995;

L0t11 := 0.435889894354067;
L0t12 := -0.392300904918661;

M_act11 := -0.130231417898846;
M_act12 := 0.117208276108961;

E11 := -0.000140424469473;
E12 := 25.079954509859267;
E13 := 1.580816993246446;
E14 := 1;

u_min := -0.5;
u_max := 0.5;
deltau_min := -0.3;
deltau_max := 0.3;

```

y_min := -25;
y_max := 25;
y_bar_min := y_min - 'IN1.CV';
y_bar_max := y_max - 'IN1.CV';

Xest1 := 'IN2.CV'*LK1+u1*HI1+(Xest1_1*(GI11-LK1*C11))+(Xest2_1*(GI12-
LK1*C12))+(Xest3_1*(GI13-LK1*C13));
Xest2 := 'IN2.CV'*LK2+u1*HI2+(Xest1_1*(GI21-LK2*C11))+(Xest2_1*(GI22-
LK2*C12))+(Xest3_1*(GI23-LK2*C13));
Xest3 := 'IN2.CV'*LK3+u1*HI3+(Xest1_1*(GI31-Lk3*C11))+(Xest2_1*(GI32-
LK3*C12))+(Xest3_1*(GI33-LK3*C13));

Xf11 := Xest1-Xest1_1;
Xf21 := Xest2-Xest2_1;
Xf31 := Xest3-Xest3_1;
Xf41 := 'IN2.CV'-'IN1.CV';

eta11 := -Xf11*(Omegainv11*Psi11+Omegainv12*Psi21)-
Xf21*(Omegainv11*Psi12+Omegainv12*Psi22)-
Xf31*(Omegainv11*Psi13+Omegainv12*Psi23)-
Xf41*(Omegainv11*Psi14+Omegainv12*Psi24);
eta21 := -Xf11*(Omegainv21*Psi11+Omegainv22*Psi21)-
Xf21*(Omegainv21*Psi12+Omegainv22*Psi22)-
Xf31*(Omegainv21*Psi13+Omegainv22*Psi23)-
Xf41*(Omegainv21*Psi14+Omegainv22*Psi24);

deltau := L0t11*eta11+L0t12*eta21;
beta :=
M_act11*eta11+M_act12*eta21+E11*Xf11+E12*Xf21+E13*Xf31+E14*Xf41;

IF (beta<y_bar_min) THEN

M_act11_1 := -M_act11;
M_act12_1 := -M_act12;

lambda := -(E11*Xf11-M_act11_1*eta11-M_act12_1*eta21-
y_bar_min+E12*Xf21+E13*Xf31+E14*Xf41)/(M_act11_1*(M_act11_1*Omegainv11
+M_act12_1*Omegainv21)+M_act12_1*(M_act11_1*Omegainv12+M_act12_1*Om
egainv22));
eta11 := -
Omegainv11*(Psi11*Xf11+Psi12*Xf21+Psi13*Xf31+Psi14*Xf41+M_act11_1*lambda)-
Omegainv12*(Psi21*Xf11+Psi22*Xf21+Psi23*Xf31+Psi24*Xf41+M_act12_1*lambda);
eta21 := -
Omegainv21*(Psi11*Xf11+Psi12*Xf21+Psi13*Xf31+Psi14*Xf41+M_act11_1*lambda)-

```

```

Omegainv22*(Psi21*Xf11+Psi22*Xf21+Psi23*Xf31+Psi24*Xf41+M_act12_1*lambda);
deltau := L0t11*eta11+L0t12*eta21;
END_IF;

```

```

IF (beta>y_bar_max) THEN

```

```

lambda := (M_act11*eta11-
y_bar_max+M_act12*eta21+E11*Xf11+E12*Xf21+E13*Xf31+E14*Xf41)/(M_act11_1*(M_act11_1*Omegainv11+M_act12_1*Omegainv21)+M_act12_1*(M_act11_1*Omegainv12+M_act12_1*Omegainv22));
eta11 := Omegainv11*(Psi11*Xf11+Psi12*Xf21+Psi13*Xf31+Psi14*Xf41+M_act11_1*lambda)-
Omegainv12*(Psi21*Xf11+Psi22*Xf21+Psi23*Xf31+Psi24*Xf41+M_act12_1*lambda);
eta21 := Omegainv21*(Psi11*Xf11+Psi12*Xf21+Psi13*Xf31+Psi14*Xf41+M_act11_1*lambda)-
Omegainv22*(Psi21*Xf11+Psi22*Xf21+Psi23*Xf31+Psi24*Xf41+M_act12_1*lambda);
deltau := L0t11*eta11+L0t12*eta21;
END_IF;

```

```

IF (deltau>deltau_max) THEN
deltau := deltau_max;
END_IF;

```

```

IF (deltau<deltau_min) THEN
deltau := deltau_min;
END_IF;

```

```

'OUT1.CV' := (u1+deltau);

```

```

IF ('OUT1.CV'>u_max) THEN
deltau := u_max-u1;
'OUT1.CV' := u_max;
END_IF;

```

```

IF ('OUT1.CV'<u_min) THEN
deltau := u_min-u1;
'OUT1.CV' := u_min;
END_IF;

```

```

Xest1_1 := Xest1;
Xest2_1 := Xest2;
Xest3_1 := Xest3;

```

```
u1 := 'OUT1.CV';
```

CODIGO ARDUINO MOTOR

```
#define DEBUG(a) Serial.println(a);
```

```
int a = 0;
```

```
int b = 0;
```

```
int c = 0;
```

```
int d = 0;
```

```
float xn_1 = 0;
```

```
float xn_2 = 0;
```

```
float xn_3 = 0;
```

```
float xn_4 = 0;
```

```
float yn_1 = 0;
```

```
float yn_2 = 0;
```

```
float yn_3 = 0;
```

```
float yn_4 = 0;
```

```
float y;
```

```
float entrada_1 = 0;
```

```
float entrada_2 = 0;
```

```
float entrada_3 = 0;
```

```
float entrada_4 = 0;
```

```
float salida_1 = 0;
```

```

float salida_2 = 0;

float salida_3 = 0;

float salida_4 = 0;

void setup() {

    pinMode(1,INPUT);

    pinMode (9,OUTPUT);

    pinMode (8,OUTPUT);

    pinMode (13,OUTPUT);

    Serial.begin(9600);

}

void loop() {

    a = analogRead(1);

    yn_1 = 1.822694925196308;

    yn_2 = -0.837181651256023;

    xn_1 = 0.003621681514929;

    xn_2 = 0.007243363029857;

    xn_3 = 0.003621681514929;

    y =(yn_2 * salida_2) + (yn_1 * salida_1) + (xn_1 * entrada_1) + (xn_2 * entrada_2)
+ (xn_3 * entrada_3) ;

```

```
entrada_2 = entrada_1;
```

```
entrada_1 = a;
```

```
salida_3 = salida_2;
```

```
salida_2 = salida_1;
```

```
salida_1 = y;
```

```
b = map(y,0,1023,0,5600);
```

```
if (b>c){
```

```
    digitalWrite(8,LOW);
```

```
    d = b - c;
```

```
    for(int i=0; i<=d; i++){
```

```
        digitalWrite(9,HIGH);
```

```
        delayMicroseconds(400);
```

```
        digitalWrite(9,LOW);
```

```
        delayMicroseconds(400);
```

```
    }
```

```
    c=c+d;
```

```
    d = b - c;
```

```
}
```

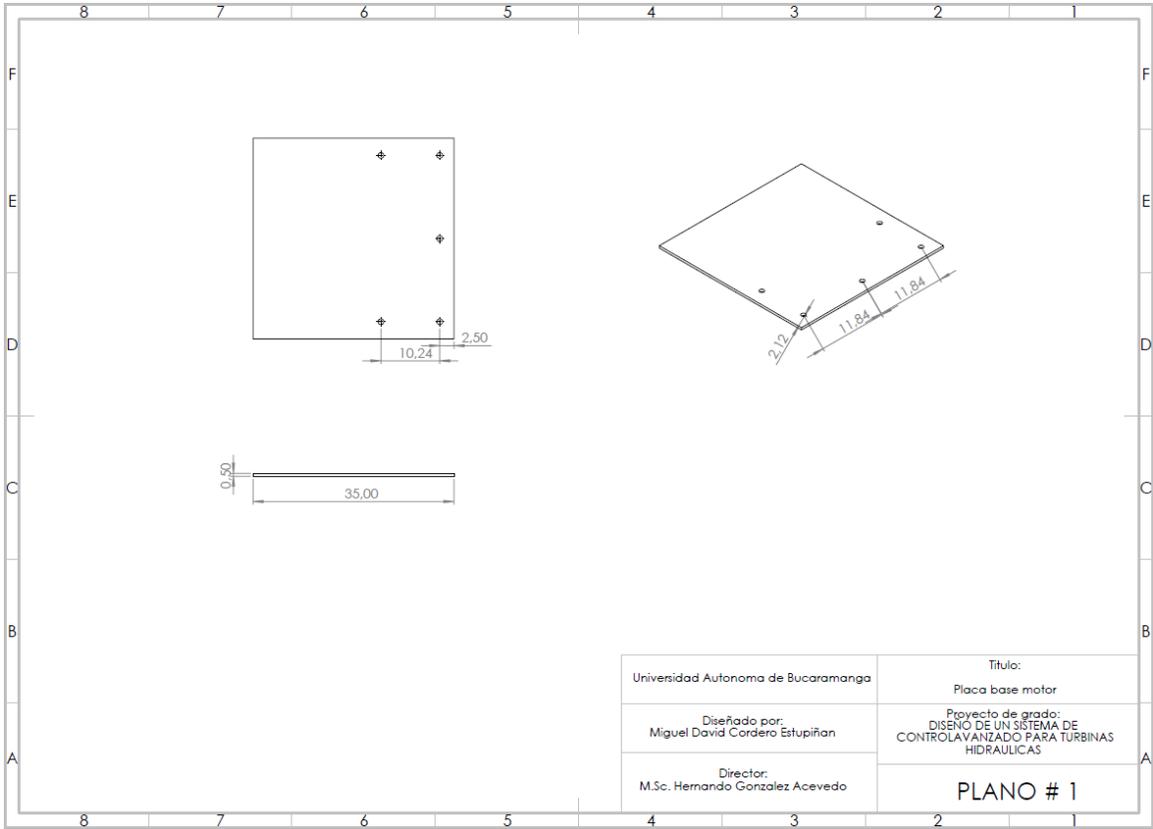
```
if (b<c){
```

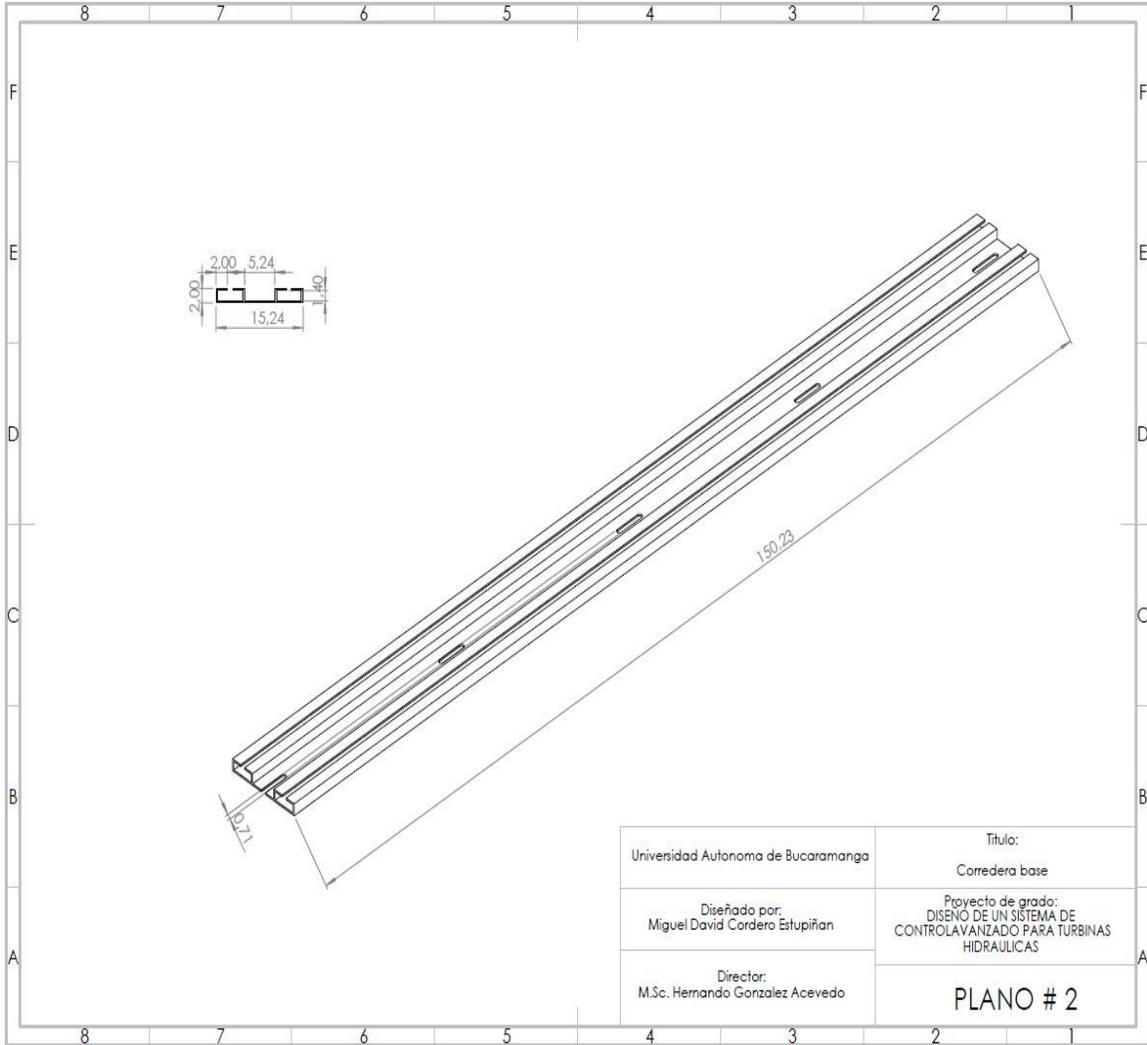
```
    d=0;
```

```
digitalWrite(8,HIGH);  
  
d = abs(b - c);  
  
for(int i=0; i<=d; i++){  
  
digitalWrite(9,HIGH);  
  
delayMicroseconds(400);  
  
digitalWrite(9,LOW);  
  
delayMicroseconds(400);  
  
}  
  
c=c-d;  
  
d = abs(b - c);  
  
}
```

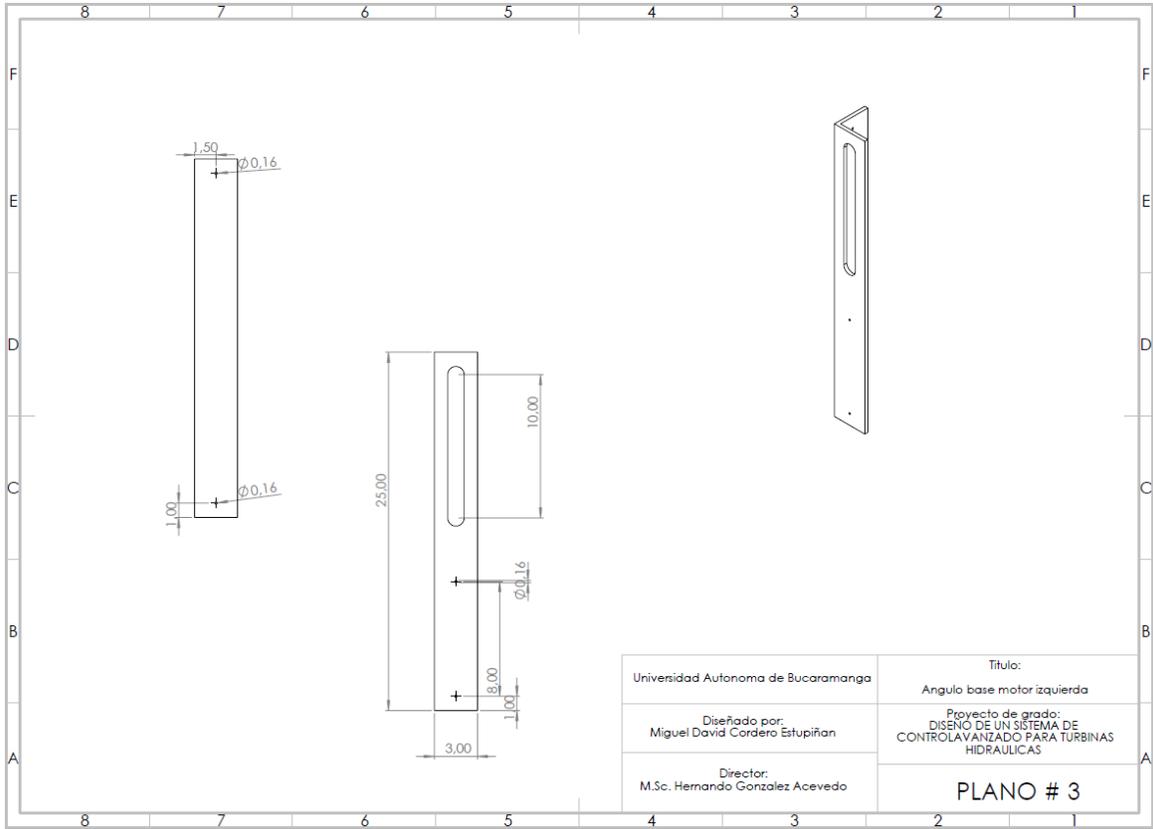
```
Serial.print(b);  
  
Serial.print(" ");  
  
Serial.print(c);  
  
Serial.print(" ");  
  
Serial.println(d);  
  
}
```

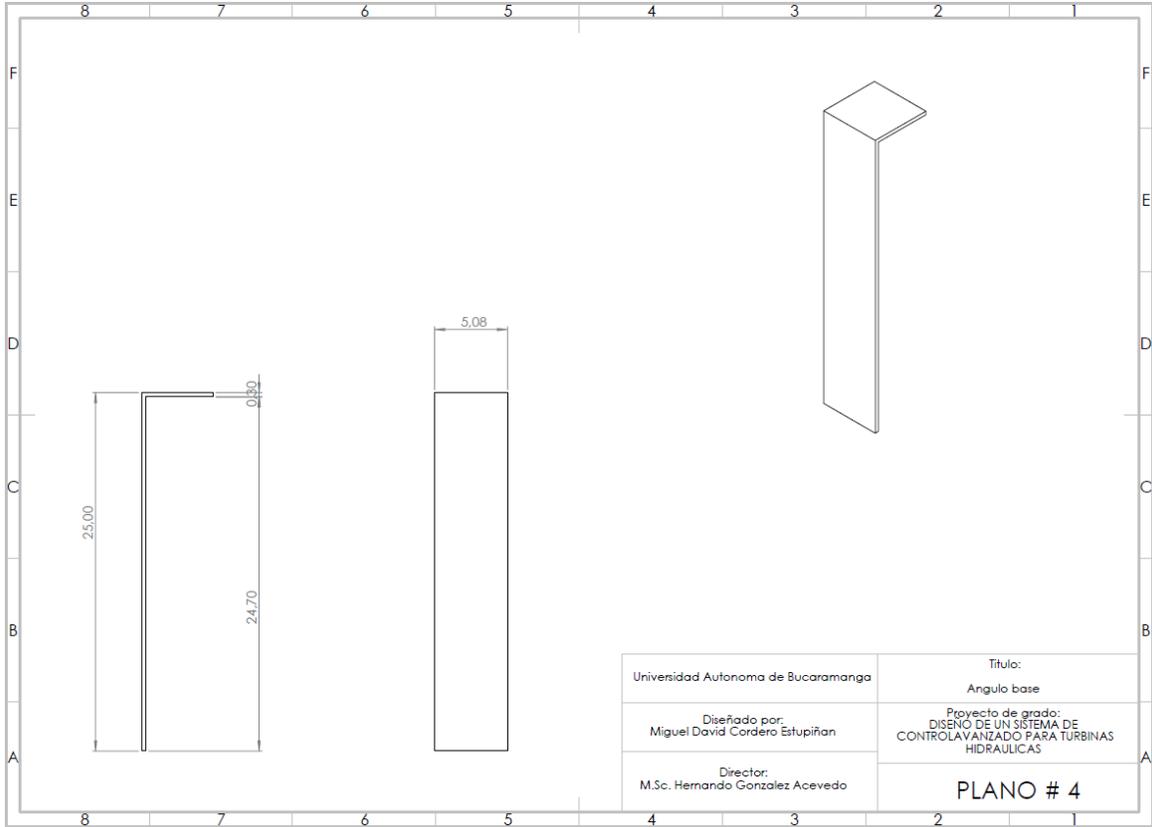
3. PLANOS SISTEMA MECANICO

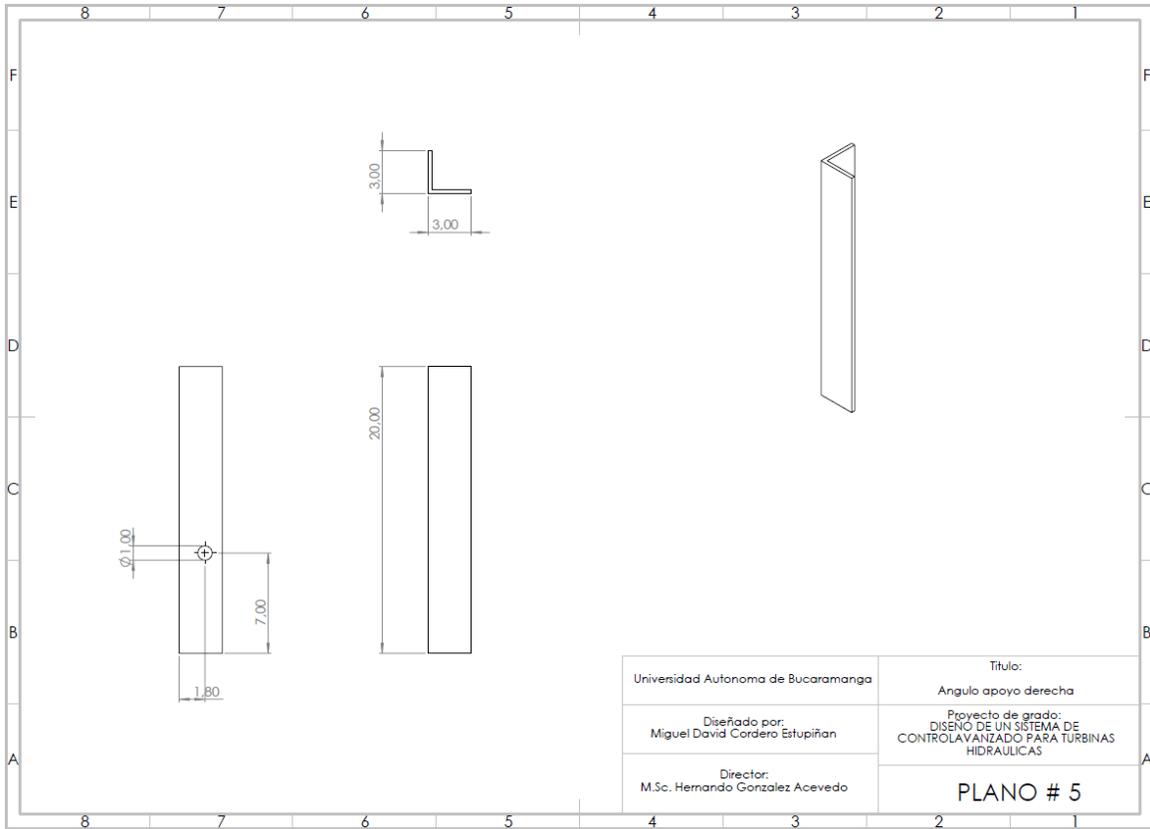


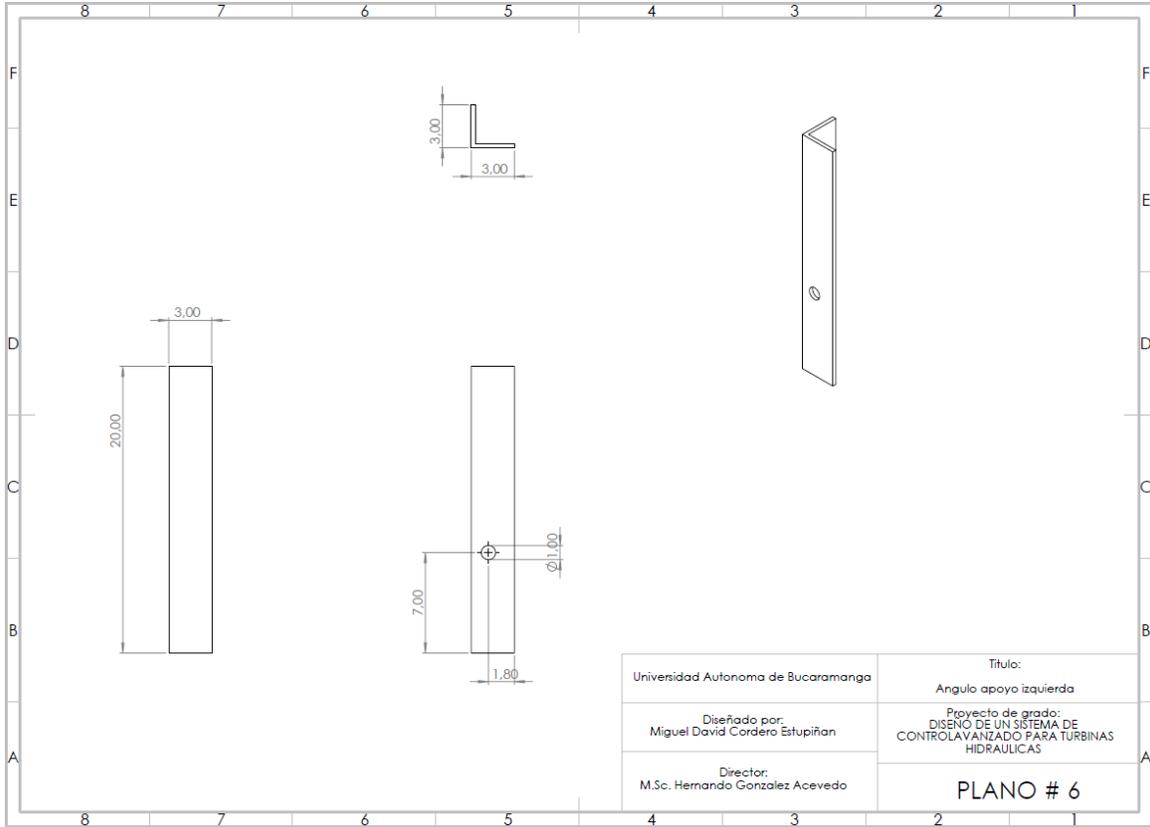


Universidad Autonoma de Bucaramanga	Titulo: Corredera base
Diseñado por: Miguel David Cordero Estupiñan	Proyecto de grado: DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL AVANZADO PARA TURBINAS HIDRAULICAS
Director: M.Sc. Hernando Gonzalez Acevedo	PLANO # 2

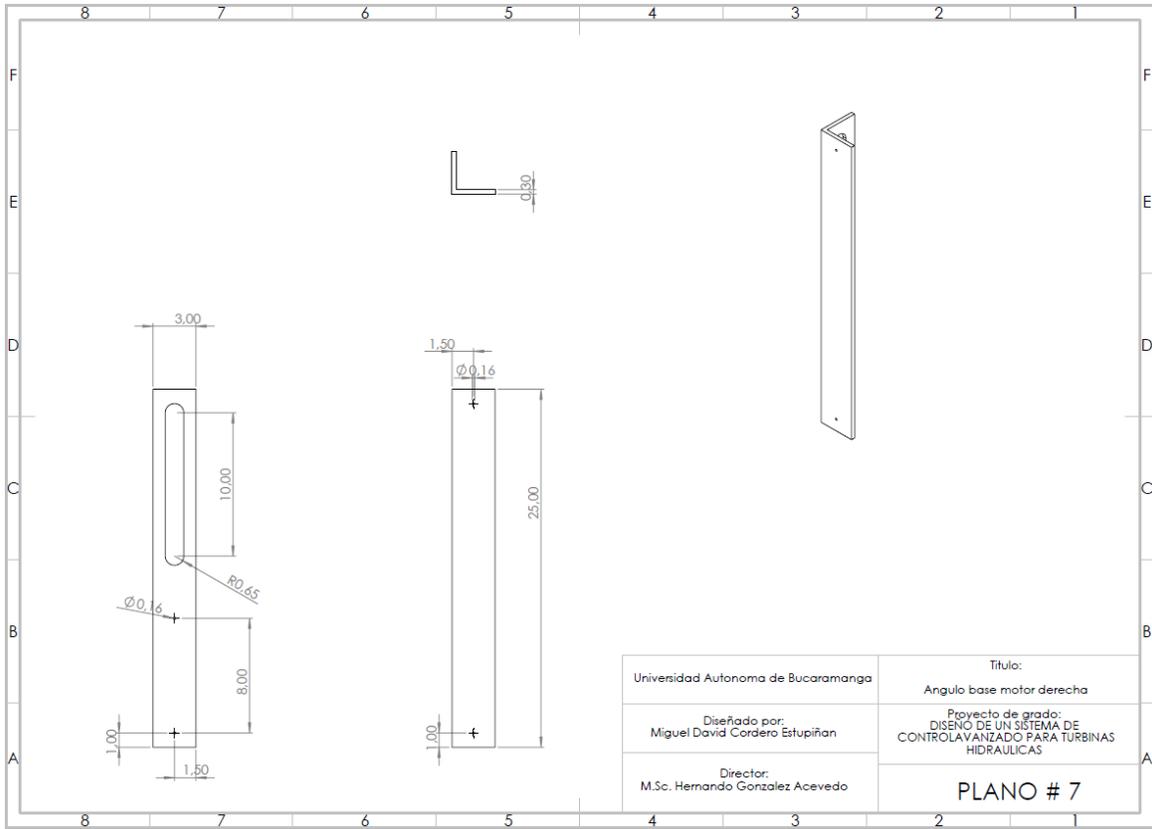


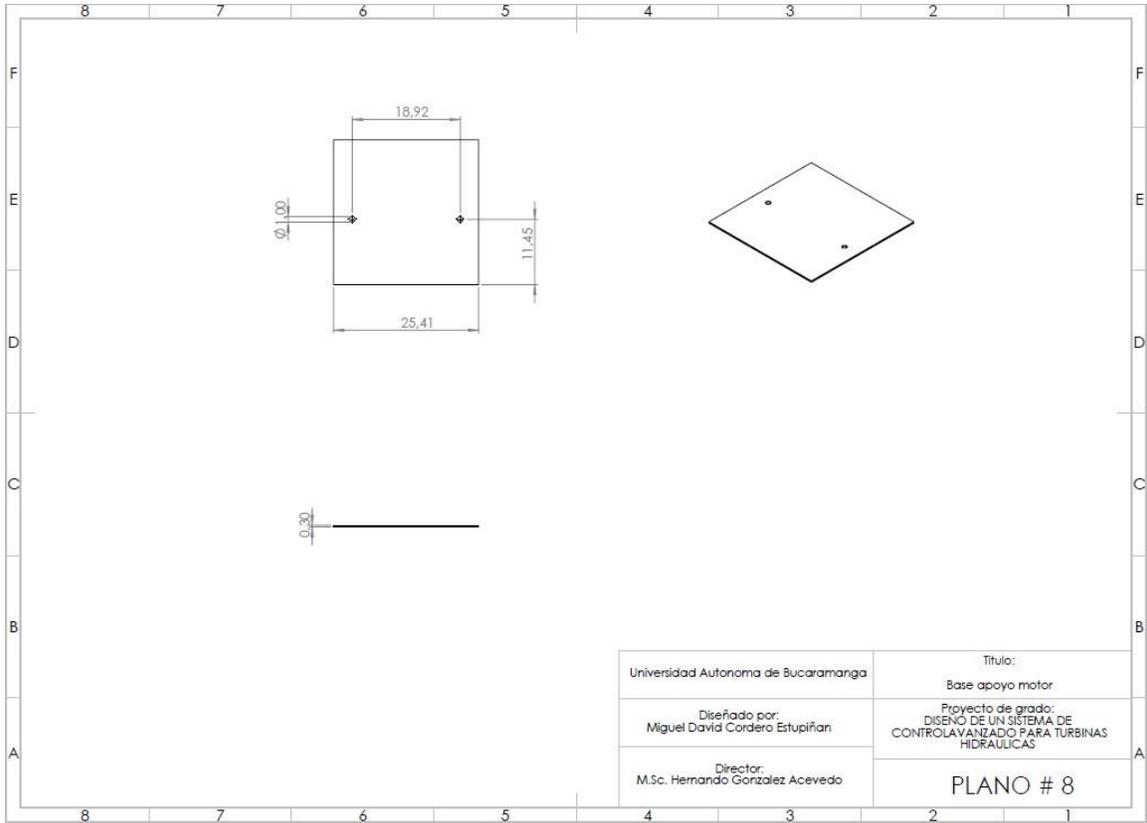


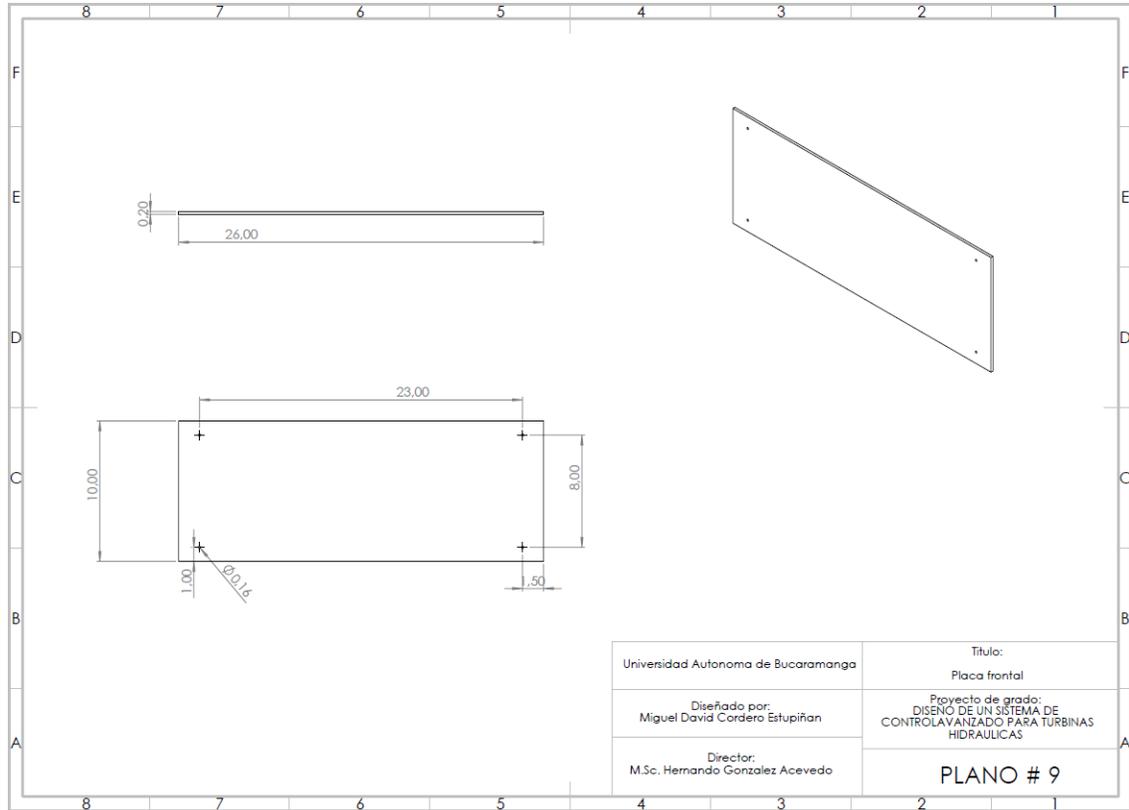


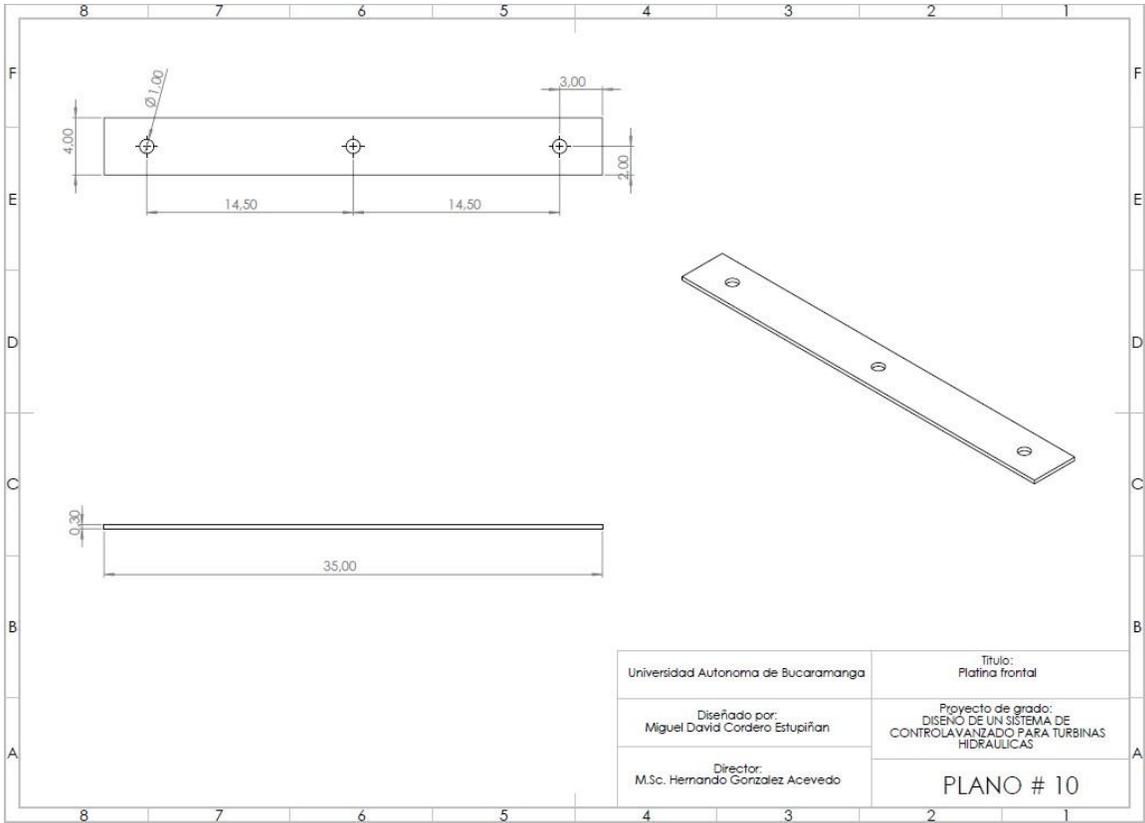


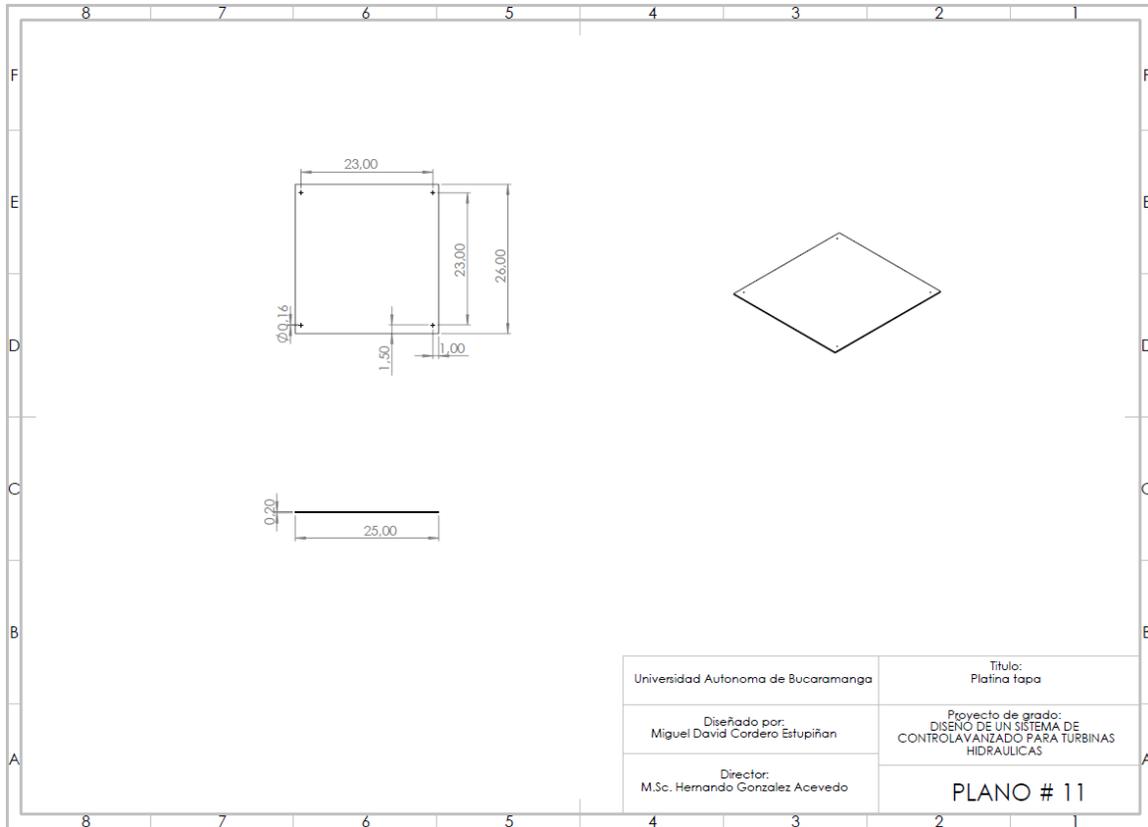
Universidad Autonoma de Bucaramanga	Titulo: Angulo apoyo izquierda
Diseñado por: Miguel David Cordero Estupiñan	Proyecto de grado: DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL AVANZADO PARA TURBINAS HIDRAULICAS
Director: M.Sc. Hernando Gonzalez Acevedo	PLANO # 6



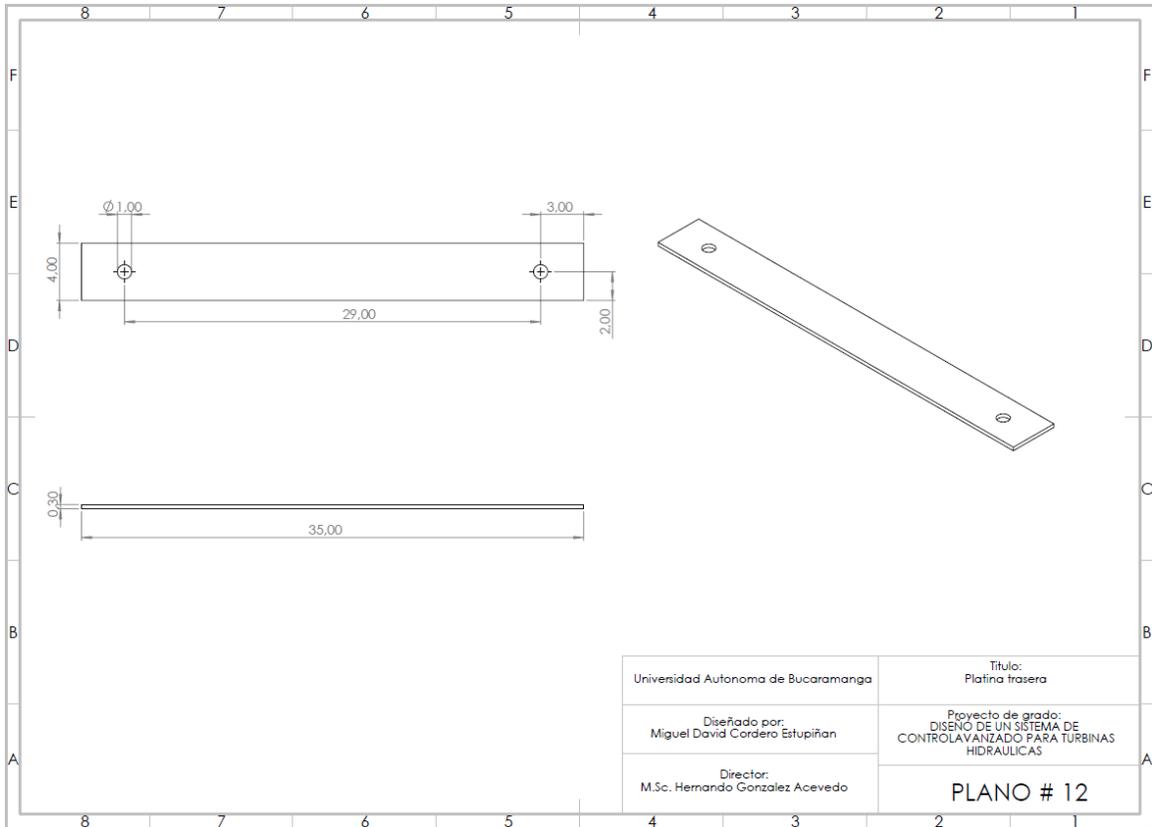








Universidad Autonoma de Bucaramanga	Titulo: Platina tapa
Diseñado por: Miguel David Cordero Estupiñan	Proyecto de grado: DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL AVANZADO PARA TURBINAS HIDRAULICAS
Director: M.Sc. Hernando Gonzalez Acevedo	PLANO # 11



4. GUIA SISTEMA MECANICO

A continuacion se indican los pasos para la instalacion del sistema mecanico

1. Se situa la corredera base encima de los huecos de la mesa.
2. Luego se procede a poner los tornillos con las arandelas de tal forma que se sitúen en los huecos de la mesa
3. Luego colocamos la base del motor de tal forma que las patinas inferiores entren por la canaletas de la corredera base
4. Una vez a dentro y ubicada la base procedemos a apretar los tornillos bristol de tal forma que quede fijo
5. Por ultimo unimos el acople araña del motor con el tornillo de los alabes de la turbina que estamos trabajando y apretamos el tornillo

De esta forma queda montado el sistema mecanico como se muestra en la figura



Figura Sistema mecánico.

FUENTE: Autores.

5. GUIA USUARIO HMI

A continuacion se indican los pasos para ejecutar la HMI

1. Se selecciona el Main que tiene como nombre "Francis_Kapalh"
2. A continuaicon se abra la HMI como se muestra en la figura 1
3. En el apartado selector turbina indicamos la turbina que deseamos trabajar si es turbina kaplan colocamos el numero 0 y si es turbina Francis colocamos el numero 1
4. En el apartado de controladores indicamos el controlador que queramos utilizar. Como se indica a continuacion:
 1. Control robusto de la turbina Francis
 2. Control robusto de la turbina Kaplan
 3. Control predictivo de la turbina Kaplan
 4. Control predictivo de la turbina Francis
 5. Control PID de la turbina Kaplan

6. Control PID de la turbina Francis

5. Despues de tener seleccionado el controlador procedemos a establecer nuestro SP de voltaje generado.
6. Una vez establecidos los parametros anteriores procedemos a observar en la grafica el voltaje generado y el Sp.



Figura HMI.

FUENTE: Autores.