

Diseño de un Sistema de Control para la Regulación de Velocidad en Turbinas de Minicentrales Hidroeléctricas

Design of a Control System for Speed Regulation in Mini Hydroelectric Turbines

Clever Josué Cotrina Fernández,
Edinson Flavio Félix Paisig Alvarado, Saúl Hernández Moreno

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad Señor de Sipán, Correo: email: cfernandezcleve@crece.uss.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0002-4876-5518>,
palvaradoe@crece.uss.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0003-4764-4498>,
hmorenosaulandr@crece.uss.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0002-4586-8685>

Resumen— La finalidad de este artículo es exponer o mostrar el diseño de un controlador de velocidad de una turbina Pelton. Para lograr este objetivo, se han aplicado métodos reconocidos en el campo de la ingeniería, la creación de conceptos y la compilación de medidas para el diseño del sistema de control de velocidad de la turbina. Se destacan múltiples modelos de ideas generadas previamente que han sometidas a criterios de evaluación, con miras a desarrollar una solución viable.

Palabras clave— Regulador de Velocidad, Sistema de Control, Turbina hidráulica

Abstract— The purpose of this article is to expose or show the design of a Pelton turbine speed controller. To achieve this goal, recognized methods in the field of engineering, concept creation and measurement compilation have been applied for the design of the turbine speed control system. Multiple models of previously generated ideas that have been subjected to evaluation criteria are highlighted, with a view to developing a viable solution.

Keywords— Speed Governor, Control System, Hydraulic Turbine.

Resumo - O objetivo deste artigo é expor ou mostrar o projeto de um controlador de velocidade de turbina Pelton. Para atingir esse objetivo, métodos reconhecidos no campo da engenharia, criação de conceitos e compilação de medições foram aplicados para o projeto do sistema de controle de velocidade da turbina. São destacados vários modelos de ideias previamente geradas e sujeitas a critérios de avaliação, com vista ao desenvolvimento de uma solução viável.

Palavras chave— Regulador de Velocidade, Sistema de Controle, Turbina Hidráulica.

I. INTRODUCCION

La energía hidroeléctrica representa el 72% de la producción de energía de Perú, y la energía térmica constituye el 28% restante. Según criterios eléctricos, una central hidroeléctrica es la fuente de energía más rentable porque emplea el agua como fuente de generación de electricidad. Las centrales hidroeléctricas se construyen con turbinas de agua. La totalidad de las plantas hidroeléctricas en uso hoy en día tienen más de 30 años y se construyeron para suministrar energía adicional y poder cubrir las máximas demandas en su jurisdicción. Pero como la demanda de electricidad ha aumentado y los generadores ahora integran el sistema interconectado nacional, varias de ellas no pueden satisfacerla y en su lugar han decidido cargar sus generadores para asegurar el aumento durante la generación asegúrese de que sus unidades estén funcionando a su máximo potencial en un futuro próximo. (Angel, 2018)

Es muy sabido que la Turbina Pelton emplea la energía de la altura de una importante cantidad de agua. Una vez que el agua ha circulado por la tubería de presión y llega al inyector, donde se produce un caudal que incide en la turbina y acelera la rotación del impulsor y el eje conectado. Pero la mayoría de las veces, la velocidad debe permanecer en un nivel particular. Regrese a estos valores predeterminados tan pronto como pueda si no es así, es decir, si cambia la velocidad. La justificación dada en párrafos anteriores se basa en que las turbinas operan alternadores para suministrar electricidad a varias industrias, donde la frecuencia debe permanecer sin ninguna variación. (Angel, 2018)

En Chiquche y Namora en Cajamarca, Perú, existen micro centrales hidroeléctricas como se pueden encontrar algunos casos de este tipo de autorregulación. Eduardo Soto Sánchez estudió un sistema hídrico y permuta proporcional de celeridad de turbina a mayor escala, como la hidroeléctrica Mantaro, pero al mismo tiempo se elevó el costo de su implementación. (Coz & Sánchez, 2019).

Una turbina Pelton es una hidromáquina accionada hidráulicamente que fue creada para trabajar tanto en alturas de agua altas como bajas. Está compuesto por uno o más inyectores y un rotor con álabes captadores de agua. Los surtidores de agua de los inyectores inciden sobre los álabes y producen un par mecánico al eje de la turbina. Una válvula de aguja, también conocida como aguja, está instalada dentro del inyector para regular el caudal de agua. Esto cambia el área donde discurre el agua que pasa a través del inyector y hacia la máquina. El regulador controla dónde se inserta la aguja. (Kleis, 2018)

Las transiciones hidráulicas son inevitables en cualquier ducto que acarrea líquidos y pueden ser provocadas por una serie de eventos, incluido el bloqueo de compuerta, el acaparamiento repentino de aire, el colmado de la tubería, la parada o el arranque de las bombas de la tubería y las variaciones en la potencia de la turbina. u otra razón para los cambios en el flujo o la presión de la tubería. La presión y el caudal afectan a todos los elementos de un sistema hidráulico siempre que los transitorios se transmitan a través de las líneas. Esta es la condición de contorno. Esto es muy importante para gestionar las transiciones hidráulicas y las escalas de respuesta del sistema. (Zhang., 2019)

La minicentral hidroeléctrica Chaupe Pucará no forma parte del Sistema Eléctrico, es un sistema aislado y está situada en El Chaupe, localidad que pertenece al distrito de Pucará, provincia de Jaén, departamento de Cajamarca, tiene más de 20 años de operación y cuenta con dos turbinas Pelton de 215 kW de Potencia Nominal, con salto neto de 95,95 m y un $Q_{nominal}$ de 0,55 m³/s. La planta opera actualmente con una potencia máxima de 430 kW y presenta una serie de inconvenientes, entre ellos la incapacidad de las turbinas 02 para regular la velocidad, lo que se hace manualmente. Además, cuando se tiene en cuenta el consumo de energía, la energía fluctúa mucho, lo que hace que la planta se detenga, disminuya o acelere la velocidad, produciendo un deficiente servicio para los abonados que hacen uso de este recurso y que proporciona esta minicentral.

Antecedentes internacionales

En Colombia en el proyecto de investigación titulado "Diseño de un control avanzado para regular la velocidad de una turbina tipo Terry", se utiliza planes de mantenimiento predictivo, además de planes difuso para componer el funcionamiento dinámico de 03 turbinas acopladas a un generador de corriente continua, no tener en cuenta los cambios de presión, que serán abordados en trabajos posteriores con el fin de incluir variables y modeladores fiables de variables de perturbación. El acercamiento de una válvula sobre la turbina produce una respuesta transitoria dentro de la masa, pero es necesario estudiar modelos para capturar con mayor precisión la actuación de estos 02 dispositivos. (Aza Sarabia, 2018),

En idéntica línea, en México, en el proyecto titulado "Control de la velocidad de laminación de una turbina a vapor de 350 MW", tiene como objetivo desarrollar componentes electrohidráulicos para el dominio numérico de la celeridad de la turbina y estudiar la velocidad electrohidráulica sirve como unidad fundamental de análisis para todas las partes de la turbina. Crear modelos

matemáticos específicos para este fin a partir de diagramas de bloques de sistemas de control de celeridad. Debido a que el método de vigilancia de celeridad electrohidráulico digital ha eliminado en gran medida los muchos elementos de requisitos de mantenimiento del sistema de control de celeridad, requiere poco mantenimiento que el sistema de control de celeridad electrohidráulico. (Bravo Dueñas, Carrasco Miranda, & Soto Pérez, 2017)

En Ecuador, en el proyecto titulado “Modernización del sistema de regulación de velocidad en la central hidroeléctrica Carlos Mora”, tiene como objetivo actualizar el procedimiento de regulación de celeridad en la central hidroeléctrica Carlos Mola con la finalidad en que cada ensayo origina cuantificar la operación y actuación de los reguladores en relación de la potencia, frecuencia, y velocidad. Debido a las restricciones impuestas a los componentes de la turbina, tales como tuberías forzadas, cámaras de carga, etc., es imperativo ajustar la máxima apertura y cierre del servo durante las etapas iniciales de operación. (Carrera Orellana, 2020),

Antecedentes Nacionales

En Cuzco, en la investigación titulada “Automatización del sistema de regulación de velocidad de la minicentral hidroeléctrica Colina, en Marcapata” cuyo objetivo era determinar las opciones más adecuadas para controlar indeliberadamente la celeridad de los generadores y turbinas. El sistema de control automático de velocidad con régimen de variación de caudal con reguladores, que ampara el control de la frecuencia del alternador, resultó ser el más útil de cualquier otro tipo o tecnología. Debido a que el generador siempre debe funcionar a plena capacidad, acelerando el desgaste y acortando su vida útil, no se recomiendan dispositivos de control de celeridad de carga estática cuando se genera a potencias superiores a 100 kW. (Pacheco Espinosa, 2019)

En Cuzco, el proyecto “Regulación por sistema electrohidráulico para obtener velocidad constante de la turbina Pelton de la FIM-UNCP”, el objetivo fue crear los componentes del procedimiento de control, incluidos los sensores de celeridad, los servomecanismos y las válvulas de control. Así, existen dos instalaciones: una instalación experimental (EE) y la otra de control (EC), siendo la primera una instalación existente para mejorar y la otra es una instalación para diseñar y construir. El rango de valores de mejora para el inyector de refuerzo de choque se determina para producir un movimiento ligeramente lineal expresado como una función de $y = 0,1047x + 177,97$ en recorrido de 57.60 mm. A una celeridad de operación de 184 RPM, el rango de magnitudes obtenido para el giro del deflector de la turbina Pelton arroja un valor de ángulo de $38,50^\circ$. Este rendimiento lineal aproximado viene dado por la función $y = 0.1619x + 177.77$. (Alania Melendez, 2017)

En Cuzco, en el proyecto denominado, "Diseño de un sistema de regulación de velocidad de turbina Pelton utilizando el algoritmo pi digital", menciona una tecnología nueva que permita administrar el flujo de servomotores de CC para regular la producción de electricidad. La ventaja de utilizar servomotores como controladores para centrales hidroeléctricas pequeñas y micro se descubrió durante el avance de la tecnología, y el esquema de control propuesto se probó exhaustivamente empleando el software Matlab y sus vínculos de vínculo simbólico para exponer la eficiencia del modelo sugerido. (Huerta Estrada, 2017)

II. DESARROLLO DEL ARTÍCULO

A. Diagnóstico del estado situacional del actual

En el CCPP El Chaupe distrito de Pucará, provincia de Jaén, departamento de Cajamarca, alberga la minicentral hidroeléctrica Chaupe Pucará, que forma parte de un Sistema Aislado.

Los parámetros hidroenergéticos de la central son los siguientes.

Caudal de diseño: $0,55 \text{ m}^3/\text{s}$

Caída bruta: 96 m

Caída neta (Hn): 95,95 m

Potencia Instalada: 430 kW

Turbina

Fabricante

Caudal Nominal

Caída de succión Neta

Potencia Nominal al eje

Velocidad Nominal

Generador

Tipo

Potencia Nominal

Factor de Potencia

Tipo PELTON

Algesa

$0,275 \text{ m}^3/\text{seg.}$

95,95 m.

215 KW

720 RPM

Síncrono

250 KVA

0,8

Número de fases	3
Tensión	200 KW
Frecuencia Nominal	60 Hz
Velocidad Nominal	720 RPM
Amperaje	328 A
Voltaje	440 V
Velocidad Nominal	720 RPM

En la siguiente tabla presentamos el número de variación de la velocidad de las turbinas durante el año 2022.

Tabla 1: Número Variaciones de la velocidad de la Turbina

Mes	Número Variaciones de la velocidad
Enero	15
Febrero	12
Marzo	22
Abril	24
Mayo	18
Junio	19
Julio	25
Agosto	23
Setiembre	17
Octubre	19
Noviembre	22
Diciembre	21

Fuente: Electro Oriente

B. Parámetros para el diseño del sistema de control de velocidad

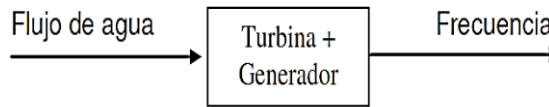
Los parámetros para el diseño del sistema son:

- Velocidad de rotación del péndulo o tacómetro (rpm) en los modelos mecánico, hidráulico y electrohidráulico.
- rpm de la bomba de aceite, que es controlada y accionada. Es una bomba eléctrica independiente
- El período de tiempo que un pistón del servomotor puede moverse para cambiar la posición del mecanismo de entrada de agua de inactivo a completamente cargado se mide en milímetros (m).
- La capacidad de trabajo se mide en kilogramos por metro cuadrado (Kg-m), y se calcula multiplicando la fuerza máxima necesaria para accionar el mecanismo de entrada de agua de la turbina por la carrera del servomotor.
- El rango de velocidad en el que puede operar el regulador se denomina regulación o ajuste de velocidad (en porcentaje); este ajuste se realiza ajustando el dispositivo variador de velocidad y se expresa en porcentaje de la velocidad nominal.
- La caída permanente (en porcentaje), que es la diferencia proporcional entre las velocidades de la turbina sin carga y con carga completa, generalmente oscila entre 0 y 6 por ciento.
- La cantidad de tiempo que tarda el pistón del amortiguador en completar una carrera completa cuando un resorte actúa como amortiguador, medido en segundos. El uso de una válvula de aguja permitirá la graduación.
- El período de corte de agua (en seg.), que normalmente oscila entre 3 y 15 segundos, es la cantidad de tiempo que necesita el servo para lograr un cierre completo del mecanismo de admisión de agua a la turbina.
- Usando la medida de fricción que está presente en el regulador, podemos calcular el grado de insensibilidad (en porcentaje) como la variación de velocidad requerida para que comience la regulación.
- La presión de operación del aceite (PSI), que puede ser controlada por una válvula de seguridad, es la presión máxima de trabajo en el circuito hidráulico y normalmente alcanza los 300 PSI.

C. Modelo del sistema de control de velocidad

A continuación, se muestra un diagrama de bloques del sistema de control del generador y de la turbina:

Figura 1: Control de la Turbina



Fuente: Elaboración propia

Control del Sistema

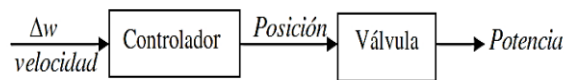
En una minicentral hidroeléctrica, es necesario una inspección de flujo suficiente para regular la velocidad de la turbina hidráulica al nivel deseado.

El control de potencia es posible gracias al desplazamiento recto de la aguja de la válvula. El modelo de control de flujo fue desarrollado específicamente para la inspección automática de hidroeléctricas pequeñas. El patrón recomendado emplea un servomotor para controlar el movimiento lineal de la válvula de control, que a su vez regula el flujo.

En un sistema hidroeléctrico, el consumidor demanda voltaje y frecuencia constantes. Para mantener estos parámetros constantes, el sistema debe tener un control.

El bosquejo básico del sistema de control de la celeridad de una hidroeléctrica se muestra a continuación:

Figura 2: Diagrama de bloques del sistema de posición



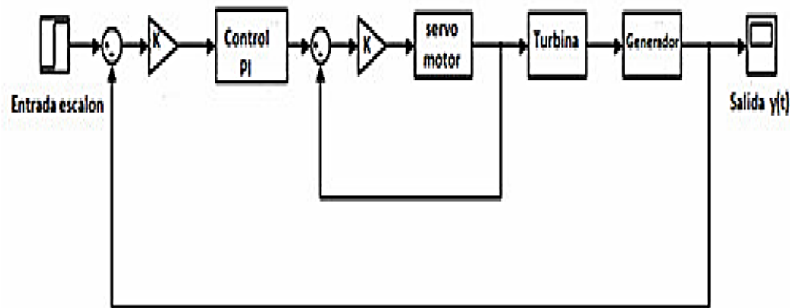
Fuente: Elaboración propia

Modelo propuesto

El sistema sugerido empleará una válvula de un solo pistón para controlar el flujo de agua. La válvula proporcionará control de flujo para generar energía dependiendo de la carga. En la consistencia del flujo de control, se basa la válvula de control. Un servomotor controla esta válvula.

La figura a continuación muestra en cascada la arquitectura general.

Figura 3: Modelo del Sistema en Bloques



Fuente: Elaboración propia

Desarrollo de la arquitectura

Vamos a crear una estructura que controle el flujo, así como la potencia y velocidad de la hidroturbina. La válvula que controla el caudal de agua en el diseño propuesto será accionada por un servomotor.

Consideré usar un servomotor de CC para controlar plantas de energía hidráulica pequeñas y medianas para este modelo. Por lo tanto, nuestro diseño requerirá de poca manutención y es menos costoso que los controladores hidráulicos electroneumáticos y mecánicos. convencionales.

Estos tres elementos componen todo el sistema de control de la turbina.

Controlador.
 Servomotor.
 Turbina
 Generador

La arquitectura siguiente es la propuesta para el control de una Minicentral Hidroeléctrica, de acuerdo a la figura 7.
 Funciones de transferencia:

$1/(1 - sT_1)$ Modelo de regulación eléctrica del servo.
 $1/(1 - sT_2)$ Modelo de regulación mecánica del servo.
 $(1 - sT_w)/(1 - 0.5sT_w)$ Modelo de regulación de la turbina
 $K_p/(1 - sT_p)$ Modelo de regulación del generador

Con esto controlamos la frecuencia del generador para proporcionar a la turbina una entrada de flujo específica para una carga dada.

El controlador tiene la siguiente función de transferencia del servomotor:

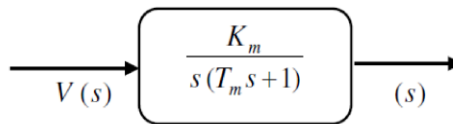
$$G_s = \frac{1}{1 - sT_1} \frac{1}{1 - sT_2}$$

Para: tiempo constante mecánico es T_1 y el tiempo constante eléctrico T_2

Análisis en Lazo Abierto del Servomotor DC

El modelo de Servomotor es un sistema de segundo orden. En atención a ello se utilizará con una constante de tiempo simplificada para representar el servomotor de DC.

Figura 4: Esquema simplificado del servomotor DC en lazo abierto



Fuente: Elaboración propia

donde T_m es la constante de tiempo electromecánica del sistema y K_m es la ganancia neta del sistema.

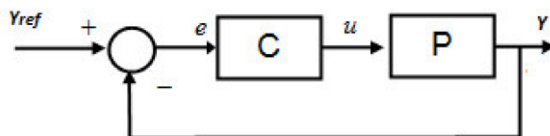
Análisis en Lazo Cerrado del Servomotor DC

El sistema de control de posición de bucle cerrado se representa en forma de diagrama de bloques en la fig. 05 La siguiente es su función de transferencia:

$$\frac{(s)}{R(s)} = \frac{K_p K_m}{s^2 T_m + s + K_p K_m}$$

Si hay una función de transferencia para la retroalimentación.

Figura 5: Diagrama de bloques del Servo.



Para el bloque P es el servomotor:

$$P = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)}$$

$$C = K_p$$

El lazo externo, controla el dispositivo de flujo primario a través del servomotor de CC y establece el punto de referencia para el lazo interno, que regule la variable principal, la frecuencia, responderá inmediatamente ante una variación de carga provocado por la perturbación. El estado del sistema de segundo orden del bucle interno es una ventaja.

El control en cascada tiene como propósito principal dividir el control del proceso en dos partes, crear un lazo de control secundario alrededor de las perturbaciones grandes y restringir el controlador primario para que maneje las perturbaciones pequeñas.

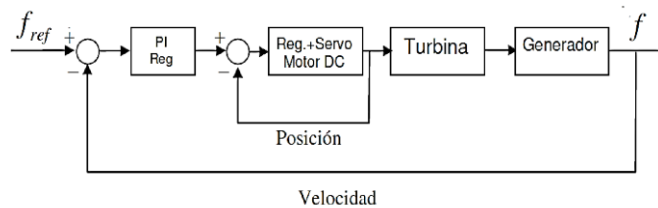
Los beneficios del control en cascada son los siguientes.

- Mejora del control sobre la variable principal.
- La variable primaria es menos susceptible a choques.
- Restauración después de las anomalías.
- Incrementar la frecuencia intrínseca del sistema.
- Disminuir la magnitud real del retardo de tiempo.
- Mejora del rendimiento dinámico.
- Especificar límites para la variable auxiliar.

La verificación en cascada requiere que el bucle secundario se construya cerca del ruido primario. La capacidad de las variables secundarias para adaptarse rápidamente a las perturbaciones también es importante.

Como se muestra en la siguiente figura, solo hay un controlador maestro, normalmente un controlador esclavo y una variable manipulada.

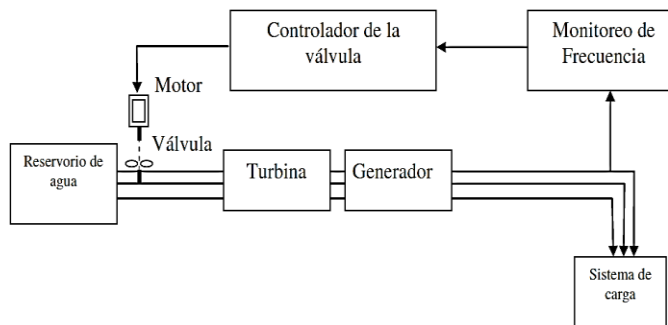
Figura 6: Arquitectura del regulador de velocidad



Fuente: Elaboración propia

Nos desempeñamos mejor con la regulación en cascada que con un solo regulador. Debido a que el regulador interno regulará más rápidamente cuando exista una variación significativa, este tipo de control es común en los procesos que existe en las industrias.

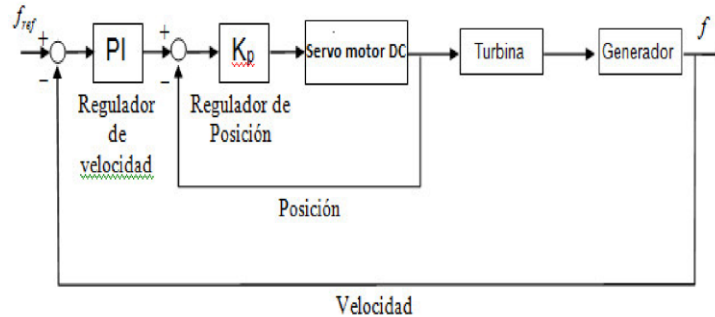
Figura 7: Esquema de la mini central hidroeléctrica



Fuente: Elaboración propia

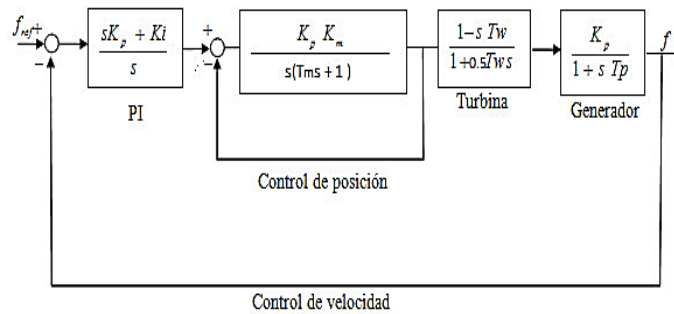
El siguiente diagrama muestra cómo funciona el diagrama de flujo de diseño general. Contiene bloques para controlador de velocidad, controlador de posición, turbina y generador.

Figura 8: Diseño completo con sus controladores



Fuente: Elaboración propia

Figura 9: Función de Transferencia con su modelo matemático



Fuente: Elaboración propia

El esquema antes indicado, ilustra cómo se transfiere la función del Sistema de Control Micro Hidroeléctrico a nuestro regulador automático.

Modelando la Transferencia de Función de la Turbina Hidráulica

Comparando la respuesta de una turbina al inicio del par con la respuesta de una turbina, el tiempo de inercia es mayor cuando el agua es la fuente de energía.

La función subsiguiente es una buena aproximación del modelo de transferencia de funciones de la hidroturbina.

$$\Delta P_g (s) = \frac{-T_w s + 1}{(T_w / 2)s + 1} \Delta P_E (s)$$

Sabemos que:

T_w = Tiempo de arranque nominal de agua en la tubería de carga. = $\mu L / g H$

L = Longitud de la tubería (m)

μ = Velocidad del agua

H = Presión de altura (m)

G = gravedad (m/s^2)

ΔP_G = La potencia Incremental (torsión) salida de la turbina (p.u.)

ΔP_E = Entrada de la potencia incremental a la turbina. (Posición de la válvula) (p.u.)

s = Transformada de Laplace

Los datos de la minicentral hidroeléctrica son:

$$P = 215 \text{ kW}$$

$$H = 95,95 \text{ m}$$

$$\eta = 0,85 \%$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$Q = 0,55 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$L = 195 \text{ m}$$

La Función de Transferencia de la Turbina

$\Delta P_G = A$ la salida de la turbina la potencia incremental (torsión) (p.u.)

$\Delta P_E =$ Potencia incremental a la entrada de la turbina. (Posición de la válvula) (p.u.)

$$L = \text{Longitud del ducto (m)} = 195 \text{ m}$$

$$L = 195 \text{ m.}$$

$\mu =$ velocidad del agua (m/s)

$$\mu = \sqrt{2 \cdot g \cdot L} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 195} = 61,85 \text{ m/s}$$

$$T_w = \mu L / gH = 61,85 \cdot 195 / (9,81 \cdot 95) = 1,3 \text{ s}$$

$$T_w = 0,13 \text{ s}$$

$$(1 - sT_w) / (1 + 0,5T_w s) = (1 - 0,13s) / (1 + 0,08s)$$

Función de transferencia del servomotor DC.

$$\frac{(s)}{R(s)} = \frac{K_p K_m}{s^2 T_m + s + K_p K_m}$$

Donde K_p es el valor del bucle interno del control proporcional del bucle de control de posición del servomotor de corriente continua.

Los valores de inicio son:

$$K_p = 0,10$$

$$K_m = 10,00$$

$$T_m = 0,25$$

$$G(s) = 1 / (0,25s^2 + s + 1) = 4 / (s^2 + 4s + 4)$$

Función de Transferencia del Generador

Está dada por la siguiente fórmula:

$$G(s) = K_p / (1 + sT_p)$$

Donde:

$$K_p = 1/D$$

$D = P_L / (fPR)$ Donde D se asume que es el rendimiento de la última carga.

$$T_p = 2H / (fD)$$

Donde:

$T_p =$ Es el tiempo de respuesta del sistema.

$H =$ Es la inercia constante del generador.

$f =$ Frecuencia nominal del sistema.

Si se tiene una carga nominal de: $P_L = 215 \text{ kW}$ a una frecuencia de 60 Hz la potencia del generador es: $PR = 269 \text{ kW}$

Entonces:

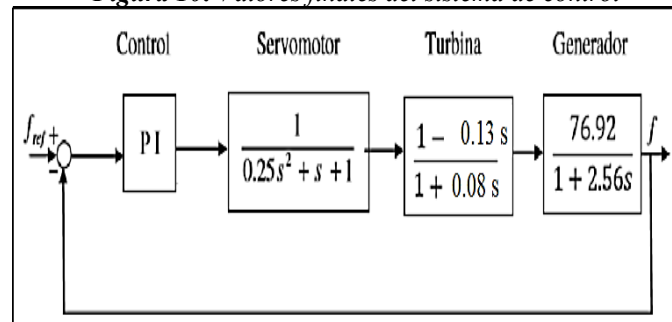
$$D = (215) / (60 \times 269) = 0,013 \text{ p.u./Hz}$$

Para el sistema con un tiempo y una ganancia permanente.
 $K_p=1 / 0,013 = 76.92 \text{ Hz/p.u}$
 $H=1\text{s}$
 $T_p= 2,56 \text{ s}$

Resultado de los bloques del sistema

La función de transferencia de los valores del modelo es la siguiente:

Figura 10: Valores finales del sistema de control

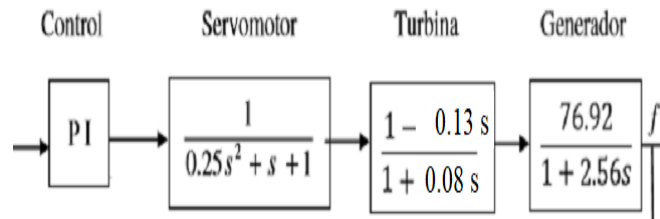


Fuente: Elaboración propia

Reducción del sistema

La sustitución de todos los valores calculados no da como resultado el modelo siguiente. Dicho modelo en cascada para el cálculo de control de la pequeña central hidroeléctrica para entradas escalonadas.

Figura 11: Reducción del Sistema

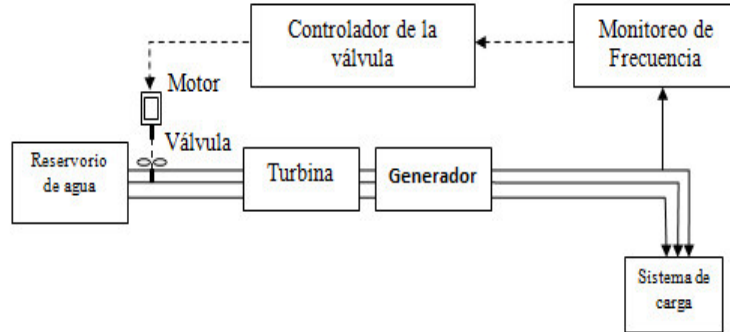


Fuente: Elaboración propia

Implementación del software de un control digital PID

En nuestro sistema, la celeridad del alternador de inducción será administrada por una turbina Pelton. La función principal del control de posición es la necesidad de contar los pulsos que cada bucle ha recogido. La celeridad del generador se puede calcular dividiendo el número de pulsos por el tiempo que lleva completar un ciclo, además este valore es la salida del sistema. La velocidad del generador se registrará en los diagramas a continuación, y cuando logre la celeridad requerida, el error será cero. Si no, el PID del controlador de velocidad tomará medidas para regular la celeridad.

Figura 25: Esquema de la mini central hidroeléctrica



Nota: Elaboración propia

D. Evaluación económica del sistema

A continuación, presentamos una revisión del sistema de control propuesto.

Tabla 3: Presupuesto del Control de Velocidad

ITEM	DESCRIPCION	CANT.	COSTO UNITARIO US\$	TOTAL
1.00	SUMINISTRO			
1.1	Válvula de Control ARI-STEVI 440	2	3500,0	7000,0
1.2	PLC 10" HMI with CONTROLLINO runtime	2	1500,0	3000,0
1.3	Sensores	2	1200,0	2400,0
2.00	MONTAJE			
2.1	Mano de obra	2	1500,0	3000,0
3.00	TRANSPORTE			
3.1	Transporte hasta el emplazamiento	2	500,0	1000,0
TOTAL (US\$)			8200,0	16400,0
TOTAL (S/.)			32800,0	65600,0

Nota: Elaboración propia

Tabla 4: Evaluación Económica

Año	1	2	3	4	7	8	13	19	20
EGRESOS	-66256	-656	-656	-656	-656	-656	-656	-656	-656
Inversión	-65600.0								
Mantenimiento	-656	-656	-656	-656	-656	-656	-656	-656	-656
INGRESOS	11145,6	11145,6	11145,6	11146	11145,6	11145,6	11145,6	11145,6	11145,6
Venta de Energía	11145,6	11145,6	11145,6	11146	11145,6	11145,6	11145,6	11145,6	11145,6
BENEFICIOS	-55110,4	10489,6	10489,6	10490	10489,6	10489,6	10489,6	10489,6	10489,6

VAN (S/.)	22153,65
TIR	18%

III. Discusión de Resultados

La minicentral hidroeléctrica Chaupe Pucará, que se encuentra en la localidad de El Chaupe en el distrito de Pucará y tiene una potencia instalada de 430 kW, una caída de 95 metros y un caudal de 0,55 m³/s, presenta dos turbinas Pelton de eje vertical con una capacidad combinada de 215 kW y una velocidad de rotación de 720 RPM. Como resultado de la investigación que realizamos, encontramos que la minicentral hidroeléctrica. Esto concuerda con la investigación realizada en 2019 por Pacheco Espinosa sobre el tema “Automatización del sistema de regulación de velocidad de la minicentral hidroeléctrica Colina, en Marcapata”, donde la situación problemática es similar a la encontrada en este trabajo de investigación. Esta Central cuenta con dos turbinas Pelton de 500 kW de eje vertical, cada una con una velocidad de rotación de 1200 RPM. A la fecha, la turbina tiene variaciones en la velocidad de la turbina, lo que provoca que el generador se detenga ocasionalmente.

El segundo resultado fue establecer los parámetros de diseño del sistema de control, que son la velocidad de rotación, el rpm de la bomba de aceite, el rango de velocidad que puede controlar el gobernador (en porcentajes) y el tiempo que le toma al pistón del amortiguador completar una carrera completa cuando un resorte actúa como un amortiguador, medido en segundos. Estas variables coinciden con las supuestas por Huerta Estrada, J. (2017) quienes utilizaron los mismos supuestos en su trabajo de investigación titulado "Diseño de un sistema de regulación de velocidad para una turbina Pelton utilizando el algoritmo pi digital" para crear el sistema de regulación.

El tercer hallazgo del estudio actual es un modelo de un sistema de control de velocidad de flujo controlado. El modelo propuesto emplea un servomotor para controlar el desplazamiento lineal de la válvula de control, que a su vez regula el flujo. El desplazamiento lineal de la válvula de la aguja permite regular la potencia. La válvula ofrecerá control de flujo dependiendo de la carga para producir energía. La consistencia del flujo de control sirve como base para la válvula de control. Un servomotor controla esta válvula. El software se utiliza para implementar el regulador PID, que opera en un tiempo discreto en contraste con el controlador del sistema físico, que opera en un tiempo continuo. El sistema de control de velocidad creado por Carrera Orellana, J., y este resultado es compatible. A. (2020) creó un regulador PID para abordar el tema de la velocidad de la turbina existente en la investigación titulada "Modernización del sistema de regulación de velocidad en la planta de energía hidroeléctrica de Carlos Mora".

La inversión que se debe realizar se determinó en el cuarto resultado que se obtuvo. S/.65600, con una producción de S/ 11145.60 cada mes. Valor Actual Neto S/. 22153.65 es lo que nos da al cabo de 20 años y una TIR del 18% un desenlace diferente al encontrado por Alania Meléndez, M.. (2017). “Regulación por sistema electrohidráulico para obtener velocidad constante de la turbina Pelton de la FIM-UNCP”, donde la inversión fue de S/. 12500 con un Valor Actual Neto de S/. 14500 con una TIR del 25 por ciento. Esto es así porque el diseño del regulador era más compacto que el creado para nuestro proyecto de investigación

IV. Conclusiones

La minicentral hidroeléctrica Chaupe Pucará está ubicada en la localidad de El Chaupe en el distrito de Pucará de la provincia de Jaén, en el departamento de Cajamarca, que no forma parte del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) del Perú, tiene una potencia instalada de 430 kW, con una caída de 95,95m y un caudal de 0,55 m³/s, los grupos de generación hidráulica son 02 turbinas tipo Pelton de eje vertical de 215 kW de potencia y 720 RPM las mismas que presentan en promedio mensual de 20 variaciones de la velocidad de la turbina, originando problemas en el funcionamiento de la minicentral.

Los parámetros de diseño del sistema de control son: velocidad de rotación, rpm de la bomba de aceite, el rango de velocidad en el que puede operar el regulador se denomina regulación o ajuste de velocidad (en porcentaje), la cantidad de tiempo que tarda el pistón del amortiguador en completar una carrera completa cuando un resorte actúa como amortiguador, medido en segundos.

El control de flujo, un modelo del sistema de control de velocidad desarrollado específicamente para el control automático de pequeñas plantas de energía hidroeléctrica. El modelo sugerido emplea un servomotor para regular el flujo cambiando el desplazamiento lineal de la válvula de control. El movimiento lineal de la válvula de aguja permite el control de la potencia. El sistema sugerido empleará una sola válvula de pistón para regular el flujo de agua. La válvula proporcionará control de flujo para generar energía dependiendo de la carga. En la consistencia del flujo de control, se basa la válvula de control. Un servomotor controla esta válvula. Con la ayuda de un software y una PC, se puede implementar el regulador PID. Mientras que el controlador en el sistema físico opera en tiempo continuo, el regulador se implementa con un software que opera en tiempo discreto.

La inversión por realizar es de S/. 65600, con una producción mensual de S/. 11145.60 lo que nos da en un periodo de 20 años, un Valor actual Neto S/. 22153.65 y una TIR de 18%.

V. Referencias

- [1] S. E. V. Angel, REPOTENCIACIÓN DE LAS TURBINAS FRANCIS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CAHUA, Ancash: UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA, 2018.
- [2] F. Coz y T. Sánchez, Manual de Mini y micro centrales hidráulicas, Cajamarca: Soluciones Prácticas ITDG, 2019.
- [3] T. Kleis, Control de velocidad en turbinas hidráulicas PELTON por el deflector en transitorios, Barcelona, España, 2018.
- [4] Q. Zhang., Numerical Modeling of Active Hydraulic Devices and Their Significance for System, México, 2019.
- [5] D. C. Aza Sarabia, DISEÑO DE UN CONTROL AVANZADO PARA REGULAR LA VELOCIDAD DE UNA TURBINA TIPO TERRY, Bucaramanga, Colombia: Universidad Autonoma de Bucaramanga, 2018.
- [6] M. A. Bravo Dueñas, T. Carrasco Miranda y J. C. Soto Pérez, CONTROL DE LA VELOCIDAD DE RODAMIENTO DE UNA TURBINA DE VAPOR DE 350 MW, México: INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, 2017.
- [7] J. A. Carrera Orellana, MODERNIZACION DEL SISTEMA DE REGULACION DE VELOCIDAD EN LA CENTRAL HIDROELECTRICA CARLOS MORA, Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana, 2020.
- [8] H. Pacheco Espinosa, AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA DE REGULACIÓN DE VELOCIDAD DE LA MINICENTRAL HIDROELÉCTRICA DE COLINE, EN MARCAPATA, Cuzco, Perú: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cuzco, 2019.
- [9] M. Á. Alania Melendez, Regulación por sistema electrohidráulico para obtener velocidad constante de la turbina pelton de la FIM-UNCP, Huancayo, Perú: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2017.
- [10] J. Huerta Estrada, Diseño de un sistema de regulación de velocidad de una turbina peltón usando el algoritmo pi digital, Lima, Perú: Universidad Mayor de San Marcos, 2017.