

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA



**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD DE
UNA TURBINA PELTON EN LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA
BUENOS AIRES NIEPOS USANDO ALGORITMO PI DIGITAL**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO

AUTOR (A)

SANCHEZ SERRANO EDGAR JUNIOR

Chiclayo, 28 de mayo 2018

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE
VELOCIDAD DE UNA TURBINA PELTON EN LA
CENTRAL HIDROELÉCTRICA BUENOS AIRES NIEPOS
USANDO ALGORITMO PI DIGITAL**

PRESENTADO POR:

SANCHEZ SERRANO EDGAR JUNIOR

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica Santo Toribio
de Mogrovejo para optar el título de:

INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO

APROBADA POR:

Ing. Luis Alberto Gonzáles Bazán

PRESIDENTE

Ing. José Anthony Guillermo Yarlaque

SECRETARIO

Ing. Hugo Walter Mundaca Guerra

ASESOR

DEDICATORIA

Este proyecto es dedicado a mis padres Alberto Sánchez Avellaneda y a mi madre Tania Serrano Baldera.

RESUMEN

El diseño del sistema regulador de velocidad es una característica fundamental en las mini centrales hidroeléctricas, debido que al transcurrir el tiempo la demanda de la comunidad, donde está ubicada la mini central, va en aumento en función al crecimiento de la población. Es por eso que el mejoramiento de la eficiencia de las centrales hidroeléctricas es un factor importante, para satisfacer la demanda y mejorar la calidad de energía que se entrega a la comunidad.

El presente informe presenta el diseño de un sistema de control de velocidad de una turbina Pelton en la central hidroeléctrica Buenos Aires Niepos usando algoritmo PI digital a través de la herramienta informática Matlab.

El proceso de diseño de este modelo abordará desde la información de la ficha técnica hasta la obtención de parámetros necesarios para el diseño. Se realiza en primer lugar la obtención de parámetros para el cálculo del diámetro de la válvula , un vez hallado, se procede a plantear un modelo cascada de la central hidroeléctrica de Buenos Aires Niepos, una vez planteado el modelo se dará lugar a las ecuaciones de transferencias tanto en el servomotor, turbina y generador; y se procederá al desarrollo de la arquitectura del diseño del controlador , en esta etapa se emplea el Matlab para simular y comprobar el comportamiento del diseño y una vez desarrollado se pasará al cálculo de los parámetros del controlador PI (Controlador Proporcional-Integral) digital.

Los cálculos se realizarán mediante hojas de cálculo de Excel, se procederá a evaluar el modelo de la central hidroeléctrica, mediante Matlab, para obtener los parámetros para el algoritmo PI (Controlador Proporcional-Integral) digital. De esta manera concluir con el diseño final del sistema.

Palabras claves: Regulador de velocidad, turbina Pelton, mini centrales hidroeléctricas, algoritmo PI, Matlab.

Abstract

The design of the speed regulating system is a fundamental feature in the mini hydroelectric plants, because over time the demand of the community, where the mini central is located, is increasing as a function of population growth. That is why improving the efficiency of hydroelectric power plants is an important factor in meeting demand and improving the quality of energy delivered to the community.

The present report the design of a speed control system of a Pelton turbine at the Buenos Aires Niepos hydroelectric power plant using digital PI algorithm through Matlab computer tools.

The design process of this model will approach from the information of the technical sheet until obtaining the necessary parameters for the design. It is carried out in the first the obtaining of parameters to obtain the diameter of the valve, once found, it is proceeded to raise A cascade model of the Buenos Aires Niepos hydroelectric plant, once the model has been proposed, will give rise to transfer equations in both the servomotor, turbine and generator; And proceed to the development of the architecture of the controller design, in this stage will be used the Matlab to check the behavior of the design and once developed will be passed to the calculation of the parameters of the digital controller PI.

The calculations are performed using Excel spreadsheets, the model of the hydroelectric power station will be evaluated by means of Matlab to obtain the parameters for the digital algorithm PI. This will conclude with the final design of the system.

Keywords: Speed controller, Pelton turbine, mini hydroelectric plants, PI algorithm, Matlab.

Índice

1.	INTRODUCCIÓN.....	9
2.	JUSTIFICACIÓN	10
3.	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	11
4.	MARCO TEÓRICO	12
4.1.	Estado del arte.....	12
4.2.	Bases teóricas científicas	12
4.2.1.	Calidad de Energía.....	12
4.2.2.	Mini centrales hidroeléctricas.....	14
4.2.3.	Componentes de una micro central hidroeléctrica.	15
4.2.4.	Ventajas de las MCH.....	18
4.2.5.	Clasificación	18
4.2.6.	Turbinas Pelton.....	18
4.2.7.	Sistema Regulador.....	24
4.2.8.	Matlab.....	30
4.2.9.	Sistema de control	32
4.2.10.	Sistema PID	37
4.2.11.	Controlador PI	42
5.	DISEÑO DEL CONTROL DEL MODELO PROPUESTO	48
5.1.	Diseño de un Modelo Matemático Mecánico.	49
5.2.	Sistema lazo abierto	53
5.3.	Sistema de Realimentado.....	54
5.3.1.	Control Proporcional.	54
5.3.2.	Control Proporcional Integral PI	56
6.	CENTRAL HIDROELÉCTRICA BUENOS AIRES NIEPOS.....	59
7.	CÁLCULOS DE PARÁMETROS.....	61
7.1.	Parámetros.....	61
7.2.	Dimensione Turbina Pelton	61
7.3.	Triángulo de velocidades	62
8.	DESARROLLO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA TOTAL DEL SISTEMA	65

8.1.	Control del Sistema.....	65
8.2.	Modelo Propuesto.	67
8.3.	Desarrollo del modelo matemático de todo el sistema en conjunto.....	69
8.3.1.	Función de transferencia de la turbina.....	70
8.3.2.	Función de transferencia del servomotor DC.	72
8.3.3.	Función de Transferencia del Generador.....	72
8.3.4.	Reducción del sistema	74
9.	CONCLUSIONES.....	79
10.	RECOMENDACIONES	80
11.	BIBLIOGRAFÍA	81
	Anexo.....	83

Índice de Figuras.

Figura 1 Componentes de una mini central	15
Figura 2 Canal de conducción	16
Figura 3Desarenador.....	17
Figura 4 Tubería de presión.....	17
Figura 5 Esquema de funcionamiento de una turbina Pelton de un chorro.....	19
Figura 6 Componentes de la Turbina Pelton	21
Figura 7 Sistema de inyección.....	22
Figura 8 Esquema del Inyector	23
Figura 9 Regulador hidraulico.....	26
Figura 10 Regulador eléctrico-eléctronico	27
Figura 11Regulador electrónico	28
Figura 12 Reglador Mixto	29
Figura 13 Diagrama de control de proceso PID	37
Figura 14 Control PID en Laplace.....	38
Figura 15 Control PID digital.....	39
Figura 16 Relacion entre la señal error y la señal control	39
Figura 17 Transfeteria de control.....	41
Figura 18 Control Integral	41
Figura 19 Control Derivativo	42
Figura 20 Diagrama de bloques del controlador	42
Figura 21 Respuesta escalón para un controlador PI.....	43
Figura 22 Diagrama de bloques de un sistema digital	43
Figura 23 Control PID Digital	44
Figura 24 Diagrama de Bloques general	49
Figura 25 Sistem mecánico.....	50
Figura 26 Modelo Laplaciano.....	50
Figura 27 Sistema eléctrico RLC.....	51
Figura 28 Proceso de segundo orden con sobreenlogacion.....	52
Figura 29 Control proporcional	54
Figura 30 Señal de salida del sistema con control PI	56
Figura 31 Diagrama de la central	65
Figura 32 Modelo de control de la turbina	65
Figura 33Esquema del control de velocidad.....	67
Figura 34 Modelo propuesto.....	68
Figura 35Esquema del regulador de velocidad.....	69
Figura 36 Diagrama de la mini central	69
Figura 37 Diseño completo con sus controladores	70
Figura 38 Diseño con sus modelos matemáticos.....	70
Figura 39 Sistema de control con sus valores finales	74

1. INTRODUCCIÓN.

La energía es un factor que determinan el desarrollo de la economía local, nacional y global. La escasez o abundancia en el abastecimiento de energía condiciona el crecimiento de los países, dado que la competitividad de sus costos es el primer punto a tomar en cuenta al momento de decidir la ejecución de un proyecto de inversión.

Desde hace ya un tiempo la sociedad se ha dado cuenta que la energía es un bien escaso. Hay que entender bien como se transforma para poder utilizarla de manera más eficiente y menos perjudicial para el medio ambiente.

La Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo tiene como objetivo formar alumnos que sean capaz automatizar sistemas relacionado con generación eléctrica. Con el fin de relacionar los cursos de centrales hidroeléctricas, diseño mecánico y sistema de control.

El presente trabajo propone la realización de una herramienta informática de diseño de un sistema regulador de velocidad en una turbina Pelton que ayude a entender el proceso de automatización mediante el uso herramientas informáticas como hojas de cálculo de Excel y Simulink Matlab.

La herramienta debe poseer los adecuados índices de confiabilidad que la hagan utilizable por los alumnos de la escuela ingeniería mecánica eléctrica en la Universidad Santo Toribio de Mogrovejo, además, podrá ser la base para estudios posteriores.

En este documento se especifican las bases de elaboración del proyecto de tesis. Además, esta memoria justifica los datos técnicos necesarios para el diseño y cálculo del sistema de regulación de velocidad.

Teniendo en cuenta como referencia los datos de la Central Hidroeléctrica de Buenos Aires Niepos, no siendo un problema actualmente en ella si no siendo un posible problema a futuro con el fin de estudiar la automatización.

2. JUSTIFICACIÓN

En el mercado actual en lo que se refiere a la obtención de energía eléctrica y su creciente competitividad es el factor principal para la creación de máquinas automáticas que satisfagan la demanda de energía eléctrica como futuros ingenieros mecánicos eléctricos, es nuestro deber dar soluciones en la parte técnica como en lo administrativo-económico, a los problemas de ejecución de obras industriales, como: instalación ,montaje, puesta en marcha y operación de plantas y complejos industriales.

El desarrollo del país requiere de la creación de nuevas industrias, la incorporación de nuevas tecnologías en las empresas manufactureras; el Ingeniero mecánico encuentra aquí un interesante campo profesional en sus proyectos y diseños mecánicos relacionados con esta actividad.

Actividad de montaje de plantas y equipos: el país cuenta con un gran número de empresas dedicadas a instalar, transformar y construir equipos y plantas industriales ofreciendo la posibilidad de trabajar en esta área.

En la planta hidroeléctrica la regulación de la velocidad se la hace normalmente mediante un volante que regula el movimiento del pistón que a su vez mueve un eje, adaptado con una biela que regula la apertura y cierre de los alabes de la turbina; en otras palabras, se necesitan de varios técnicos que realicen el trabajo. El diseño del sistema de control digital brindará mayores ventajas con respecto al método tradicional de operación, ya que disminuye el número de obreros además del tiempo se puede tener como resultado un mayor ahorro, eficiencia y calidad de energía en la central.

3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

OBJETIVO PRINCIPAL

- Diseñar un sistema de control de velocidad de una turbina Pelton en la central hidroeléctrica Buenos Aires Niepos usando algoritmo PI digital.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recolectar y analizar los datos técnicos de la Central Hidroeléctrica de Buenos Aires Niepos.
- Definir los parámetros para el diseño del sistema de control de velocidad de una turbina Pelton en la central hidroeléctrica de Buenos aires
- Proponer el diseño de control mediante funciones de transferencias del sistema de control.
- Desarrollar y comprobar las funciones de transferencia del sistema de control de velocidad de la turbina Pelton, teniendo al servomotor, turbina y generador mediante el uso de Matlab.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Estado del arte

- **F. Javita Almeida**, Diseño y Construcción de un banco para el control automático de velocidad para un grupo de 4 plantas hidroeléctricas tipos Francis de 200 KW cada una pertenecientes al proyecto hidroeléctrico Borja; [1] el cual nos presenta el método de selección de un regulador y el cálculo para el diseño y la automatización de la central.
- **J. Huerta Estrada**; Diseño de un sistema de regulación de velocidad de una turbina Pelton usando el algoritmo PI digital [2]; nos muestra la secuencia de cálculos para el algoritmo PI digital.
- **J. Palacios Pinto**; Diseño de una turbina Pelton y su sistema de control [3]; El alcance de del proyecto es diseñar una mini hidroeléctrica que trabaje con pequeño caudal y altura media para evitar la construcción de represa y solamente requerir de un canal de desvío en el río, ya que se utilizaría un 8% del caudal total del río.

4.2. Bases teóricas científicas

4.2.1. Calidad de Energía.

La calidad de la energía eléctrica puede definirse como una ausencia de interrupciones, sobre tensiones y deformaciones producidas por armónicas en la red y variaciones de voltaje RMS (Root Mean Square – Raíz Media Cuadrática) suministrado al usuario; esto referido a la estabilidad del voltaje, la frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico. Asimismo, se ha determinado que uno de los problemas más comunes que ocasiona el desperdicio de energía eléctrica en las empresas es la calidad de esta, pues influye en la eficiencia de los equipos eléctricos que la usan. Actualmente, la calidad de la energía es el resultado de una atención continua; en años recientes esta atención ha sido de mayor importancia debido al incremento del número de cargas sensibles en los sistemas de distribución, las cuales por sí solas, resultan ser una causa de la degradación en la calidad de la energía eléctrica

¿Qué es un problema de calidad de la energía?

Podemos sostener que existe un conflicto de calidad de la energía eléctrica cuando ocurre cualquier declinación de la tensión, la corriente o la frecuencia que provoque la mala operación de los equipos de aprovechamiento final y deteriore la economía o el

bienestar de los usuarios; incluso cuando ocurre alguna obstrucción del flujo de energía eléctrica. Los efectos asociados a inconvenientes de calidad de la energía son:

- Incremento en las pérdidas de energía.
- Daños a la producción, a la economía y la competitividad empresarial
- Incremento del costo, deterioro de la confiabilidad, de la disponibilidad y del confort.

Actualmente, el estudio de la calidad de la energía eléctrica ha adquirido mucha importancia y tal vez la razón más importante es la búsqueda del aumento de productividad y competitividad de las empresas. Asimismo, porque existe una interrelación entre calidad de la energía eléctrica, la eficiencia y la productividad. Para aumentar la competitividad las empresas requieren optimizar su proceso productivo mediante [17]:

- Usando equipos de alta eficiencia como motores eléctricos, bombas, etc.
- Automatizando sus procesos mediante dispositivos electrónicos y de computación (microcontroladores, computadores, PLC, etc.).
- Reduciendo los costos vinculados con la continuidad del servicio y la calidad de la energía.
- Reduciendo las pérdidas de energía.
- Evitando los costos por sobredimensionamiento y tarifas.
- Evitando el envejecimiento prematuro de los equipos.

La proliferación de equipos de control y automatización han aumentado los problemas de confiabilidad en la producción. Pues los equipos electrónicos son una fuente de perturbaciones para la calidad de la energía eléctrica pues distorsionan las ondas de tensión y corriente. Por otro lado, los equipos de control y automatización son muy sensibles a distorsión o magnitud de la onda de tensión por lo que una variación en la calidad de la energía eléctrica puede ocasionar fallas que paralicen la producción ocasionando tiempo perdido y costos de producción inesperados. Entonces hay que convivir con el problema y encontrarle soluciones cada vez más optimas, para lo cual el estudio de los fenómenos de la calidad de la energía es indispensable.

Cabe destacar también que estamos hablando de pequeñas centrales hidroeléctricas, que normalmente se sitúan en áreas remotas donde quizás no se dispone de operadores lo

suficientemente cualificados, a lo que hay que sumar los altos costes que suponen estos equipos de control y protección. Así, en muchas ocasiones, se seleccionan sistemas más baratos, que pueden proporcionar los requerimientos de control y gestión necesarios (el uso de los anteriormente nombrados relés cableados, y usando equipos separados para gobernar turbina, generador, etc.).

Por otro lado, el incorporar un sistema de automatización a una mini central hidráulica supone grandes ventajas a pesar de su coste, dadas las siguientes razones:

- Las centrales hidroeléctricas arrancan y paran más frecuentemente.
- Las unidades hidroeléctricas también proporcionan flexibilidad de cambiar el modo de operación. Por ejemplo, control de KW o control de nivel.
- Proporciona operación exitosa, eficiente y uniforme (centralizar la operación y optimizar la producción).
- Las centrales se sitúan en áreas remotas con difícil acceso, lo que nos permite, concentrar los recursos, disminuyendo la dispersión.

Dadas todas estas razones, se ve como el hecho de llevar a cabo una gestión y un control adecuado de nuestra central, repercutirá en una reducción de costes, tanto a largo como a corto plazo, si hablamos en términos de mantenimiento y bienestar de los equipos, así como el dedicar nuestro personal a tareas de las cuales saquemos un mayor valor añadido.

4.2.2. Mini centrales hidroeléctricas

Se denomina mini centrales hidroeléctricas a las centrales hidroeléctricas de pequeña potencia, menores de 10 MW, y se tratan aparte porque tienen un ordenamiento administrativo y económico llamado de Régimen Especial, distinto al de las centrales hidroeléctricas clásicas de mayor potencia.

Tipos de mini centrales hidroeléctricas

Las centrales hidroeléctricas, y dentro de ellas las mini centrales hidroeléctricas, están muy condicionadas por las peculiaridades y características que presente el lugar donde vayan a ser ubicadas. Cuando se vaya a poner en marcha una instalación de este tipo hay que tener en cuenta que la topografía del terreno va a influir tanto en la obra civil como en la selección de la maquinaria.

Según el emplazamiento de la central hidroeléctrica se realiza la siguiente clasificación general:

- Centrales de agua fluuyente. Captan una parte del caudal del río, lo trasladan hacia la central y una vez utilizado, se devuelve al río.
- Centrales de pie de presa. Se sitúan debajo de los embalses destinados a usos hidroeléctricos o a otros usos, aprovechando el desnivel creado por la propia presa
- Centrales en canal de riego o de abastecimiento.

4.2.3. Componentes de una micro central hidroeléctrica.

En general, las micro centrales hidroeléctricas se componen de obras civiles (cámara de carga, rebose, canal, desarenador, bocatoma, tubería de presión, casa de fuerza), equipo electromecánico y redes eléctricas de transmisión y distribución [4]. El siguiente gráfico muestra detalladamente los principales componentes de una micro centrales hidroeléctricas. [1]

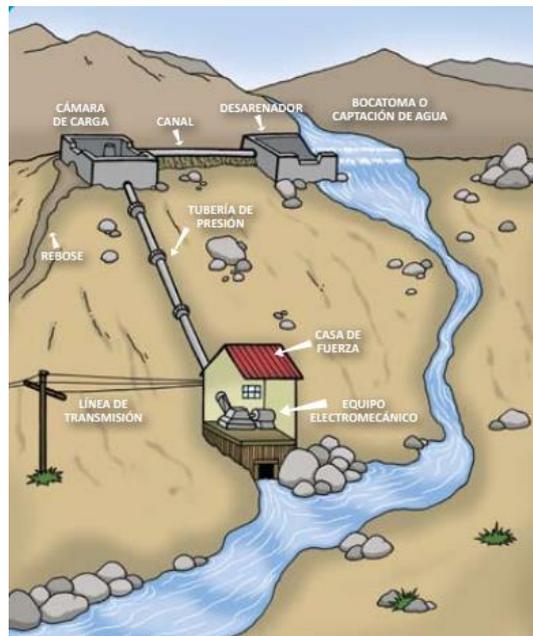


Figura 1 Componentes de una mini central

Fuente: Internet

- Obras civiles

Están conformadas por una bocatoma, canal de conducción, desarenador, cámara de carga, tubería de presión, casa de máquinas, entre otros.

- Bocatoma

Sirve para desviar la parte del caudal del río que será utilizado para la micro central

Para su construcción se usan estructuras de cemento o una combinación de cemento y madera.

Cuando se trata de centrales muy pequeñas, las comunidades utilizan piedra, barro y ramas, como en las bocatomas que se construyen para el riego

- Canal de conducción

Sirve para conducir el agua desde la bocatoma hasta la cámara de carga. Pueden ser de tierra, revestidos con concreto, tubos de PVC u HDP u otros materiales



Figura 2 Canal de conducción

Fuente: Internet

- Desarenador y cámara de carga

Evita que piedritas y arenilla que viene con el agua ingrese a la tubería de presión y a la turbina

Asegura que la tubería de presión esté llena, evitando el ingreso de aire

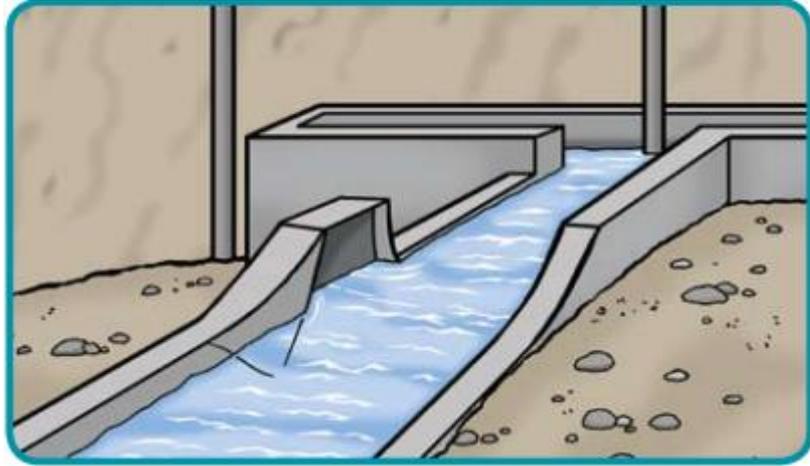


Figura 3 Desarenador

Fuente: Internet

- Tubería de presión

Transporta el agua desde la cámara de carga hasta la casa de máquinas. Puede ser construida en acero, PVC o polietileno Tuberías de PVC

En la actualidad se usan mucho en la construcción de micro centrales por su bajo costo, fácil transporte e instalación en comparación al acero:

- Soportan altas presiones y se fabrican en grandes diámetros
- Siempre deben estar enterradas para evitar daños por su exposición al Sol



Figura 4 Tubería de presión

Fuente: Internet

- Casa de máquinas.

Ambiente donde se instalan todos los equipos de generación y control, así mismo, donde entra y evacua el agua.

- Equipo electromecánico.

Todos los equipos ubicados dentro de la casa de máquinas: generador, regulador, turbina, tablero de control y otros.

- Turbina.

Máquinas que transforman la energía del agua en energía mecánica mediante un motor que gira por fuerza de agua.

4.2.4. Ventajas de las MCH

- No necesitan combustible.
- Utilizan la fuerza del agua, que es un recurso inagotable.
- No contaminan el medio ambiente porque no producen gases ni humo en su funcionamiento.
- Normalmente su trabajo es continuo
- Permiten el funcionamiento de otros equipos y máquinas
- Los efectos negativos de las MCH son mínimos.

4.2.5. Clasificación

- Picos centrales hidroeléctricas: hasta 5 kW
- Microcentrales hidroeléctricas: de 5 a 100 kW
- Mini centrales hidroeléctricas: de 100 a 1 000 kW

4.2.6. Turbinas Pelton

Las turbinas Pelton, se conocen como turbinas de presión por ser ésta constante en la zona del rodete, de chorro libre, de impulsión, o de admisión parcial por ser atacada por el agua sólo una parte de la periferia del rodete. Así mismo entran en la clasificación de turbinas tangenciales y turbinas de acción. Su utilización es idónea en saltos de gran altura (alrededor de 200 m y mayores), y caudales relativamente pequeños (hasta 10 m³/s

aproximadamente). Por razones hidroneumáticas, y por sencillez de construcción, son de buen rendimiento para amplios márgenes de caudal (entre 30 % y 100 % del caudal máximo). Por ello se colocan pocas unidades en cada central que requiere turbinas de estas características. Pueden ser instaladas con el eje en posición vertical u horizontal, siendo esta última disposición la más adecuada, la cual nos servirá de referencia para hacer las descripciones necesarias. [5]

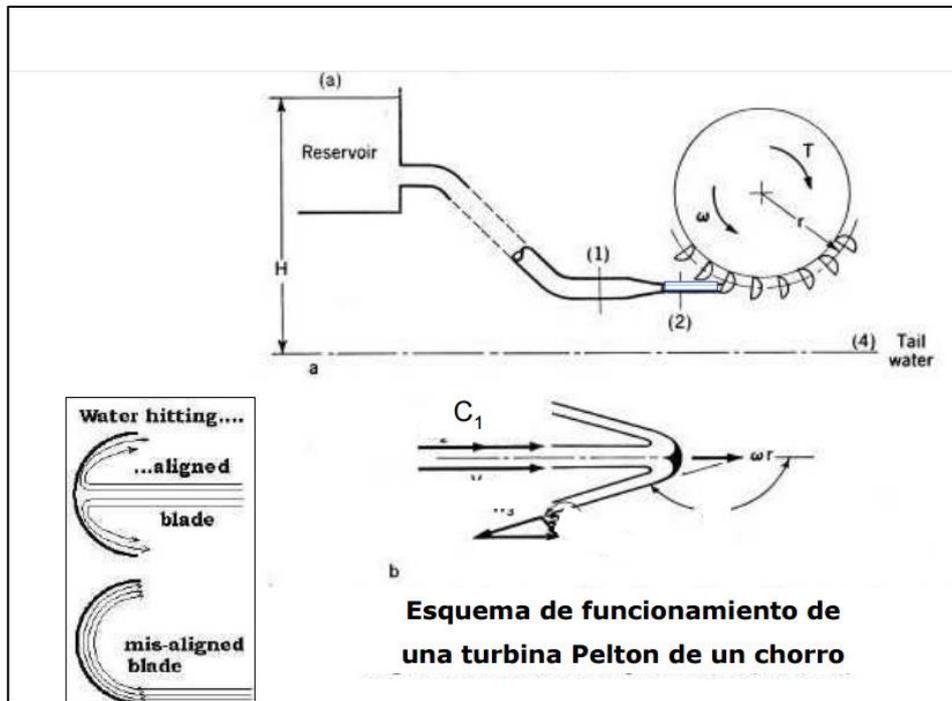


Figura 5: Esquema de funcionamiento de una turbina Pelton de un chorro

Fuente: Ing. F. García Gutiérrez, “Obras Hidráulicas”, Desarrollos Hidroeléctricos y Turbinas.

Funcionamiento

La tobera o inyector lanza directamente el chorro de agua contra la serie de paletas en forma de cuchara montadas alrededor del borde de una rueda, el doble de la distancia entre el eje de la rueda y el centro del chorro de agua se denomina diámetro Pelton. El agua acciona sobre las cucharas intercambiando energía con la rueda en virtud de su cambio de cantidad de movimiento, que es casi de 180° . Obsérvese en la figura anexa un corte de una pala en el diámetro Pelton; el chorro de agua impacta sobre la pala en el medio, es dividido en dos, los cuales salen de la pala en sentido casi opuesto al que entraron, pero jamás puede salir el chorro de agua en dirección de 180° ya que si fuese

así el chorro golpearía a la pala sucesiva y habría un efecto frenado. La sección de entrada del fluido a la cuchara se denomina 11, así como 12 a la sección de salida. Cuando la presión total de energía de la columna de agua se convierte en energía cinemática, la presión del agua no cambia durante el flujo dentro de los ductos, entonces la presión en la descarga es igual a la de entrada. Estas turbinas se conocen como turbinas de presión constantes. Si existe una parte de la energía de presión en los ductos, se convierte en energía cinemática, la velocidad de salida no será igual a la de entrada. El agua fluye a través de los tubos bajo una sobrepresión, este tipo de turbinas se conocen como turbinas de presión. En las turbinas de presión, el flujo de agua es acelerada en el ducto lo que ocasiona una reacción en las paletas. [6]

Existe otra clasificación para las turbinas hidráulicas en la dirección que fluye el agua respecto al eje de la turbina. Cuando el flujo del agua es paralelo eje, se conoce como turbina de flujo axial. Cuando el agua fluye en dirección perpendicular al eje de la turbina, se conoce como turbinas de flujo radial y cuando el flujo en el espacio cambia de radial a axial, se conocen como turbinas de flujo mixto. La turbina Pelton es de flujo tangencial. [6] Tenemos:

- Micro turbinas Pelton

Se usan en zonas rurales aisladas donde se aprovechan los recursos hidráulicos que existen en pequeños ríos o quebradas para transformarlos en energía mecánica o eléctrica. Para hacer posible este proceso, se tiene que hacer un grupo de obras, así como obtener equipos especiales; estos se dividen normalmente en tres grupos: obras civiles, equipo electromecánico y redes eléctricas.

- Mini turbinas Pelton

Según las normas europeas, las mini centrales hidroeléctricas son aquellas que están comprendidas en el rango de 100kW a 1000kW de potencia. Según la organización Latinoamericana de Energía clasifica en el rango de 50kW a 500kW. Los modelos desarrollados por ITDG cubren el rango de 50kW a 1000kW. [6]

Elementos básicos de una turbina Pelton.

Son esencialmente los siguientes:

- a) Distribuidor:
- Cámara de distribución
 - Sistema de regulación
 - Inyector (tobera, aguja, deflector)
- b) Rodete:
- Rueda
 - Alabes
- c) Eje
- d) Sistema de frenado
- e) Carcasa
- f) Cámara de descarga
- g) Blindaje

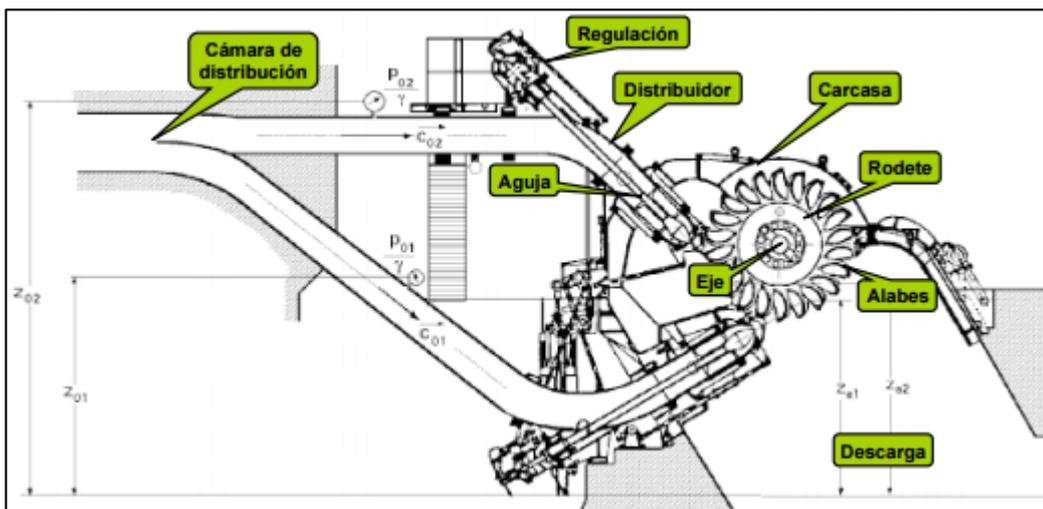


Figura 6 Componentes de la Turbina Pelton

Fuente: P. Fernández Díez; Mecánica de fluidos

Distribuidor.

Está constituido por uno o varios equipos de inyección de agua, cada uno formado por varios elementos mecánicos. Tiene como misiones:

- Dirigir un chorro de agua hacia el rodete.
- Regular el caudal que ha de fluir hacia dicho rodete, llegando a cortarlo totalmente cuando proceda.
- Para paradas rápidas debe contar con una pantalla deflectora de desvíe el chorro a la salida.

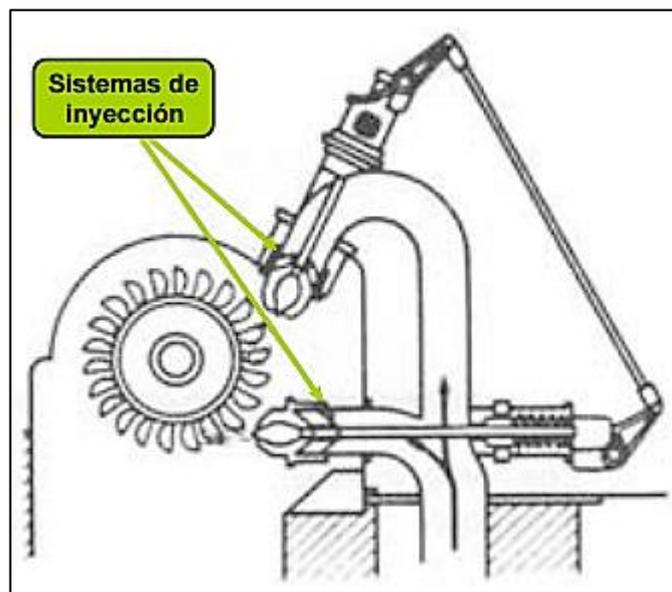


Figura 7 Sistema de inyección

Fuente: Fernández Diez; mecánica de fluidos

Inyector.

El Número de quipos de inyección, colocados circunferencialmente alrededor de un rodete, depende de la potencia y características del grupo, según las condiciones de salto de agua.

- Turbinas Pelton con eje vertical hasta seis inyectores sobre un mismo rodete.
- Turbinas Pelton con eje horizontal los inyectores instalados son uno o dos.

Cada equipo de inyección está formado:

- Cámara de distribución

Consiste en la extensión de la tubería forzada, situada a ésta por medio de brida de conexión, después a la situación de la válvula de entrada a turbina, según la recorrido general del agua. Tiene como misión esencial orientar el caudal de agua. Igualmente, sirve de soporte a los demás mecanismos que integran el distribuidor. Inyector.

Es el elemento mecánico destinado a dirigir y regular el chorro de agua. Transforma la energía de presión en cinética (la velocidad del agua puede ser superior a 150 m/s). Está compuesto por:

- Una tobera
- Una aguja
- Un deflector
- Un regulador de velocidad

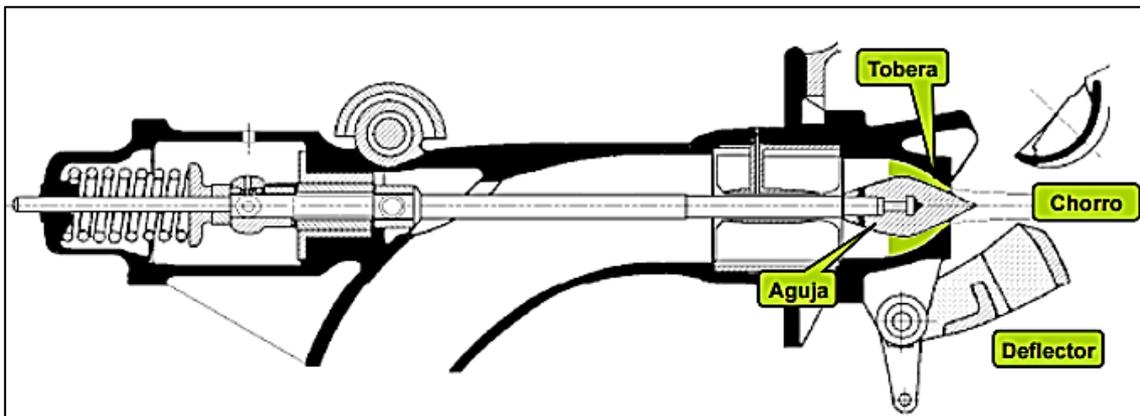


Figura 8 Esquema del Inyector

Fuente: Fernández Diez; mecánica de fluidos

- Aguja.

Vástago de acero muy duro situado concéntricamente dentro del cuerpo de la tobera, guiado por medio de cojinetes sobre los cuales tiene vaivén de desplazamiento longitudinal en dos sentidos.

- Tobera.

Boquilla, normalmente con orificio de área circular (puede congeniar de otra sección), de un diámetro aproximado entre 5 y 30 cm, instalada en la extensión de la cámara de distribución

- Deflector.

Dispositivo mecánico que, a modo de pala, puede ser intercalado con mayor o menor incidencia en la trayectoria del chorro de agua, entre la tobera y el rodete Sirve para evitar el embalamiento y el golpe de ariete (cierres bruscos)

4.2.7. Sistema Regulador

Una de las vías más económicas para la producción de energía eléctrica es a partir de la hidroenergía en aquellos lugares donde sea posible; pero la electricidad se valora no solamente por su cantidad, sino también por su calidad. Uno de los problemas más comunes actualmente en las pequeñas, mini y microcentrales hidroeléctricas, es la mala calidad de la energía y esto se debe a una deficiencia en la regulación del voltaje y la frecuencia, aspecto al que debemos prestar la mayor atención.

Para el control automático de la frecuencia y el voltaje generado en pequeñas, mini y microcentrales hidroeléctricas que trabajan de forma aislada, se utilizan básicamente dos métodos: por regulación del flujo de agua que entra a la turbina, y por el control de la carga eléctrica que demandan los consumidores. [7]

Para la regulación del flujo se utilizan tres tipos de reguladores:

1. Regulador mecánico o manual.
2. Regulador hidráulico.
3. Regulador eléctrico-electrónico.

Por su parte, para el control de la frecuencia y el voltaje a través del control de la demanda de los consumidores, se utiliza un controlador electrónico, nombrado «de carga fantasma». Existe un «regulador mixto» que permite la regulación del caudal de agua que entra a la turbina, y que, por otra parte, actúa sobre la petición eléctrica de los consumidores.

- Regulador mecánico o manual

Consiste en abrir o cerrar una válvula de forma manual, para dejar pasar más o menos flujo de agua a la turbina.

Con la regulación manual es muy difícil garantizar que la frecuencia y el voltaje se mantengan constantes, pues estos parámetros dependen de la rotación de la turbina, y ésta varía con la demanda eléctrica; es decir, si la demanda aumenta, la turbina disminuye su velocidad de rotación, y viceversa.

La rotación de la turbina es muy variable, pues sólo es constante cuando la carga eléctrica de los consumidores es igual a la potencia real que está entregando la turbina, según un caudal y una altura de agua concretos; pero la carga de los consumidores es muy variable, ya que constantemente se están apagando y encendiendo equipos consumidores, por lo que, para que el equilibrio entre la demanda y la potencia sean iguales, el operador tendría que estar abriendo y cerrando la válvula de entrada de agua a la turbina cada vez que se apague o encienda un consumidor.[5]

Esa forma de operar las mini y microcentrales hidroeléctricas, sólo se aplica cuando los parámetros de frecuencia y voltaje no son importantes para los consumidores, o cuando no se dispone de otro tipo de regulador. [5]

Ventajas: Es el más sencillo y barato, controla el flujo de agua a la turbina, y su mantenimiento es simple.

Desventajas: Requiere de un operador permanentemente, y no garantiza, de forma eficaz, mantener constante la frecuencia y el voltaje.

- Regulador hidráulico

Es un equipo que tiene incorporado un regulador de watt enlazado mecánicamente al eje de la turbina, de manera que sus revoluciones varían con las de la turbina. Su función es abrir o cerrar la válvula de entrada de lubricante a un pistón hidráulico, el cual está acoplado mecánicamente a la válvula que controla el flujo de agua que entra a la turbina.

De esta forma, cada sucesión que aumenta o disminuye la petición, aumentan o disminuyen las revoluciones de la turbina, y con ellas, las del regulador de watt. Esta alternancia del regulador provoca que se abra o se cierre la válvula que da peldaño al aceite que va al pistón controlador de la cantidad de agua que entra a la turbina, y con

ello, se logra de nuevo el equilibrio entre la potencia de la turbina y la potencia demandada.

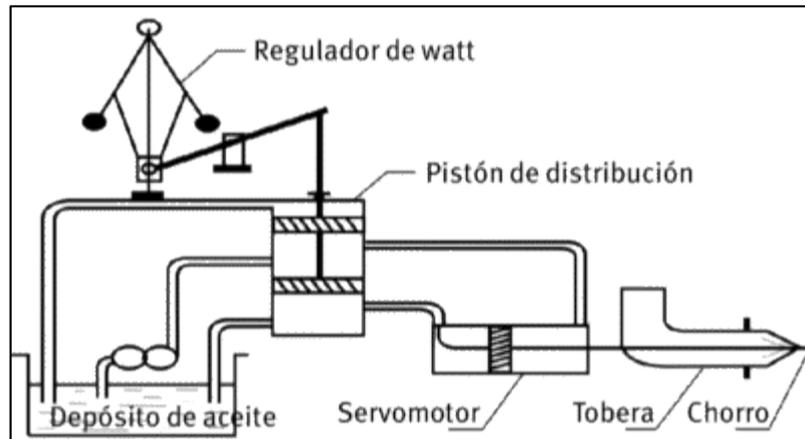


Figura 9 Regulador hidráulico

Fuente: Fernández Diez; mecánica de fluidos

Este tipo de regulador es el más universal, y su aplicación se puede aclimatar a todo tipo de central hidroeléctrica, siendo su hábito más generalizado en las grandes centrales hidroeléctricas. Ventajas: Controla el flujo de agua que entra a la turbina, mantiene con estrechas oscilaciones la frecuencia y el voltaje, y trabaja de fase automática. Desventajas: Es caro, su respuesta ante las alteraciones de frecuencia y voltaje son lentas, y requiere personal calificado para su mantenimiento.

- Regulador eléctrico-electrónico

Es un regulador electrónico acoplado eléctricamente con un motor que gira en entreambos sentidos. Este motor está acoplado mecánicamente a la válvula que controla la entrada de agua a la turbina; en otras palabras, cuando aumenta la frecuencia, el regulador electrónico envía una señal al motor para que gire la válvula de entrada, y disminuya el caudal de agua que entra a la turbina; y cuando disminuye la frecuencia, envía una señal al motor para que abra la válvula. De esta forma se controla la rapidez de rotación de la turbina, y con ello, la frecuencia y el voltaje.

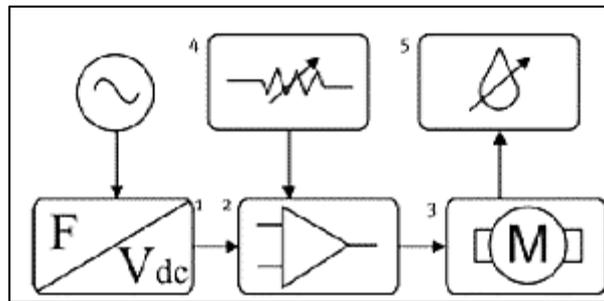


Figura 10 Regulador eléctrico-electrónico

Fuente: Internet

Esquema de un regulador eléctrico – electrónico

- Conversor de frecuencia
- Circuito comparador
- Valor de referencia
- Motor eléctrico
- Válvula d entrada de agua

Con este tipo de regulación, debido a la inercia del procedimiento, no se logra suministrar constante la frecuencia, existiendo siempre estrechas oscilaciones de la misma, en torno a la frecuencia de trabajo (60 Hz). Ventaja:

Controla el flujo de agua que entra a la turbina. Desventajas: Es relativamente caro, su respuesta es lenta ante las variaciones de la frecuencia y el voltaje, se mantienen cortas oscilaciones de la frecuencia y requiere personal calificado para su mantenimiento.

- Regulador electrónico

El regulador electrónico, o regulador de carga fantasma, tiene como función mantener constante la potencia generada; es decir, la turbina funciona a potencia constante:

$$P_g = P_d + P_c$$

Donde:

P_g: Potencia generada.

P_d: Potencia disipada en el banco de resistencias.

P_c: Potencia consumida por la población.

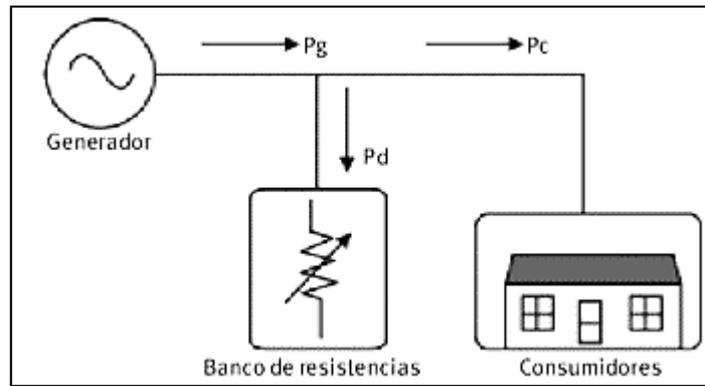


Figura 11:Regulador electrónico

Fuente: Internet

La energía no gastada se disipa en exterioridad de calor en un banco de resistencias, que generalmente se ubica en la casa de maquinarias. Esta energía disipada está en relación de la variación de la frecuencia generada por el generador de la turbina. El regulador está constantemente comparando la frecuencia generada, con un patrón que por lo que precede se fijó como referencia. Si la frecuencia generada es máxima que la de remisión patrón, el regulador desvía más energía al banco de resistencias. De la misma manera, si la frecuencia generada es reducida que la de cita patrón, el regulador desvía salvo energía al banco de resistora. Esto último sucede cuando en el consumidor varió la exigencia de energía, y el regulador realizó los convenios para mantener fijos los valores de frecuencia y voltaje. Para el control de la subsistencia disipada se utilizan componentes electrónicos, tales como tiristores, triacs, transistores de garras, etcétera. En este argumento de cuidado por disipación de energía, la respuesta a las variantes de la frecuencia es prácticamente instantánea. En lugares a adonde el caudal de agua sea limitado, no es recomendable este tipo de regulador, debido a que se gasta determinada masa de agua para producir la energía que es requerido disipar para asegurar constantes la frecuencia y el voltaje.

Ventajas: Es relativamente barato, mantiene constantes la frecuencia y el voltaje, y trabaja de forma semiautomática.

Desventaja: No controla el flujo de agua, por lo que, en lugares donde ésta es escasa, no se debe instalar.

- Regulador mixto

Basado en el funcionamiento del regulador electrónico, al cual se le acopla eléctricamente un motor eléctrico que gira en ambos sentidos, por lo que el regulador mixto tiene las características del regulador electrónico y las del eléctrico electrónico; es decir, tiene la posibilidad de controlar la demanda eléctrica y el flujo de agua que entra a la turbina.

Su funcionamiento es totalmente automático y el ajuste de la frecuencia es instantáneo, ya que se realiza por el regulador electrónico, y la disipación de energía es mucho menor que en el caso del regulador electrónico.

Por otra parte, una vez que el banco de resistencia cede la energía que estaba disipando, el motor eléctrico hace girar la válvula de entrada para que varíe el flujo de agua, y lleve de nuevo al banco de resistencias a disipar la misma cantidad de energía que estaba disipando antes del desequilibrio. Con este trabajo combinado se logra mantener la frecuencia y el voltaje constantes y, además, disminuir la cantidad de agua empleada en disipar energía.

Ventajas: Controla el flujo de agua que entra a la turbina y mantiene constantes la frecuencia y el voltaje



Figura 12 Reglador Mixto

Fuente: Internet

La electricidad producida mini y microcentrales hidroeléctricas es una de las maneras más adecuadas para obtener el desarrollo local con una energía sostenible

Desventajas: Es costoso y requiere personal calificado para su mantenimiento. La electricidad producida en cortas, mini y microcentrales hidroeléctricas, por otra parte de su primacía económica, es una de las maneras más aparejadas para avanzar el desarrollo nacional con una energética sana, sin contaminación y de forma independiente (Fig. 4). Si el proyecto, la construcción y operación de la estación es correcta, la calidad de la corriente eléctrica puede ser óptima.

4.2.8. Matlab

“MATLAB (abreviatura de Matrix Laboratory, "laboratorio de matrices") es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows, Mac OS X y GNU/Linux.

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multi dominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (toolboxes); y las de Simulink con los paquetes de bloques (blocksets).

Es un software muy usado en universidades y centros de investigación y desarrollo. En los últimos años ha aumentado el número de prestaciones, como la de programar directamente procesadores digitales de señal o crear código VHDL.” [13]

Características principales

- Lenguaje de alto nivel para cálculos de ingeniería y científicos.
- Entorno de escritorio afinado para la exploración, el diseño y la solución de problemas de manera iterativa.
- Gráficos para visualizar datos y herramientas para crear gráficos personalizados.
- Apps para ajustar curvas, clasificar datos, analizar señales y muchas otras tareas relacionadas con dominios concretos.
- Toolboxes complementarias para una amplia variedad de aplicaciones de ingeniería y científicas.

- Herramientas para crear aplicaciones con interfaces de usuario personalizadas.
- Interfaces para C/C++, Java®, .NET, Python®, SQL, Hadoop® y Microsoft® Excel®.
- Opciones de despliegue sin coste en concepto de derechos de licencia para compartir programas de MATLAB con los usuarios finales.

MATLAB está diseñado para ingenieros y científicos [14]

MATLAB proporciona un entorno de escritorio adaptado a los flujos de trabajo iterativos de la ingeniería y la ciencia. Las herramientas integradas posibilitan la exploración simultánea de datos y programas, lo que le permite evaluar más ideas en menos tiempo.

- Puede pre visualizar, seleccionar y pre procesar los datos que desee importar.
- Un vasto conjunto de funciones matemáticas integradas posibilita sus análisis de ingeniería y científicos.
- Las funciones de trazado 2D y 3D le permiten visualizar y comprender sus datos, además de comunicar los resultados.
- Las apps de MATLAB le permiten llevar a cabo tareas de ingeniería habituales sin tener que programar. Visualice cómo funcionan diferentes algoritmos con sus datos, y lleve a cabo iteraciones hasta conseguir los resultados que busca.
- Las herramientas de edición y depuración integradas le permiten explorar con rapidez diversas opciones, refinar sus análisis y llevar a cabo iteraciones hasta alcanzar una solución óptima.
- Puede capturar su trabajo y de manera que tenga una redacción compatible e interactiva.

Siempre tiene a su alcance documentación escrita de manera profesional por ingenieros y científicos para mantener su productividad. Un equipo de soporte técnico fiable responde en tiempo real a sus preguntas con rapidez. Y puede sacar partido del conocimiento y la experiencia de los más de 100 000 miembros de la comunidad y los ingenieros de MathWorks en MATLAB Central, un lugar de intercambio abierto para usuarios de MATLAB y Simulink.

MATLAB y las toolboxes complementarias están integrados entre sí y diseñados para trabajar conjuntamente. Le ofrecen funcionalidades específicas para aplicaciones

científicas y de ingeniería, que se han desarrollado de manera profesional, probado rigurosamente, mejorado con la experiencia en cada campo y están completamente documentadas. [13]

Simulink.

Simulink es un entorno de programación visual, que funciona sobre el entorno de programación Matlab.

Es un entorno de programación de más alto nivel de abstracción que el lenguaje interpretado Matlab (archivos con extensión .m). Simulink genera archivos con extensión. mdl (de "model").

Luego, se puede apreciar un sistema de control automático, junto a su modelización y finalmente un sistema de un automóvil, vinculando la simulación a un entorno de realidad virtual.

Simulink viene a ser una herramienta de simulación de modelos o sistemas, con cierto grado de abstracción de los fenómenos físicos involucrados en los mismos. Se hace hincapié en el análisis de sucesos, a través de la concepción de sistemas (cajas negras que realizan alguna operación).

Es ampliamente usado en Ingeniería Electrónica en temas relacionados con el procesamiento digital de señales (DSP), involucrando temas específicos de ingeniería biomédica, telecomunicaciones, entre otros. También es muy utilizado en Ingeniería de Control y Robótica. [13]

4.2.9. Sistema de control

Un sistema de control es un conjunto de dispositivos encargados de administrar, ordenar, dirigir o regular el comportamiento de otro sistema, con el fin de reducir las probabilidades de fallo y obtener los resultados teóricamente verdaderos. Por lo general, se usan sistemas de control industrial en procesos de producción industriales para controlar equipos o máquinas. [5]

Existen dos clases comunes de sistemas de control, sistemas de lazo abierto y sistemas de lazo cerrado. En los sistemas de control de lazo abierto la salida se genera dependiendo de la entrada; mientras que en los sistemas de lazo cerrado la salida depende de las consideraciones y correcciones realizadas por la retroalimentación. Un sistema de lazo

cerrado es llamado también sistema de control con realimentación. Los sistemas de control más modernos en ingeniería automatizan procesos sobre la base de muchos parámetros y reciben el nombre de controladores de automatización programables (PAC). [5]

Sistema: conjunto de elementos unidos y en interacción. Un sistema no necesariamente es físico y puede aplicarse a fenómenos abstractos y dinámicos, tales como los que se encuentran en economía. Por tanto, la palabra sistema debe interpretarse como una implicación de sistemas físicos, biológicos, económicos y similares.

Control: selección de las entradas de un sistema de manera que los estados o salidas cambien de acuerdo a una manera deseada. [5] Los elementos son:

- Siempre existe para verificar el logro de los objetivos que se establecen en la planeación.
- Medición. Para controlar es imprescindible medir y cuantificar los resultados.
- Detectar desviaciones. Una de las funciones inherentes al control, es descubrir las diferencias que se presentan entre la ejecución y la planeación.
- Establecer medidas correctivas. El objeto del control es prever y corregir los errores.
- Factores de control; Cantidad, Tiempo, costo, Calidad.

Controlador: (Electrónica). Es un dispositivo electrónico que emula la capacidad de los seres humanos para ejercer control. Por medio de cuatro acciones de control: compara, calcula, ajusta y limita.

Proceso: operación o desarrollo natural progresivamente continuo, marcado por una serie de cambios graduales que se suceden uno al otro en una forma relativamente fija y que conducen a un resultado o propósito determinados. Operación artificial o voluntaria progresiva que consiste en una serie de acciones o movimientos controlados, sistemáticamente dirigidos hacia un resultado o propósito determinados. Ejemplos: procesos químicos, económicos y biológicos.

Supervisión: acto de observar el trabajo y tareas de otro (individuo o máquina) que puede no conocer el tema en profundidad.

Sistema de control de lazo abierto

Es aquel sistema en que solo actúa el proceso sobre la señal de entrada y da como resultado una señal de salida independiente a la señal de entrada, pero basada en la primera. Esto significa que no hay retroalimentación hacia el controlador para que éste pueda ajustar la acción de control. Es decir, la señal de salida no se convierte en señal de entrada para el controlador.

Sistema de control de lazo cerrado

Son los sistemas en los que la acción de control está en función de la señal de salida. Los sistemas de circuito cerrado usan la retroalimentación desde un resultado final para ajustar la acción de control en consecuencia [10]

El control en lazo cerrado es imprescindible cuando se da alguna de las siguientes circunstancias:

Cuando un proceso no es posible de regular por el hombre.

Una producción a gran escala que exige grandes instalaciones y el hombre no es capaz de manejar.

Vigilar un proceso es especialmente difícil en algunos casos y requiere una atención que el hombre puede perder fácilmente por cansancio o despiste, con los consiguientes riesgos que ello pueda ocasionar al trabajador y al proceso.

Sus características son:

- Ser complejos, pero amplios en cantidad de parámetros.
- La salida se compara con la entrada y le afecta para el control del sistema.
- Su propiedad de retroalimentación.
- Ser más estable a perturbaciones y variaciones internas.

Componente básica del sistema de control.

Tablero de control

Sirve para monitorear y regular la frecuencia en función del caudal de agua y el consumo energético, entre otras.

Interior del tablero de control en el interior del tablero se observa a grandes rasgos las placas driver y MCU. Las protecciones térmicas y los relés de seguridad de voltaje y frecuencia.

En el exterior de del tablero se encuentra el analizador de fases y la llave térmica para el consumo.

La turbina se puede fabricar para presiones de trabajo en acuerdo a la altura del salto de agua en donde va exterior del tablero de control trabajar. Se diseñan desde 1 kg/cm² hasta 20 kg/cm². Para capacidades mayores de generación, hay modelos de hasta 2000 KVA, pero está en proyecto actualmente una unidad de 6000KVA. Estas unidades funcionan en embalses de ríos, o pequeños lagos. Poseen control de compuerta, y control de flujo Tablero de control con indicadores y PLC de cañería de alimentación. La caja multiplicadora de velocidades se coloca para adaptar la velocidad de trabajo de la turbina, a la velocidad del generador (normalmente de 1500 rpm).

PLC

Un controlador lógico programable, más conocido por sus siglas en inglés PLC (Programmable Logic Controller) o por autómatas programables, es una computadora utilizada en la ingeniería automática o automatización industrial, para automatizar procesos electromecánicos, tales como el control de la maquinaria de la fábrica en líneas de montaje o atracciones mecánicas.

Los PLC son utilizados en muchas industrias y máquinas. A diferencia de las computadoras de propósito general, el PLC está diseñado para múltiples señales de entrada y de salida, rangos de temperatura ampliados, inmunidad al ruido eléctrico y resistencia a la vibración y al impacto. Los programas para el control de funcionamiento de la máquina se suelen almacenar en baterías, copia de seguridad o en memorias no volátiles. Un PLC es un ejemplo de un sistema de tiempo real «duro», donde los resultados de salida deben ser producidos en respuesta a las condiciones de entrada dentro de un tiempo limitado, de lo contrario no producirá el resultado deseado

La función básica y primordial del PLC ha evolucionado con los años para incluir el control del relé secuencial, control de movimiento, control de procesos, sistemas de control distribuido y comunicación por red. Las capacidades de manipulación, almacenamiento, potencia de procesamiento y de comunicación de algunos PLCs

modernos son aproximadamente equivalentes a las computadoras de escritorio. Un enlace-PLC programado combinado con hardware de E/S remoto, permite utilizar un ordenador de sobremesa de uso general para suplantar algunos PLC en algunas aplicaciones. En cuanto a la viabilidad de estos controladores de ordenadores de sobremesa basados en lógica, es importante tener en cuenta que no se han aceptado generalmente en la industria pesada debido a que los ordenadores de sobremesa ejecutan sistemas operativos menos estables que los PLC, y porque el hardware del ordenador de escritorio está típicamente no diseñado a los mismos niveles de tolerancia a la temperatura, humedad, vibraciones, y la longevidad como los procesadores utilizados en los PLC. Además de las limitaciones de hardware de lógica basada en escritorio; sistemas operativos tales como Windows no se prestan a la ejecución de la lógica determinista, con el resultado de que la lógica no siempre puede responder a los cambios en el estado de la lógica o del estado de entrada con la consistencia extrema en el tiempo como se espera de los PLC. Sin embargo, este tipo de aplicaciones de escritorio lógicos encuentran uso en situaciones menos críticas, como la automatización de laboratorio y su uso en instalaciones pequeñas en las que la aplicación es menos exigente y crítica, ya que por lo general son mucho menos costosos que los PLC.

Sus partes fundamentales son la unidad central de proceso o CPU, y las interfaces de entrada y salida. La CPU es el cerebro del PLC y está formado por el procesador y la memoria. El procesador se encarga de ejecutar el programa escrito por el usuario, que se encuentra almacenado en la memoria. Además, el procesador se comunica con el exterior mediante sus puertos de comunicación y realiza funciones de autodiagnóstico. La interfaz de entrada se ocupa de adaptar las señales provenientes de los elementos captadores, tales como botoneras, llaves, límites de carrera a nivel que el CPU pueda interpretar como información. Por otra parte, cuando la CPU resuelve, a través de un programa interno, activa algún elemento de campo, la interfaz de salida es la encargada de administrar la potencia necesaria para comandar el actuador. [15]

Sensores

Un sensor es un objeto capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas en variables eléctricas. Las variables de instrumentación pueden ser por ejemplo: intensidad lumínica, temperatura, distancia, aceleración, inclinación, presión, desplazamiento, fuerza, torsión, humedad, movimiento,

pH, etc. Una magnitud eléctrica puede ser una resistencia eléctrica (como en una RTD), una capacidad eléctrica (como en un sensor de humedad), una tensión eléctrica (como en un termopar), una corriente eléctrica (como en un fototransistor), etc.

Un sensor se diferencia de un transductor en que el sensor está siempre en contacto con la variable de instrumentación con lo que puede decirse también que es un dispositivo que aprovecha una de sus propiedades con el fin de adaptar la señal que mide para que la pueda interpretar otro dispositivo. Por ejemplo, el termómetro de mercurio que aprovecha la propiedad que posee el mercurio de dilatarse o contraerse por la acción de la temperatura. Un sensor también puede decirse que es un dispositivo que convierte una forma de energía en otra.

4.2.10. Sistema PID

El control proporcional integral derivativo PID es la estrategia de control más usada en aplicaciones industriales; se estima que más del 90% de los lazos de control utilizan el control PID. Es interesante señalar que los controladores industriales que se usan hoy en día utilizan esquemas de control PID. Los controladores analógicos son principalmente de tipo hidráulico, neumático, electrónico, eléctrico o sus combinaciones. En la actualidad muchos de estos se transforman en formas digitales mediante el uso de las PC y los microprocesadores. Se puede indicar que un controlador PID responde a la siguiente ecuación: [10]

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

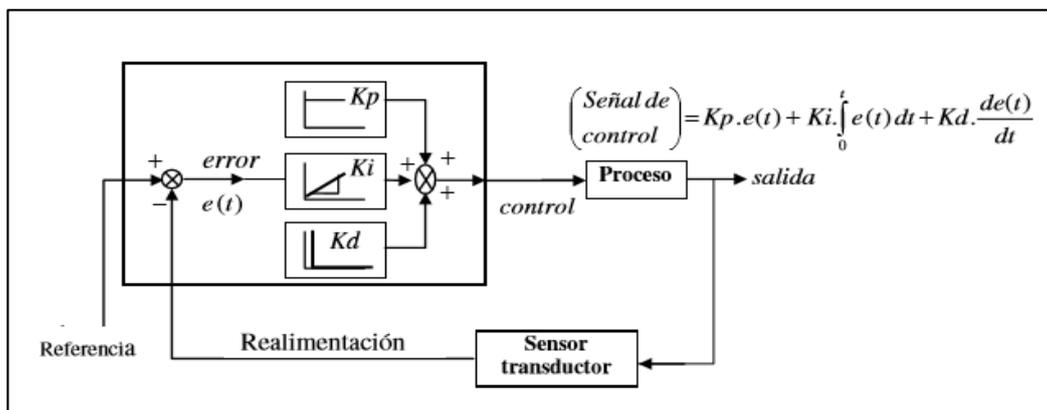


Figura 13 Diagrama de control de proceso PID

Fuente: K. Ogata, “Ingeniería de control moderna”, cuarta edición, 669.703

Donde $e(t)$ es el error de la señal y $u(t)$ es la entrada de control del proceso. K_p es la ganancia proporcional, T_i es la constante de tiempo integral y T_d es la constante de tiempo derivativo.

En el dominio de la frecuencia, usando la Transformada de La Place el controlador PID se puede escribir como:

$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) E(s)$$

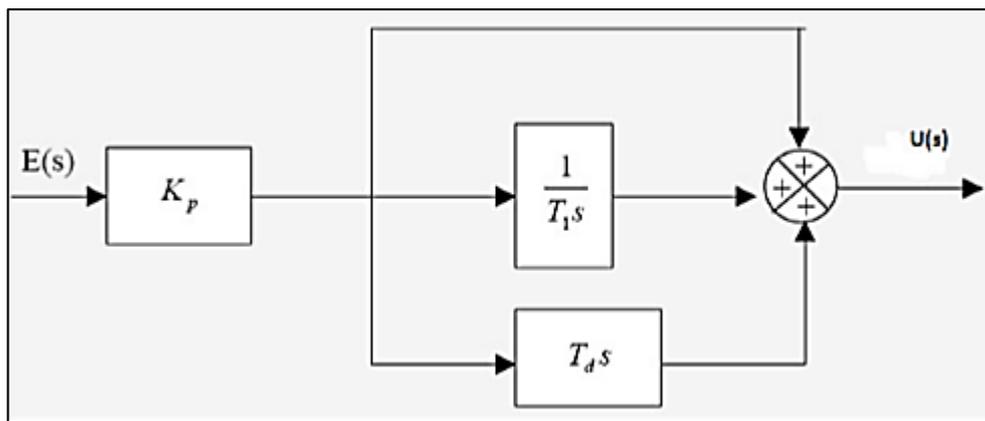


Figura 14 Control PID en Laplace

Fuente: K. Ogata, “Ingeniería de control moderna”, cuarta edición, 669-703

El algoritmo PID en tiempo discreto se puede escribir para una implementación digital en su transformada Z de la siguiente forma:

$$U(z) = \left[K_p + \frac{K_i}{1 - z^{-1}} + K_d(1 - z^{-1}) \right] E(z)$$

La implementación de controladores PID en su versión digital el cual significa que puede operar en el dominio del tiempo discreto.

Existe una tendencia fuerte de utilizar controladores digitales en vez de los controladores analógicos por los bajos costos de las computadoras PC y los microprocesadores.

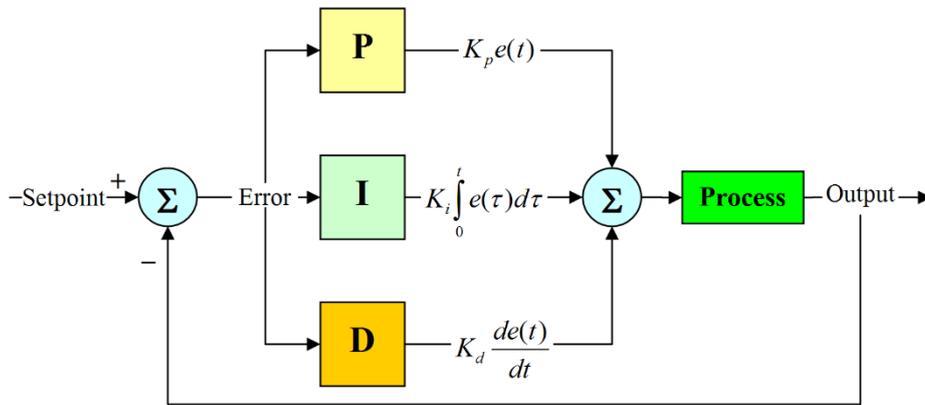


Figura 15 Control PID digital

Fuente: Internet

Control Proporcional

El control proporcional es la variación de la señal de control u en forma proporcional a la señal error. Esto lo podemos describir en la siguiente formula:

$$u = u_0 + K \cdot e$$

Donde u_0 es el normal valor de la señal control para un error $e = 0$ y en donde el parámetro K es el amplificador regulador. Donde u es la salida y el error en un instante de este modo cuanto más grande sea el error más rápida será la respuesta y conforme el error se reduzca, la respuesta será más pequeña hasta que realmente el error sea cero y la respuesta nula ya que el valor deseado es el mismo que el valor actual.

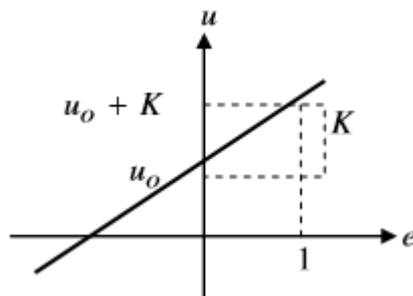


Figura 16: Relación entre la señal error y la señal control

Un regulador en la práctica tiene un límite para su valor máximo y su valor mínimo en la señal de control, esto significa que la señal de control en relación con la señal error solamente es válido para un determinado rango.

La entrada es el error de e y la salida es la señal de control u .

$$u = \begin{cases} u_{\max} & e > e_0 \\ Ke + u_0 & -e_0 < e < e_0 \\ u_{\min} & e < -e_0 \end{cases}$$

Si comparamos el control On – Off con el control proporcional vemos que el control proporcional nos da un control suave. La señal de control no va entre dos valores sino va en un cambio sucesivo.[10]

Control integral

La función principal de la acción integral es asegurar que la salida del proceso concuerde con la referencia en estado estacionario. Con el controlador proporcional, normalmente existe un error en estado estacionario. Con la acción integral, un pequeño error positivo siempre producirá un incremento en la señal de control y un error negativo siempre dará una señal decreciente sin importar cuán pequeño sea el error. El siguiente argumento muestra de forma simple que el error en estado estacionario disminuirá con la acción integral. Asuma que el sistema está en estado estacionario con una señal de control constante (u_0) y un error constante (e_0). Entonces se tiene que la señal de control está dada por:

$$U_o = K_p(e_o + \frac{e_o}{T_i} t)$$

El Controlador Integral I va a integrar la señal error con la siguiente ecuación:

$$u(t) = \frac{1}{T_1} \int_0^t e(t) dt$$

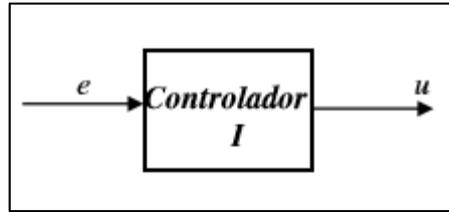


Figura 17 Transferencia de control

Fuente: K. Ogata, “Ingeniería de control moderna”, cuarta edición, 669.703

Donde el tiempo de integración T_i decide la velocidad de integración. La señal de salida del regulador Integrador al lado de un tiempo T_i depende de cuán grande es el área de integración en el punto de tiempo T_i . En la siguiente figura en donde se muestra parte de la señal de salida de control del integrador cambia según la entrada de la señal error. Se ve que la señal de salida $u(t)$ crece mientras se mantenga el error $e(t)$ y cuando cambia y la señal error se hace cero se mantiene y cuando cambia la señal error en negativo la pendiente se vuelve negativo hasta que $e(t)$ se vuelve cero y la señal $u(t)$ se mantiene todo esto lo vemos en las figuras que mostramos:

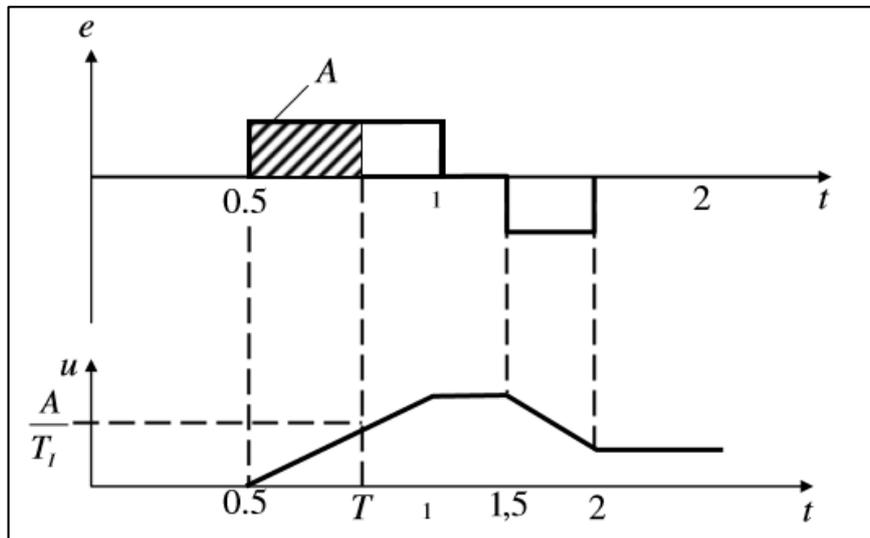


Figura 18 Control Integral

Fuente: K. Ogata, “Ingeniería de control moderna”, cuarta edición, 669-703

Control Derivativo.

La función del control derivativo es que cuando existe un cambio en la señal de entrada que va a ser la señal error e se va a producir un cambio en la señal de salida. [10]

Esto lo vemos en el siguiente diagrama de bloques y su ecuación.

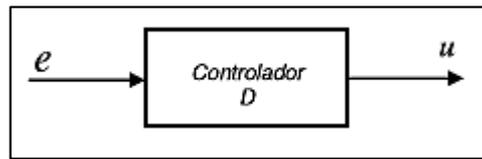


Figura 19 Control Derivativo

Fuente: Internet

$$u(t) = T_D \cdot e'(t) = T_D \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

Donde T_D es la constante de tiempo derivativo.

4.2.11. Controlador PI

Frecuentemente se combina el controlador P y I y se llama Controlador PI este tipo de combinación nos da buenos resultados. El diagrama de bloques y el algoritmo del PI controlador se representa de la siguiente manera: [10]

$$u(t) = K[e(t) + \frac{1}{T_1} \int_0^t e(t) dt]$$

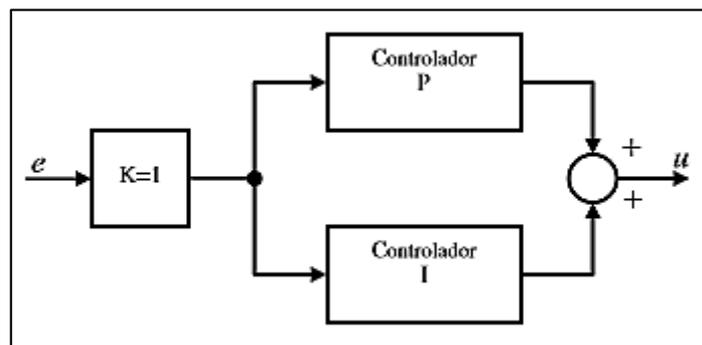


Figura 20 Diagrama de bloques del controlador

Fuente: K. Ogata, “Ingeniería de control moderna”, cuarta edición, 669-703

El tiempo de integración T_i para un PI regulador se elige normalmente un valor alto el cual significa que la señal del integrador I va a cambiar muy despacio comparado con el control proporcional al lado de una señal error.

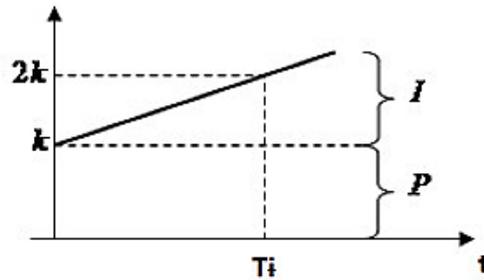


Figura 21 Respuesta escalón para un controlador PI

Fuente: Internet

La implementación de un control digital es en realidad el reemplazo del controlador analógico por uno digital como vemos en la siguiente figura.

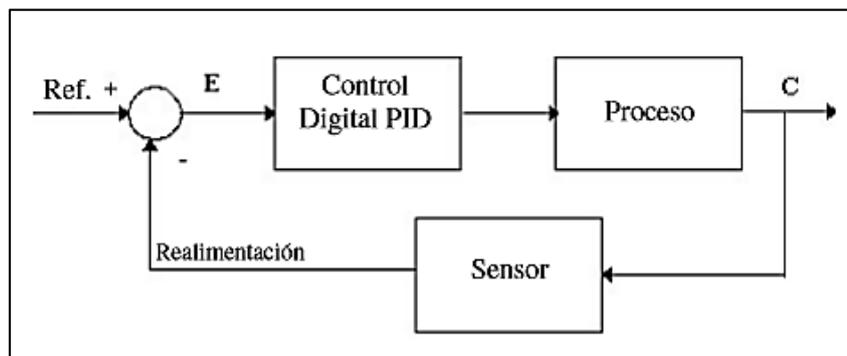


Figura 22 Diagrama de bloques de un sistema digital

Fuente: Propia

El primer paso en la implementación de un controlador digital es desarrollar el algoritmo de control en donde el controlador analógico es reemplazado con una fórmula la cual va a ser solucionado por la PC con un software adecuado.

Controlador de Tiempo Discreto PID

El regulador PID se puede realizar de diversas maneras con ayuda de una PC o con microprocesadores y su software.

En un regulador digital el software trabaja en tiempo discreto mientras el sistema físico de control trabaja en tiempo continuo. Con un tiempo discreto la señal de control solo cambia en puntos del tiempo discretos por ejemplo una vez por segundo o en forma

frecuente. La medición de la señal es así mismo discreto porque se muestrea en unos puntos del tiempo ya establecidos.

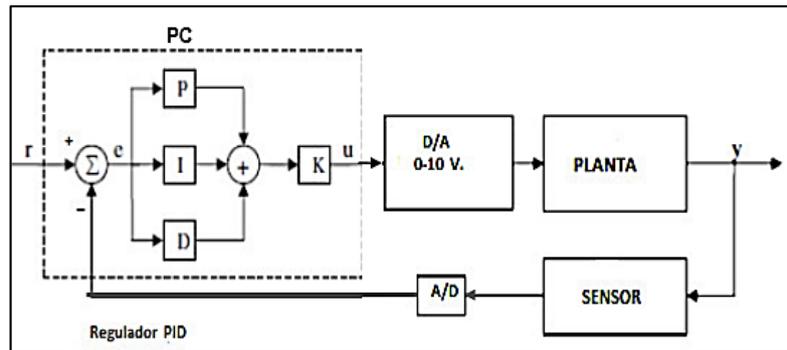


Figura 23 Control PID Digital

Fuente: Internet

Función de Transferencia

En la teoría de control, el concepto de función de transferencia es algo que encontraras continuamente en varios textos y cursos que te dispongas a realizar. Y no es para menos, pues la función de transferencia es una herramienta importantísima que nos permitirá analizar cómo se comportará un determinado proceso, bien sea industrial o académico, a medida que el tiempo va pasando.

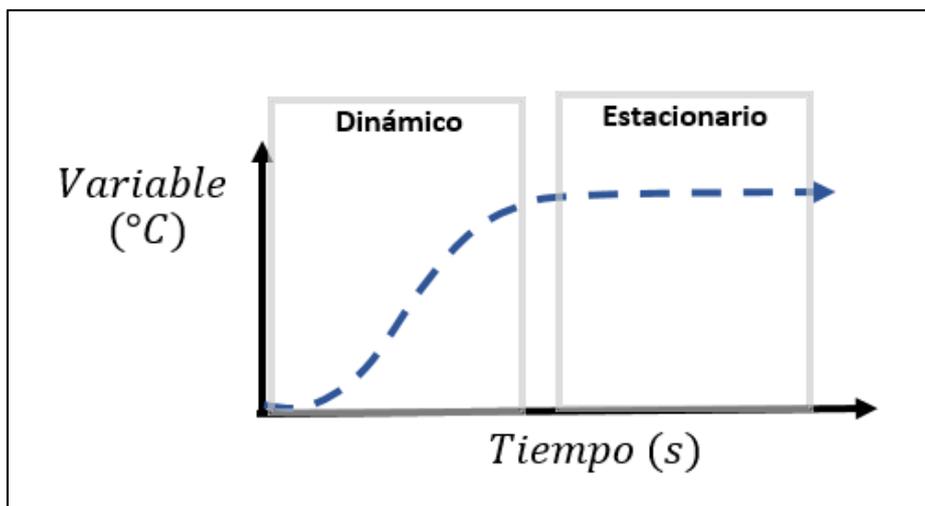
Sabemos que cuando nos encontramos en frente de algún proceso, sea cual sea, este proceso por lo general contará con actuadores y sensores. Los actuadores harán con que mis variables (presión, temperatura, nivel, humedad, velocidad, etc) comiencen a variar con el tiempo, mientras que los sensores se encargan de medir y mostrarme como dichas variables están cambiando con el tiempo.

Obviamente nosotros vamos a querer controlar estas variables del proceso, porque simplemente no vamos a dejar que estas variables evolucionen con el tiempo de la manera que ellas quieran. Por decir algo, si tenemos un horno, donde estamos cocinando galletas. No vamos a dejar que la variable temperatura suba a valores muy elevados, porque el resultado sería tener unas galletas totalmente quemadas. ¡Es por eso que debemos controlar la temperatura para que esta se mantenga sobre una determinada zona y nos permita obtener unas galletas perfectas!

Pero aquí llega el primer inconveniente. Para poder hacer los cálculos matemáticos de nuestros controladores, es de vital importancia, primero y, antes que nada, conocer y

entender cómo se comporta nuestro proceso, tenemos que hallar la forma de representar ese proceso que está en la industria en el Papel. Es decir, encontrar alguna ecuación matemática que me permita modelar y simular el comportamiento real de mi proceso.

Ahí es donde tiene origen las funciones de transferencia. Si observamos los datos que nos entrega algún sensor de nuestro proceso, después de haber aplicado alguna perturbación veremos que la variable comenzará a evolucionar en el tiempo hasta alcanzar otro estado donde se quedará estable, conocido en la literatura como el estado estacionario. Entonces de ese movimiento dinámico podemos clasificar el comportamiento del proceso en el tiempo de dos formas, como lo vemos en la siguiente figura:



Fuente: Internet

En la zona dinámica el sistema va variando con el tiempo, y en la zona estacionaria, el sistema ya no depende más del tiempo, porque sin importar si el tiempo sigue creciendo, la variable se mantiene en el mismo valor.

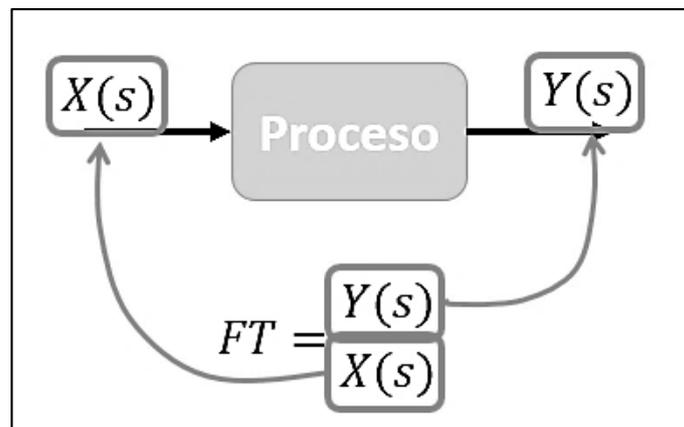
Los físicos, matemáticos, químicos, necesitaban modelar los procesos industriales, es por eso que, en base a estas respuestas dinámicas, se consiguen elaborar ecuaciones diferenciales que representan la evolución de las variables con el tiempo (Como ejemplo se muestra una ecuación diferencial de un reactor)

$$\frac{d(C_A)}{dt} = \frac{F}{V}(C_{Af} - C_A) - k_1 C_A - K_3 C_A^2$$

$$\frac{d(C_B)}{dt} = -\frac{F}{V} C_B + k_1 C_A - K_2 C_B$$

Ahora trabajar con este tipo de ecuaciones diferenciales puede llegar a ser un poco complicado, es por eso que aplicando el concepto de Taylor para linealizar aquellas ecuaciones diferenciales que fueran NO lineales y luego aplicando un herramienta conocida como la transformada de Laplace, podemos representar nuestro sistema que originalmente estaba en el tiempo en forma de ecuaciones diferenciales a representarlo en una nueva variable, llamada variable compleja “S” en forma de ecuaciones algebraicas.

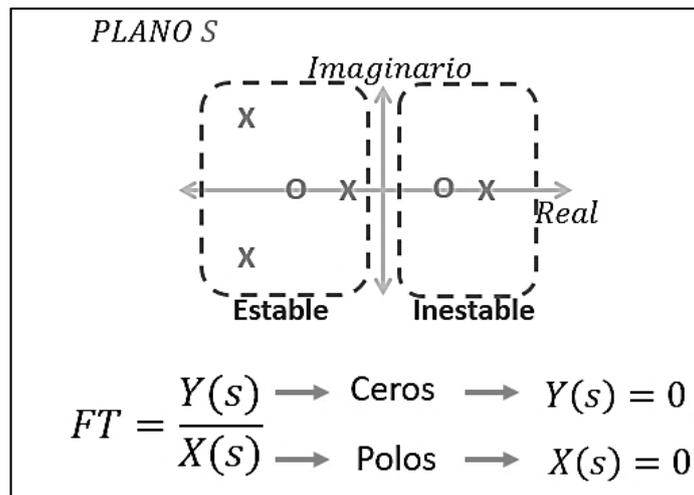
Así surgen nuestras funciones de transferencia, las cuales relacionan la salida del sistema sobre la entrada. De esa manera puedo yo saber cómo se comporta mi sistema de una forma matemática y puedo posteriormente hacer los cálculos para un controlador.



Fuente: Internet

Si analizamos, veremos que las funciones de transferencia se componen de un numerador que es un polinomio y un denominador, que también es un polinomio. Y como todo polinomio tiene raíces, aquí aparece otro concepto que debemos tener claro.

Cuando igualamos el polinomio del numerador a cero, vamos a obtener unas raíces que llamaremos como los “Ceros del Sistema” y haremos lo mismo con el polinomio del denominador, el cual igualaremos a cero y sus raíces se llamaran “Polos del Sistema”



Fuente: Internet

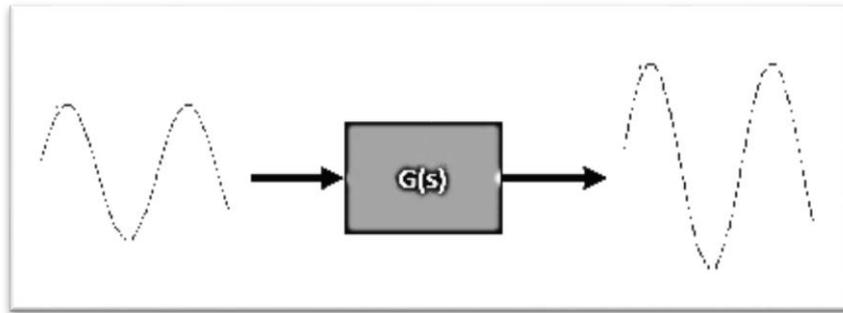
Los ceros y polos pueden ser graficados en el plano complejo “S” y aquí podremos determinar si una función de transferencia es estable o inestable. Simplemente con mirar la ubicación de los Polos del Sistema. Si algún polo del sistema se encuentra ubicado en el semiplano derecho del plano “S”, automáticamente sabremos que el sistema es Inestable. Si encontramos algún cero en esta zona, nuestro sistema NO será inestable, apenas tendrá un determinado comportamiento en su respuesta dinámica que analizaremos más adelante. [7]

Diagrama de Bode

El norteamericano Hendrik Wade Bode (1905-1982) usó por primera vez en 1938 el diagrama que lleva su nombre para el estudio de estabilidad de sistemas en lazo cerrado. Durante la Segunda Guerra Mundial contribuyó al rápido desarrollo de servomecanismos para dispositivos de control de disparo. Su uso se extendió ampliamente en el estudio de los circuitos electrónicos.

Se debe recordar que cuando hablamos de un diagrama de bode, este se encuentra constituido por dos graficas debido a que para este análisis usamos números complejos, es decir que contaremos con un número real y un número imaginario, por eso las dos gráficas del diagrama de bode corresponderán a la gráfica de la magnitud y a la gráfica de la fase.

Aplicando el diagrama de Bode en la teoría de control, lo que queremos es determinar la respuesta en frecuencia (salida) de nuestro sistema en estado estable ante una entrada senoidal.



Fuente: Internet

Como se observa en la figura anterior, la idea básica del diagrama de bode, es que si yo aplico una entrada sinusoidal cualquiera $x(t)$ a mi sistema, el cual es representado por $x(t)=A\cdot\text{sen}(wt)$, donde A es la amplitud de la señal seno y w es el rango de frecuencia de interés, En la salida de mi sistema voy a tener una señal sinusoidal, la cual dependiendo de mi función de transferencia, puede salir con otra amplitud y desfasada con relación a la señal que le aplique a la entrada, esta señal de salida la podremos representar como $x(t)=B\text{sen}(wt+\emptyset)$, donde \emptyset es el ángulo de desfase y B la amplitud del seno de salida.

El diagrama de ganancias representa en el eje de ordenadas la amplitud de la señal de salida transformados a decibelios a través de la siguiente ecuación.

$$20\text{Log}(|G(jw)|)$$

Donde $|G(jw)|$ es mi función de transferencia llevada al dominio de la frecuencia.

El diagrama de fases representa en el eje de ordenadas el desfase de la señal de salida en grados. [7]

5. DISEÑO DEL CONTROL DEL MODELO PROPUESTO

Con la siguiente configuración y teniendo un control PID podemos obtener la respuesta deseada.

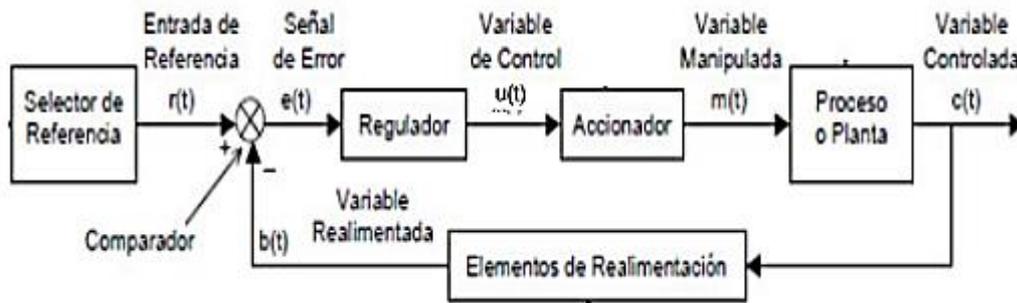


Figura 24 Diagrama de Bloques general

Fuente: Internet

5.1. Diseño de un Modelo Matemático Mecánico.

Podemos tomar como ejemplo un modelo mecánico como analogía y los pasos a dar son los siguientes:

1. Representar el sistema físico en tiempo continuo en la forma de una ecuación diferencial.
2. Convertirlo en el dominio de Laplace(s).
3. Manipular la expresión usando el álgebra estándar y presentar el sistema en una forma estándar.
4. Convertir la expresión en el dominio del tiempo.
5. Calcular la salida en función del tiempo.

El Control de Posición de un objeto. Vamos a tener una masa que aplicándole una fuerza F va a tener un desplazamiento X .

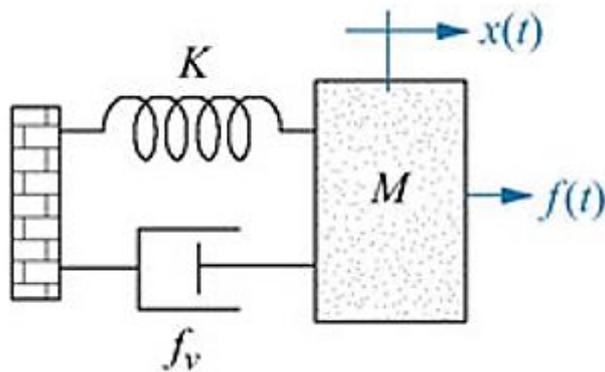


Figura 25 Sistema mecánico

Fuente: Internet

El modelo de ecuación de este sistema es:

$$M \frac{d^2}{dt^2} x(t) + f_v \frac{d}{dt} x(t) + Kx(t) = f(t)$$

Tomando la transformada de Laplace de la ecuación del modelo tenemos

$$Ms^2X(s) + f_v sX(s) + X(s) = F(s)$$

La función de transferencia entre el desplazamiento X (s) y la entrada F(s) tenemos:

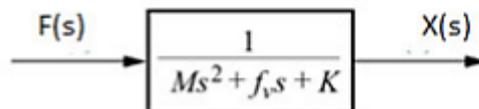


Figura 26 Modelo Laplaciano

Fuente: Internet

Como podemos ver X(s) es el desplazamiento y F(s) es la fuerza que se le aplica a la masa, esta sería el modelo de nuestra planta. Análogamente vamos a tener una ecuación similar como la siguiente en un circuito RLC.

Aquí presentamos el modelo matemático de un circuito RLC en donde vamos a obtener una ecuación diferencial.

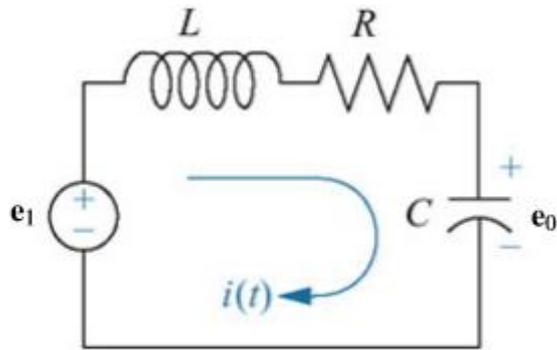


Figura 27 Sistema eléctrico RLC

Fuente: Internet

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int idt = e_i$$

$$\frac{1}{C} \int idt = e_o$$

$$Lsl(s) + Ri(s) + \frac{1}{C} \frac{1}{s} l(s) = E_i(s)$$

$$\frac{1}{C} \frac{1}{s} l(s) = E_o(s)$$

$$\frac{E_o(s)}{E_i(s)} = \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1}$$

Seguindo con nuestro análisis del modelo matemático si asumimos los siguientes valores:

$$m = 1\text{kg}; fv= b = 10; k = 20 \text{ N/m}$$

Poniendo estos valores en la función de transferencia.

$$\frac{X(S)}{F(S)} = \frac{1}{ms^2 + bs + k}$$

Tenemos:

$$\frac{X(S)}{F(S)} = \frac{1}{s^2 + 10s + 20}$$

Con finalidad de este ejemplo es demostrar como K_p , K_i , K_d contribuye a obtener una salida con los tiempos adecuados de respuesta.

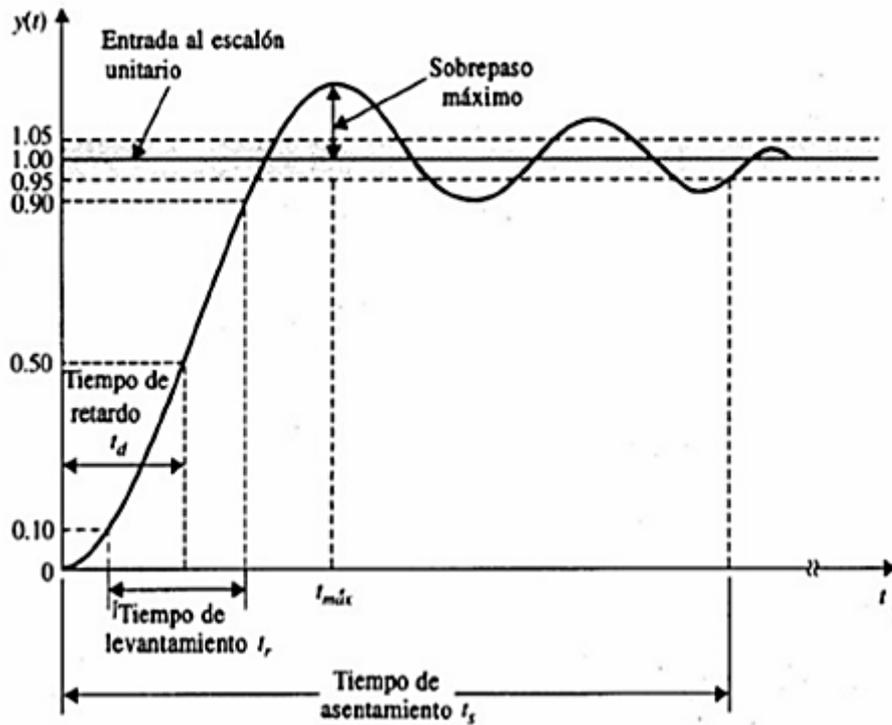


Figura 28 Proceso de segundo orden con sobre elongación

Fuente: Internet

Donde:

T_r = Tiempo de subida.

M_p = Sobre elongación.

T_s = Tiempo de establecimiento. (asentamiento)

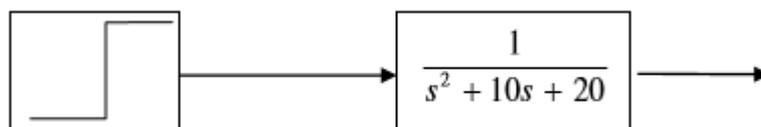
Respuesta al cambio de K_p , K_i y K_d lo podemos ver mejor en la siguiente

Respuesta	Tiempo de Subida Tr	Sobreimpulso Mp	Tiempo de asentamiento Ts	Error de estado Variable
↑K _p	Decrece	Incrementa	Pequeños cambios	Decrece
↑K _i	Decrece	Incrementa	Incrementa	Elimina
↑K _d	Pequeños cambios	Decrece	Decrece	Pequeños cambios

Fuente: Propia

5.2. Sistema lazo abierto

Analizando la ecuación en lazo abierto y haciendo la simulación con Matlab. con una señal de entrada constante de valor 1.



Código.

```
num=1;
```

```
den=[1 10 20];
```

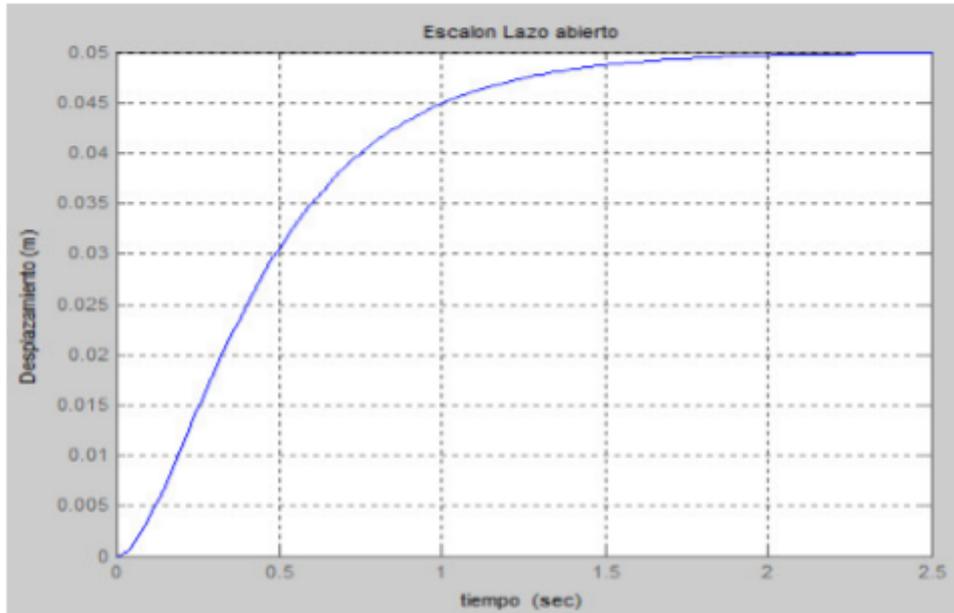
```
step(num,den)
```

```
grid title('Escalón Lazo abierto')
```

```
xlabel('tiempo ')
```

```
ylabel('Desplazamiento (m)')
```

Obtenemos la siguiente respuesta.



Fuente: Propia

5.3. Sistema de Realimentado.

5.3.1. Control Proporcional.

El control proporcional K_p , reduce el tiempo de levantamiento, incrementa el sobre paso máximo, y reduce el steady-state error.

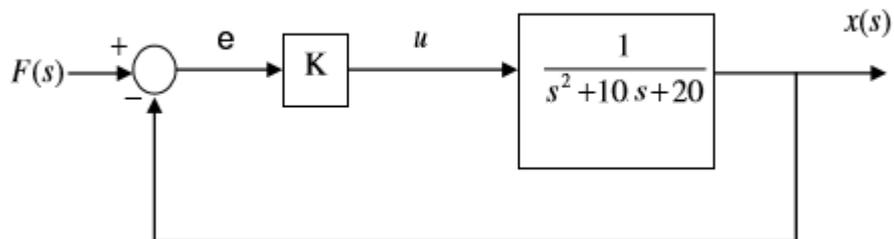


Figura 29 Control proporcional

Fuente propia.

Donde:

Control proporcional = K_p

Planta:

$$G = \frac{1}{s^2 + 10s + 20}$$

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{K_p}{s^2 + 10s + (20 + K_p)}$$

Si ponemos $K_p = 300$ y haciendo la simulación con Matlab con el siguiente programa donde la respuesta del control proporcional en lazo cerrado con entrada escalón va a ser:

```
Kp=300;
```

```
num=[Kp];
```

```
den=[1 10 20+Kp];
```

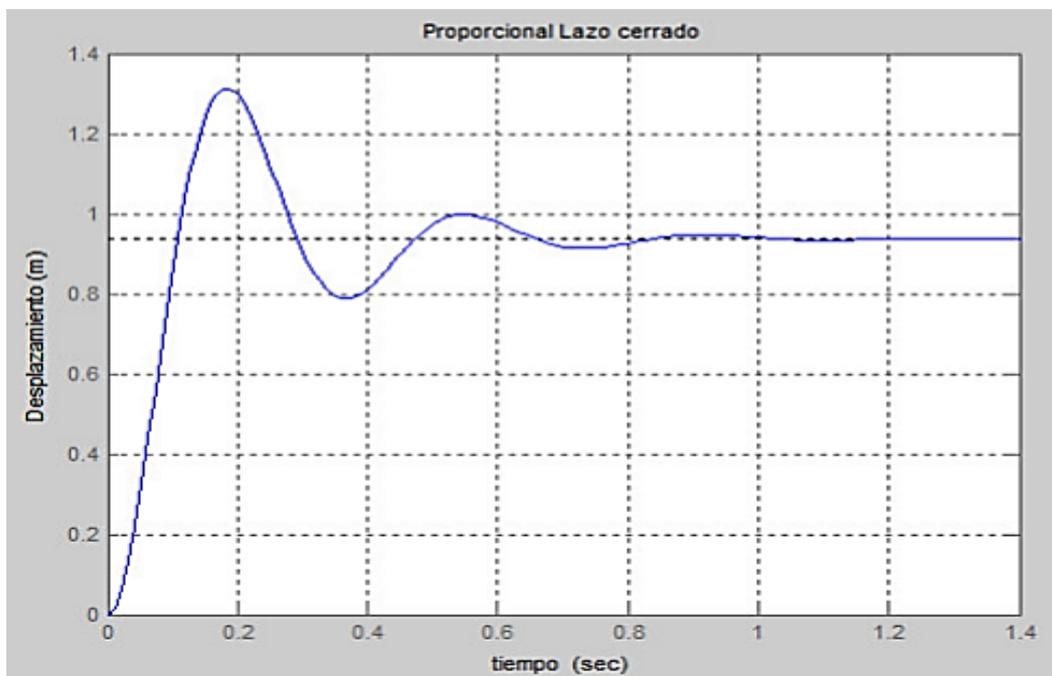
```
step(num,den);
```

```
grid
```

```
title('Proporcional lazo cerrado')
```

```
xlabel('tiempo ')
```

```
ylabel('Desplazamiento (m)')
```



Fuente: Propia

5.3.2. Control Proporcional Integral PI

Sistema lazo cerrado

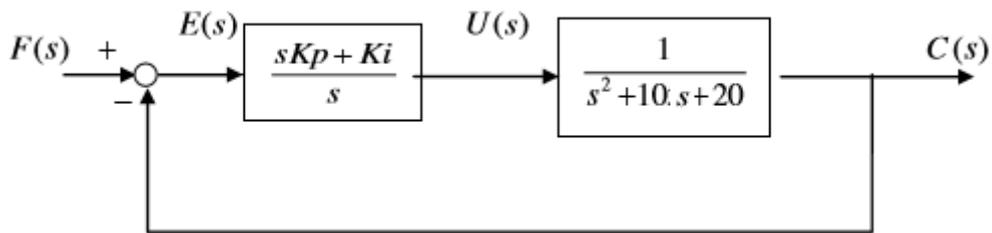
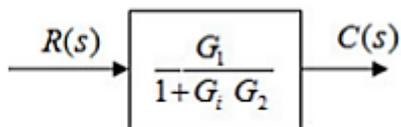
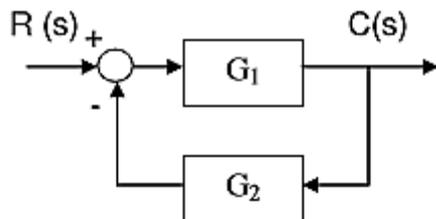


Figura 30 Señal de salida del sistema con control PI

Fuente propia.



$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_1}{1 + G_1 G_2}$$

$$\frac{s K_p + K_i}{s(s^2 + 10s + 20)}$$

$$1 + \frac{s K_p + K_i}{s(s^2 + 10s + 20)}$$

$$\frac{s K_p + K_i}{s(s^2 + 10s + 20) + s K_p + K_i}$$

$$\frac{s K_p + K_i}{s^3 + 10s^2 + 3(K_p + 20)s + K_i}$$

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{s K_p + K_i}{s^3 + 10s^2 + (20 + K_p)s + K_i}$$

Matlab

% Control PI en lazo cerrado.

% Con entrada escalón.

Kp=30;

Ki=150;

num=[Kp];

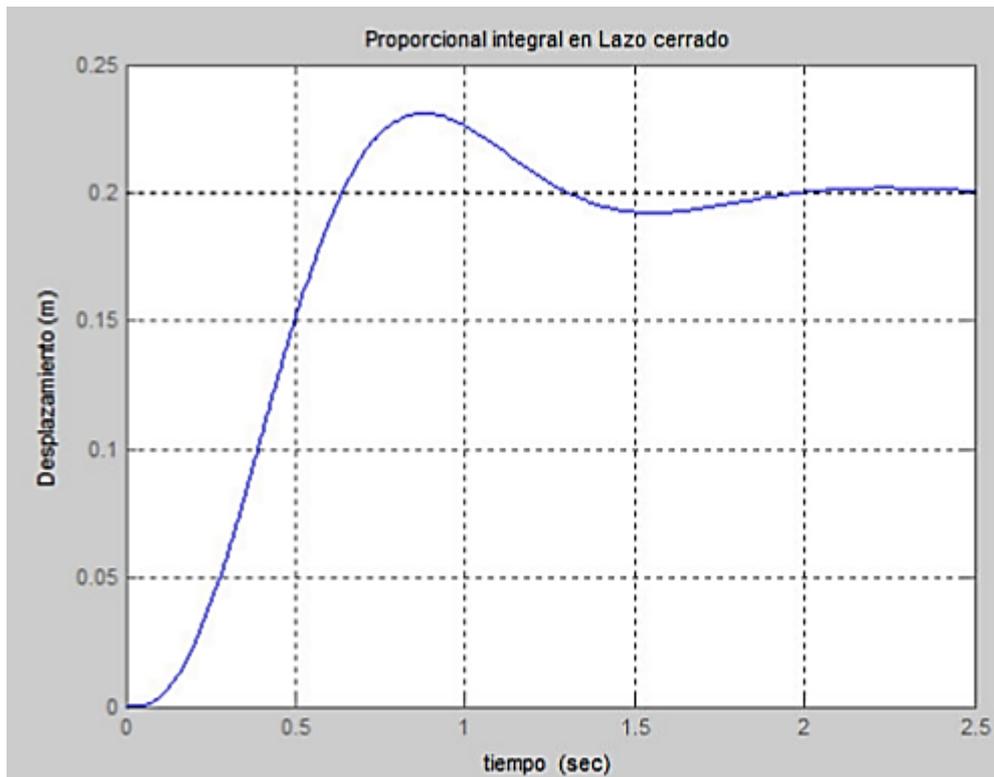
den=[1 10 20+Kp Ki];

step(num,den)

grid title('Proporcional integral en Lazo cerrado')

xlabel('tiempo ')

ylabel('Desplazamiento (m)')



Fuente: Propia

6. CENTRAL HIDROELÉCTRICA BUENOS AIRES NIEPOS

NOMBRE	Central Hidroeléctrica BUENOS AIRES	
UBICACIÓN	Departamento	: CAJAMARCA
	Provincia	: SAN MIGUEL
	Distrito	: LA FLORIDA

PROPIETARIO : ELECTRONORTE S.A.

OPERACIÓN ACTUAL	
Sistema Eléctrico al que dota energía	: NEPOS-OYOTÚN
Producción Mensual promedio (MWh)	: 290.000
Costo promedio mensual (S/. /kWh)	: 0.10
Máxima Demanda	: 0.76 MW
Horas de operación G1/G2	: 719/236 horas
Factor de planta	: 0.44
Altitud Casa de máquinas (msnm)	: 1,034

DESCRIPCION DE INSTALACIONES		
Ubicación coordenada UTM	:	709.43 Norte
	:	9,240.67 Oeste
Accesos	:	Trocha carrozable
Caudal de Diseño (m3/s)	:	0.4
Caudal de estiaje (m3/s)	:	0.2
Año puesta en servicio	:	1992
Nombre del río	:	Zaña
Potencia Instalada (MW)	:	1.08
Potencia Efectiva (MW)	:	0.9
Caída Bruta (m)	:	163.7

Turbinas			
Tipo	:	PELTON	PELTON
Fabricante	:	BIWATERHIDRO	BIWATERHIDRO
Año de Fabricación	:	1986	1986
5.2.2 Volante de Inercia			
Fabricante	:
Diámetro interno (m)	:
5.2.3 Generadores			
Potencia Nominal c/u (kW)	:	675	675
Fabricante	:	BRUSH ENGLAND	BRUSH ENGLAND
5.2.3 Transformador			
Modelo y Fabricante	:	FABEM	FABEM
Potencia (kVA)	:	630	630
Año de Fabricación/ Puesta en servicio	:	1986	1986

7. CÁLCULOS DE PARÁMETROS.

7.1. Parámetros

Tablas usadas en anexo 4

$$H_n = 151.42 \text{ m (Salto o altura neta)}$$

$$Q_d = 0.40 \text{ m}^3/\text{s (Caudal turbinable)}$$

$$\gamma_a = 9.80 \text{ Kg/m}^2\text{s}^2 \text{ (Peso específico del agua)}$$

$$P = \gamma_a Q_d H_n = 540.00 \text{ kw}$$

$$\eta = 0.83 \text{ adim (Rendimiento de la turbina)}$$

$$P_e = P\eta = 448.20 \text{ kw}$$

$$n = 60f/p = 1800.00 \text{ rpm}$$

$$\eta_s = (n(P_e)^{1/2})/(H_n)^{3/4} = 83.65 \text{ rpm}$$

7.2. Dimensione Turbina Pelton

$$H_n = 151.42 \text{ m (Salto o altura neta)}$$

$$Q_d = 0.40 \text{ m}^3/\text{s (Caudal turbinable)}$$

$$n = 60f/p = 1800 \text{ rpm (Velocidad de rotación – turbina)}$$

$$\eta_s = 27.88 \text{ rpm (Velocidad especifica en función de la potencia)}$$

$$n_{ch} = 1 \text{ adim (Número de inyectores o chorros)}$$

$$Q_{ch} = Q_d/n_{ch} = 0.40 \text{ m}^3/\text{s (Caudal de cada inyector o chorro)}$$

$k_{ch} = 0.98$ adim (Coeficiente de velocidad absoluta o de chorro)

$c_{ch} = k_{ch}(2gH_n)^{1/2} = 53.39$ m/s (Velocidad absoluta o de cada chorro)

$u_1 = 0.46c_{ch} = 24.56$ m/s (Velocidad tangencial)

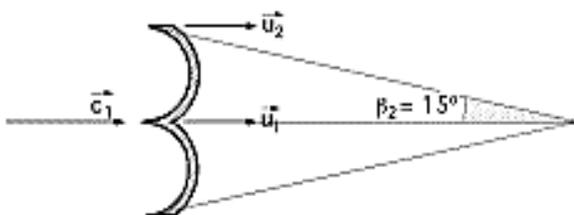
$d_{ch} = (4Q_d/\pi c_{ch})^{1/2} = 0.098$ m (Diámetro del chorro del inyector)

$D = (60u_1)/(\pi n) = 0.261$ m (Diámetro del rodete en el punto de choque del chorro en la cuchara)

7.3. Triángulo de velocidades

Tenemos que la fuerza tangencial del chorro es igual con signo contrario a la que el alabe ejerce sobre el flujo

Datos:



$$\vec{c}_1 = \vec{w}_1 + \vec{U}_1 \quad \text{Ecuación general}$$

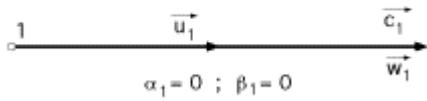
c_1 (Velocidad de salida del agua del inyector)

$$C_1 = 0.98$$

$$w_2 = 0.7w_1$$

$$u_1 = 0.45 c_1$$

Por lo tanto:



Entrada $c_1 = C_1 \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$

$$c_1 = 55.539238 \text{ m/seg}$$

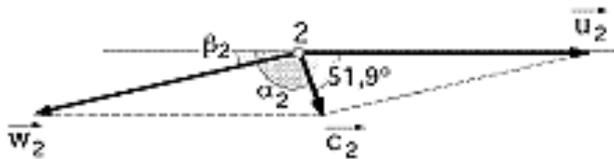
$$24.992657$$

$$u_1 = 1 \text{ m/seg}$$

$$30.546580$$

$$w_1 = 9 \text{ m/seg}$$

Salida



$$u_2 = u_1 = 24.99 \text{ m/seg}$$

$$w_2 = 21.38 \text{ m/seg}$$

$$c_2 = \sqrt{u_2^2 + w_2^2 - 2 \cdot u_2 \cdot w_2 \cdot \cos(\beta_2)}$$

$$c_2 = 16.42 \text{ m/seg}$$

$$w_2 \cdot \text{sen} \beta_2 = c_2 \cdot \text{sen} \alpha_2$$

$$\text{sen} \alpha_2 = w_2 \cdot \frac{\text{sen} \beta_2}{c_2}$$

$$\text{sen} \alpha_2 = 0.845$$

$$\alpha_2 = 77.82 \text{ grados}$$

Fuerza Tangencial ejercida por el chorro

$$F_q = \frac{\gamma Q}{g} (w_1 \cos \beta_1 - w_2 \cos \beta_2)$$

$$F_q = 22 \text{ kg}$$

$$Q = c_1 \Omega \quad D = 0.097 \text{ m}$$

$$Q = 0.4161148 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}}$$

8. DESARROLLO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA TOTAL DEL SISTEMA

Tenemos el diagrama de bloques del Sistema de Control para una Turbina Hidráulica y su generador.

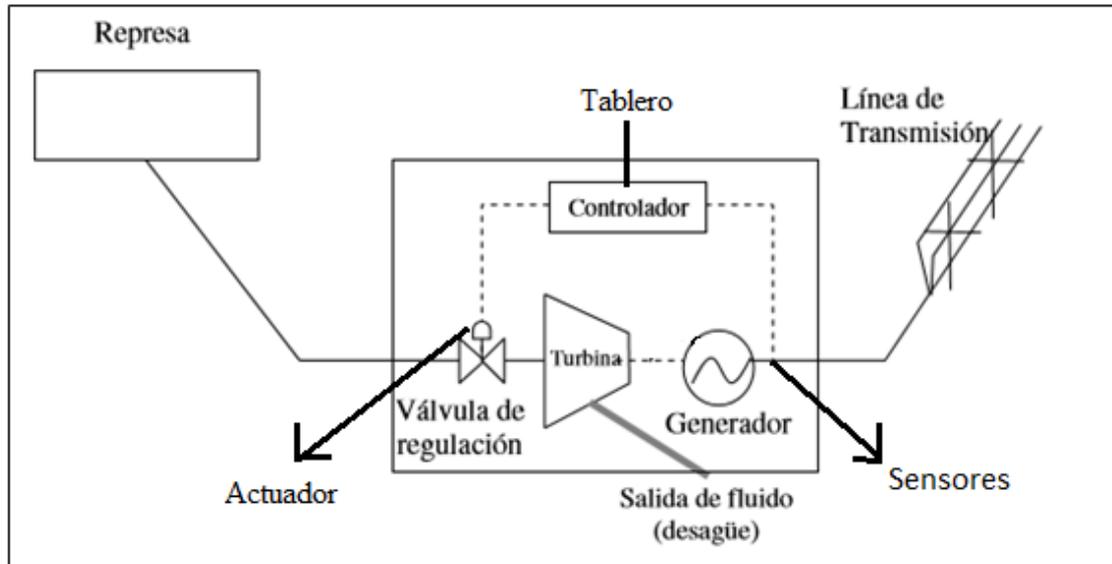


Figura 31 Diagrama de la central

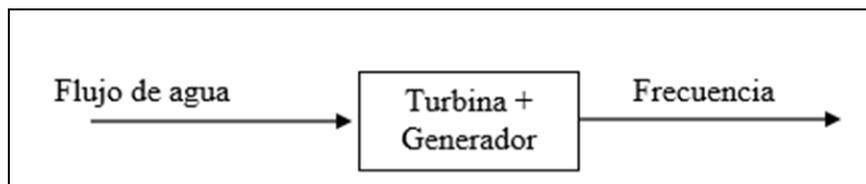


Figura 32 Modelo de control de la turbina

8.1. Control del Sistema

En la planta hidroeléctrica que maneja una turbina y un generador que va a generar electricidad hacia la red. La velocidad de rotación de la turbina y el generador es proporcional con la frecuencia. Cuando la carga desde la red cambia también lo hace la frecuencia para compensar esto debemos cambiar el caudal que va hacia la turbina.

El regulador que vamos a implementar va a ser una proporcional integral para llevar a cabo nuestro proyecto que es un Controlador de turbinas para pequeñas Centrales Hidroeléctricas.

Nosotros queremos mantener constante la velocidad de rotación del generador para tener una frecuencia constante.

Cuando la carga crece cambia la frecuencia en el generador teniendo una frecuencia menor y al lado de un invariable caudal la velocidad de rotación de la turbina disminuye. Nosotros podemos afirmar que la turbina y el generador es un sistema dinámico con el caudal como señal de entrada y la frecuencia como señal de salida. La carga viene a ser una perturbación donde se tiene que resolver el problema de regular la frecuencia.

Si se mide la carga y el caudal se puede saber más exactamente como el caudal influye en la frecuencia en diferentes valores de carga. En principio se puede hacer una tabla en la cual un caudal determinado nos va a dar una carga.

Es natural dejar que el flujo de agua sea proporcional a la diferencia entre la frecuencia deseada y la frecuencia real.

$$V(t) = V_0 + K_p (f_{ref}(t) - f(t))$$

Cuando crece el flujo entonces la frecuencia baja lo cual es lógico. La realimentación se llama realimentación proporcional. Es fácil con este tipo de realimentación que el error de frecuencia disminuya.

Si la carga crece para un flujo normal entonces la frecuencia baja y cuando crece el flujo entonces crece la frecuencia, pero el error no se puede eliminar totalmente hasta que la f sea igual a la frecuencia de referencia.

Para llevar a cabo frente a este inconveniente naturalmente debemos continuar haciendo crecer la señal de entrada hasta que se consigue la frecuencia deseada. Esto quiere decir que la señal de entrada tiene dentro términos tanto proporcionales como integrales, $f_{ref}(t) - f(t)$

En el Control de una Mini Central Hidroeléctrica es el control del flujo apropiado que se debe tener para una velocidad deseada en la turbina.

La potencia puede ser controlado, con el movimiento lineal de la válvula de aguja el

modelo basado del control de flujo es hecho especialmente para el Control Automático de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas el modelo propuesto es usando un servomotor para el control del flujo controlando el desplazamiento lineal de la válvula de control.

En una hidroeléctrica el consumidor requiere que el voltaje y la frecuencia sea estable. Para mantener estos parámetros se requiere un control en el sistema. Si el voltaje es mantenido con el control de excitación del generador y la frecuencia es mantenida, eliminando la diferencia entre la demanda de la carga y la generación. [2]

El esquema fundamental del sistema de control de velocidad para una Planta de Generación Hidroeléctrica es dado en la siguiente figura.



Figura 33 Esquema del control de velocidad

Fuente: Propia

Este es el sistema de control de velocidad para una Mini Planta Hidroeléctrica donde el problema de mantener constante la frecuencia es analizado en esta tesis.

El diagrama de bloques es propuesto para el control de la velocidad de una turbina en donde la potencia puede ser controlada con un servo motor.

8.2. Modelo Propuesto.

El esquema propuesto es una sola válvula de pistón que va a ser usado para regular el flujo del agua. La válvula va a proveer el control del flujo para generar la potencia en función de la carga. La válvula de control es basada en la continuidad del flujo de control. El servomotor es usado para operar esta válvula.

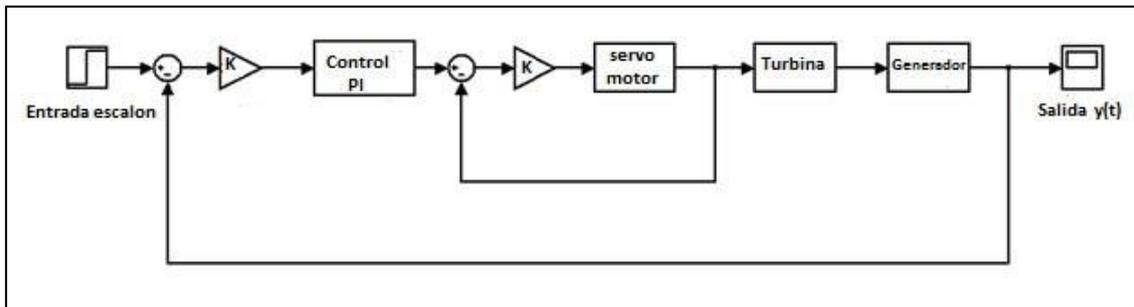


Figura 34 Modelo propuesto

Fuente propia

La arquitectura que vamos a desarrollar es para controlar el flujo y así controlar la velocidad de la turbina y su potencia. El modelo propuesto es usar un servomotor como control de flujo del agua, el servomotor será usado para operar la válvula que controlara el flujo.

He considerado usar un servomotor DC para este modelo, en el control de pequeñas y medianas centrales hidráulica. Así vamos a tener un diseño que requerirá menos mantenimiento y será menos caro que los controladores convencionales mecánicos, hidráulicos y electro neumático.

El sistema de control de la turbina completa puede ser dividido en tres principales componentes:

- El controlador
- El servo sistema
- La turbina/generador

Funciones de transferencia:

- $\frac{1}{(1-sT_1)}$ Modelo de control eléctrico del servo motor. [11]
- $\frac{1}{(1-sT_2)}$ Modelo de control mecánico del servo motor. [11]
- $\frac{1-sT_w}{(1-sT_1)}$ Modelo de control de la turbina. [12]
- $\frac{K_n}{(1-sT_p)}$ Modelo de control del generador. [12]

8.3. Desarrollo del modelo matemático de todo el sistema en conjunto.

Toda turbina hidráulica tiene un regulador de velocidad que realiza la tarea de controlar la velocidad de giro en un generador de inducción. Como regulador vamos a utilizar un servo motor de corriente continua que va a reemplazar a los del sistema hidráulico que son caros y no es posible implementarlos en sistemas de pequeña potencia por su precio solamente es implementado en grandes centrales hidráulicas.

El modelo que asumimos tiene un nozzle a través del cual se controla el flujo que es afectado frente a un cambio de la demanda (la carga).

La válvula es continuamente controlada para tener un control del 100% del flujo de agua. Nosotros controlamos la posición del gate con el loop interno de posición que es un servomotor DC con un control tipo K para una respuesta inmediata a los cambios. Esto se muestra en las siguientes figuras.

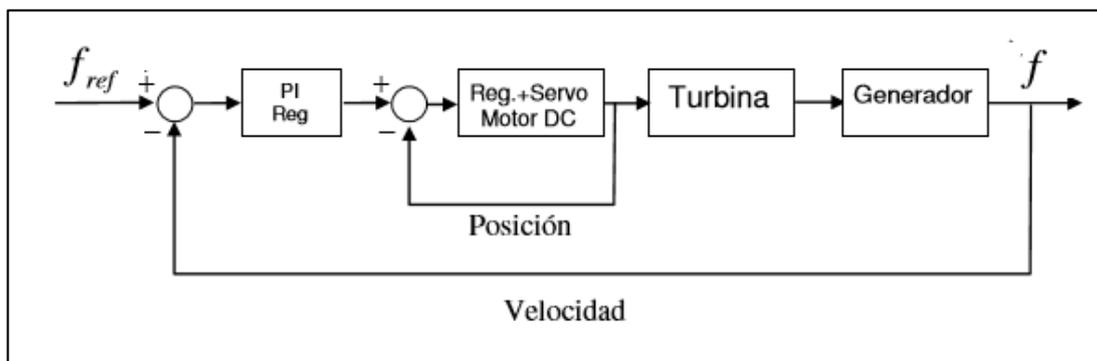


Figura 35 Esquema del regulador de velocidad

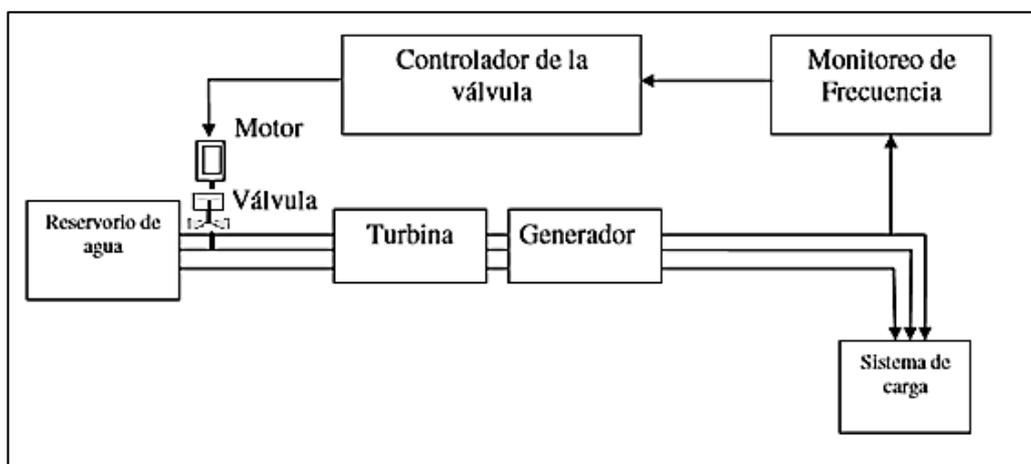


Figura 36 Diagrama de la mini central

Fuente Propia

En la siguiente figura tenemos el diagrama completo

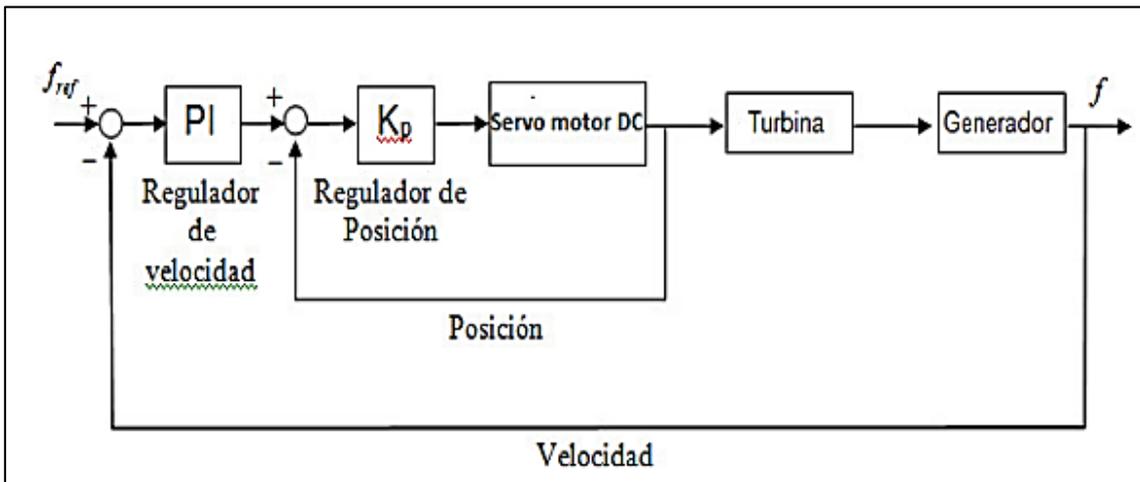


Figura 37 Diseño completo con sus controladores

Fuente Propia

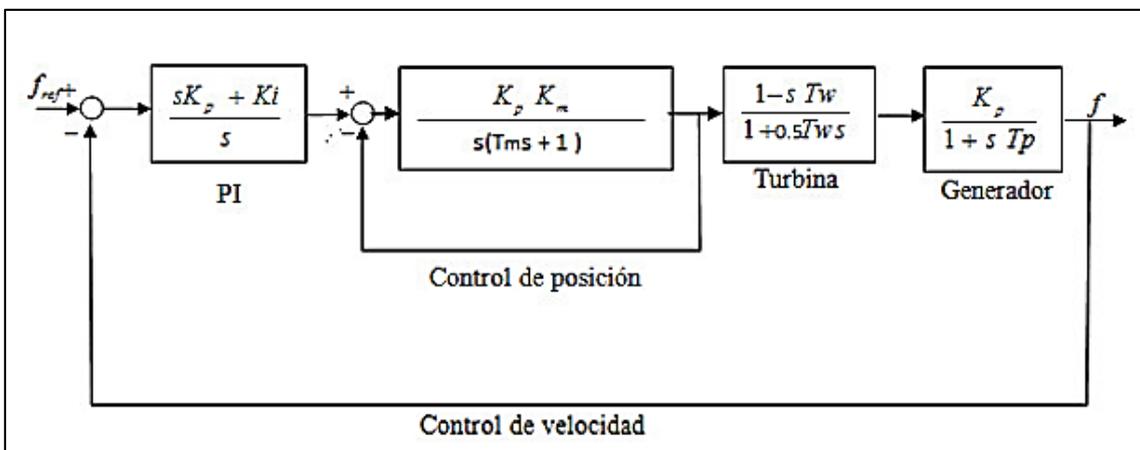


Figura 38: Diseño con sus modelos matemáticos

Fuente Propia

Para el control de velocidad de una Micro Hidroeléctrica vamos a utilizar un regulador PI para el control de velocidad y calcular las funciones de transferencias de la turbina, generador y el servomotor.

8.3.1. Función de transferencia de la turbina

Comenzando con la transferencia de función de la turbina hidráulica, su tiempo de inercia es largo cuando la respuesta al primer movimiento del torque con la repuesta de las turbinas.

El modelo de transferencia de la función para una turbina hidráulica se puede aproximarse.

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

Donde:

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 torsión en la salida de la turbine (p.u)

ΔP_E = Posición de la válvula.

s = Transformada de Laplace

Tenemos las especificaciones técnicas de la central hidroeléctrica en:

$$P = 540 \text{ kw}$$

$$H = 151.42 \text{ m}$$

$$n = 0.85 \%$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$Q = 0.4 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$L = 262 \text{ m}$$

$$\mu = \sqrt{2 \cdot g \cdot L} = \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot 262} = 71.69$$

$$T_w = \frac{\mu L}{gH} = \frac{71.69 \times 262}{9,81 \times 151.42}$$

$$T_w = 0.12 \text{ s}$$

$$\frac{\Delta P_G(s)}{\Delta P_E(s)} = \frac{1 - sT_w}{1 + 0.5sT_w}$$

$$\frac{1 - sT_w}{1 + 0.5T_w s} = \frac{1 - 0.12s}{1 + 0.06s}$$

8.3.2. Función de transferencia del servomotor DC.

Donde K_p es el valor del control proporcional del lazo de control de posición del servomotor DC en el lazo interno.

Los valores iniciales son:

$$K_p = 0.1$$

$$T_m = 0.25$$

$$K_m = 10$$

$$G(s) = \frac{1}{0.25s^2 + s + 1} = \frac{4}{s^2 + 4s + 4}$$

8.3.3. Función de Transferencia del Generador

La función de transferencia del generador va a ser:

$$G(s) = \frac{K_p}{1 + sT_p}$$

Tenemos que:

$$K_p = 1/D$$

$$D = \frac{P_L}{fP_R} \text{ Donde } D \text{ se asume que es el rendimiento de la última carga.}$$

$$T_p = \frac{2H}{fD}$$

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: $P_L = 540 \text{ Kw}$ a una frecuencia de 60 Hz. la potencia del generador es: $P_R = 675 \text{ Kw}$

Entonces:

$$D = (540) / (60 \times 675) = 0.013 \text{ p.u./Hz}$$

Para el sistema con una ganancia constante y tiempo constante.

$$K_p = 76.92 \text{ Hz/p.u}$$

$$H = 1 \text{ seg}$$

$$T_p = 2.56 \text{ s}$$

Por lo tanto, la función de transferencia del generador es:

$$G(s) = \frac{K_p}{1 + sT_p} = \frac{76.92}{1 + 2.56s}$$

A continuación, tenemos:

$$PI = \frac{sK_p + K_i}{s}$$

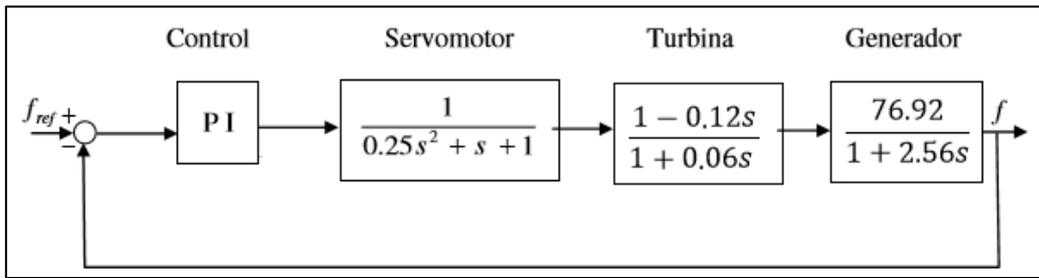


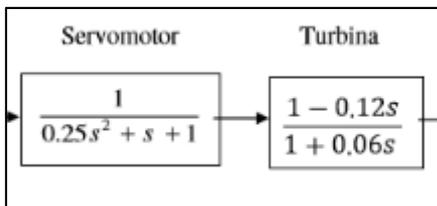
Figura 39 Sistema de control con sus valores finales

Fuente: Internet

8.3.4. Reducción del sistema

Para la reducción usaremos Matlab para facilitar el proceso.

Servomotor - Turbina

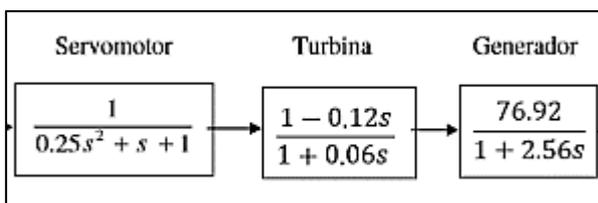


```
>> num1= [0 0 0 1];
>> den1= [0 0.25 1 1];
>> num2= [ 0 0 -0.12 1];
>> den2= [0 0 0.06 1];
>> [num,den]= series(num1,den1,num2,den2);
>> printsys(num,den)
```

num/den =

$$\frac{-0.12 s + 1}{0.015 s^3 + 0.31 s^2 + 1.06 s + 1}$$

Servomotor-Turbina-Generador



```

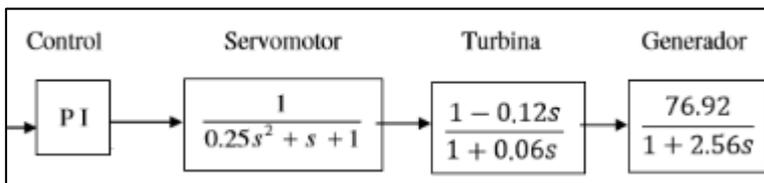
>> num1= [ 0 0 -0.12 1];
>> den1= [ 0.015 0.31 1.06 1];
>> num2= [0 0 0 76.92];
>> den2= [ 0 0 2.56 1];
>> [num,den]=series(num1,den1,num2,den2);
>> printsys(num,den)

num/den =

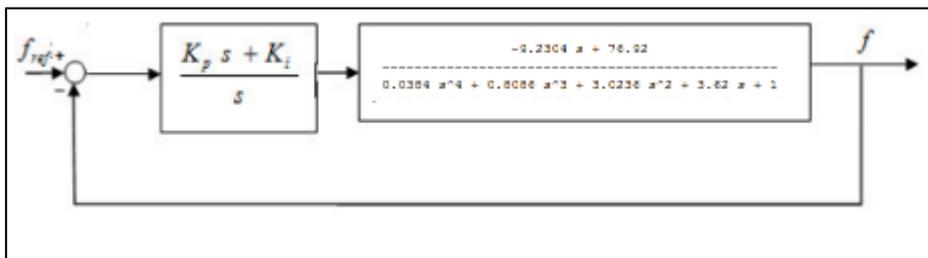
          -9.2304 s + 76.92
-----
0.0384 s^4 + 0.8086 s^3 + 3.0236 s^2 + 3.62 s + 1

```

Utilizando el controlador PI para el sistema.



Con el resultado anterior la reducción



```

>> Kp=0.01;
>> Ki=0.005;
>> num1= [ 0 0 Kp Ki];
>> den1= [0 0 1 0];
>> num2= [ 0 0 -9.2304 76.92];
>> den2= [ 0.0384 0.8086 3.0236 3.62 1];
>> [num,den]=series(num1,den1,num2,den2);
>> printsys(num,den)

num/den =

          -0.092304 s^2 + 0.72305 s + 0.3846
-----
0.0384 s^5 + 0.8086 s^4 + 3.0236 s^3 + 3.62 s^2 + s

```

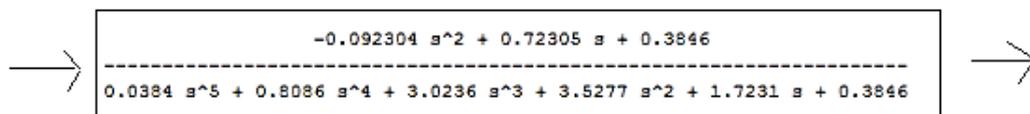
Tenemos:

```
>> num1=[ 0 0 -0.092304 0.72305 0.3846];
>> den1=[ 0.0384 0.8086 3.0236 3.62 1 0];
>> num2=[ 0 0 0 0 1];
>> den2=[ 0 0 0 0 1];
>> [num,den]=feedback(num1,den1,num2,den2);
>> printsys(num,den)

num/den =

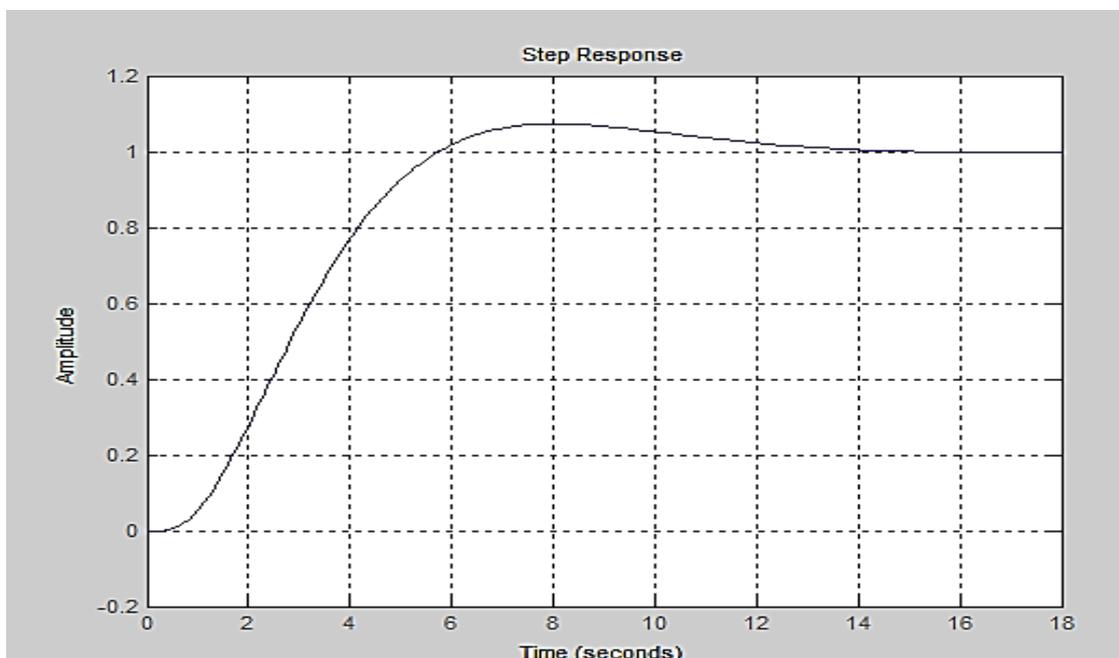
          -0.092304 s^2 + 0.72305 s + 0.3846
-----
0.0384 s^5 + 0.8086 s^4 + 3.0236 s^3 + 3.5277 s^2 + 1.7231 s + 0.3846
```

Tenemos el sistema final reducido



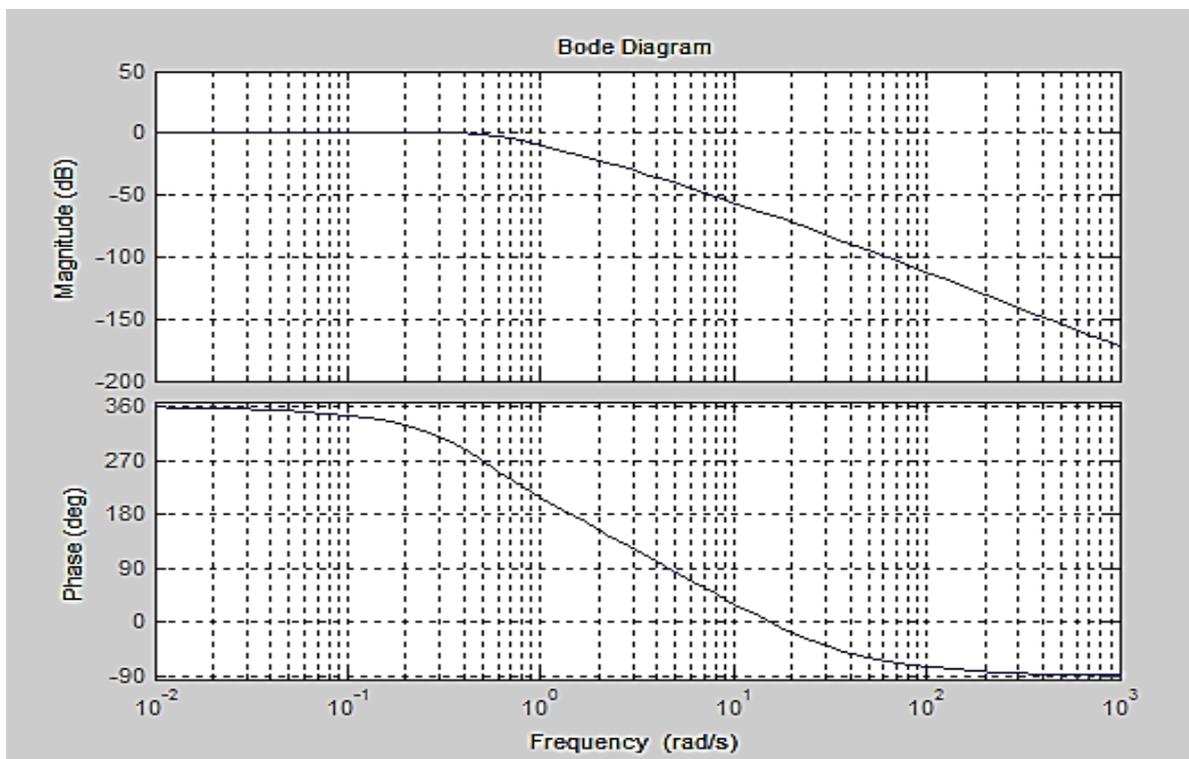
Respuesta escalón del sistema diseñado

```
>> num=[0 0 -0.092304 0.72305 0.3846];
den=[0.0384 0.8086 3.0236 3.5277 1.7231 0.3846];
step(num,den);
>> grid;
```



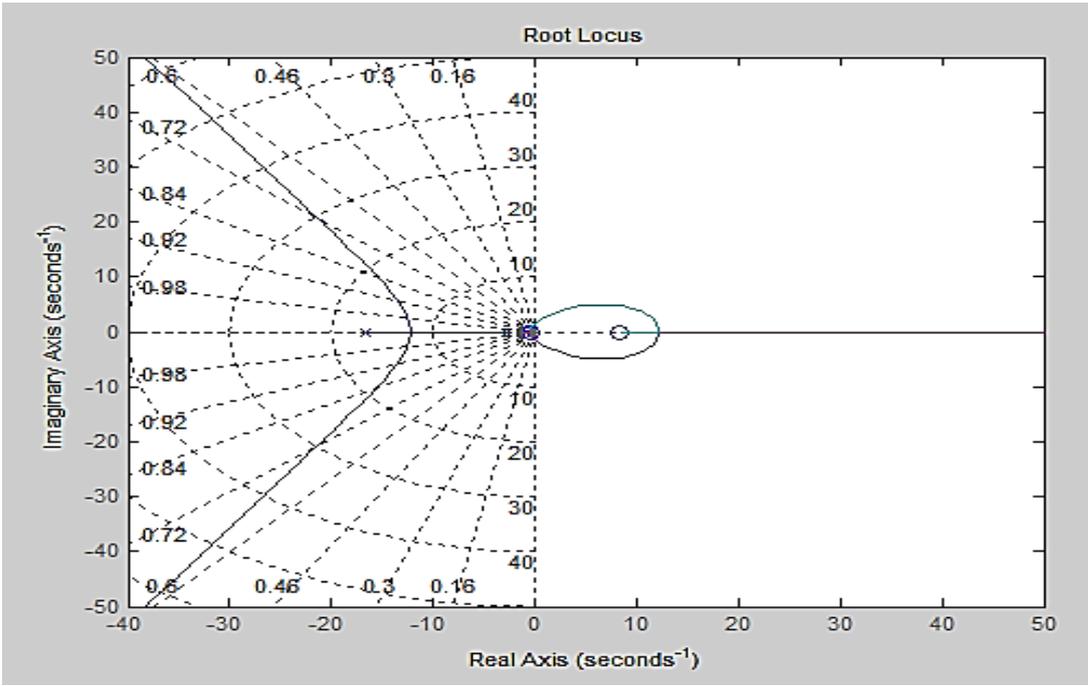
Respuesta de Bode

```
>> num= [0 0 -0.092304 0.72305 0.3846];  
>> den=[ 0.0384 0.8086 3.0236 3.5277 1.7231 0.3846]  
  
den =  
  
Columns 1 through 4  
  
    0.0384    0.8086    3.0236    3.5277  
  
Columns 5 through 6  
  
    1.7231    0.3846  
  
>> bode(num,den);  
>> grid;
```



Lugar de las raíces del sistema

```
>> rlocus(num,den);  
>> grid;
```



9. CONCLUSIONES

- Se recolectó y analizó los datos de la central hidroeléctrica de Buenos Aires Niepos para obtener los parámetros utilizados en el diseño.
- Al conocer el funcionamiento del sistema se pudo determinar y conocer los parámetros de diseño, diámetro de la válvula: 10 pulgadas, el caudal turbinable: 0.4 m/s, longitud de la tubería: 262 metros.
- Se propuso un modelo matemático mediante el método de cascada, que se define por sectores en este caso para el servomotor, turbina y generador.
- Se desarrolló y analizó el sistema de control propuesto mediante Matlab obteniendo como resultado la ecuación general que gobierna el sistema.
- De acuerdo a una evaluación económica resulta rentable con un: VAN= 24558; un TIR: 34.40 % ; B/C=1.69 y un tiempo de recuperación por PAY BACK= 4.52 AÑOS

10. RECOMENDACIONES

- Debido a la importancia del funcionamiento del servomotor, este debe ser programado y ajustado con los parámetros de funcionamiento que se calculó en la simulación y después realizar el ajuste fino para el buen funcionamiento del sistema.
- Revisar la válvula de aguja para que permanezca libre de cuerpos extraños de igual manera el sensor resistivo para que de esta manera la señal que se envía a la computadora sea fiable.
- Realizar la programación C++ para afinar la configuración de todo el sistema para una mayor precisión.

11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] F.Javita Almeida, “Diseño y Construcción de un banco para el control automático de velocidad para un grupo de 4 plantas hidroeléctricas tipos Francis de 200 Kw cada una pertenecientes al proyecto hidroeléctrico Borja”, Tesis de Pre grado, Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Mecánico Eléctrica.”,
- [2] J. Huerta Estrada; “Diseño de un sistema de regulación de velocidad de una turbina Pelton usando el algoritmo PI digital”, Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico, Universidad Nacional Mayor De San Marcos.
- [3] J. Palacios Pinto; Diseño de una turbina Pelton y su sistema de control, Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico, Escuela Superior Politécnica Del Litoral
- [4] Microcentrales hidroeléctricas Una alternativa para el desarrollo rural, Disponible en Internet: http://cedecap.org.pe/uploads/biblioteca/130bib_arch.pdf
- [5] Ing. F. García Gutiérrez, “Obras Hidráulicas”, Desarrollos Hidroeléctricos y Turbinas.
- [6] Ing. J González Fariñas, “ASPECTOS ESPECÍFICOS DE LOS APROVECHAMIENTOS MINIHIDROELÉCTRICOS.”, MASTER EN ENERGÍAS RENOVABLES CURSO 2008-2010
- [7] Control Automático Educación. Disponible en internet: <http://controlautomaticoeducacion.com>
- [8] Pequeñas y microcentrales hidroeléctricas: alternativa real de generación eléctrica. Disponible en Internet http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/viewFile/22/27
- [9] Calidad de energía eléctrica. Disponible en internet <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Docs/calidad.pdf>
- [10] K. Ogata, “Ingeniería de control moderna”, cuarta edición
- [11] INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA – UMH, SERVOMOTOR EN BUCLE CERRADO

[12] E. Swidenbank, M.D. Brown, and D. Flynn “Self-Tuning Turbine Generator Control for Power Plant”

[13] M. Gil Rodríguez, Introducción Rápida a Matlab y Simulink, tercera edición

[14] 7 razones por las que MATLAB es el entorno más sencillo y productivo para ingenieros y científicos

<https://es.mathworks.com/products/matlab/why-matlab.html>

[15] F. Mateos, Sistema atomizados- Autómatas Programables(PLCs)

[16] Sistema de control.Disponible en Internet:

https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_control

[17] CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA. Disponible en Internet:

<https://docplayer.es/14563527-Calidad-de-la-energia-electrica.html>

Anexo

Anexo 1.

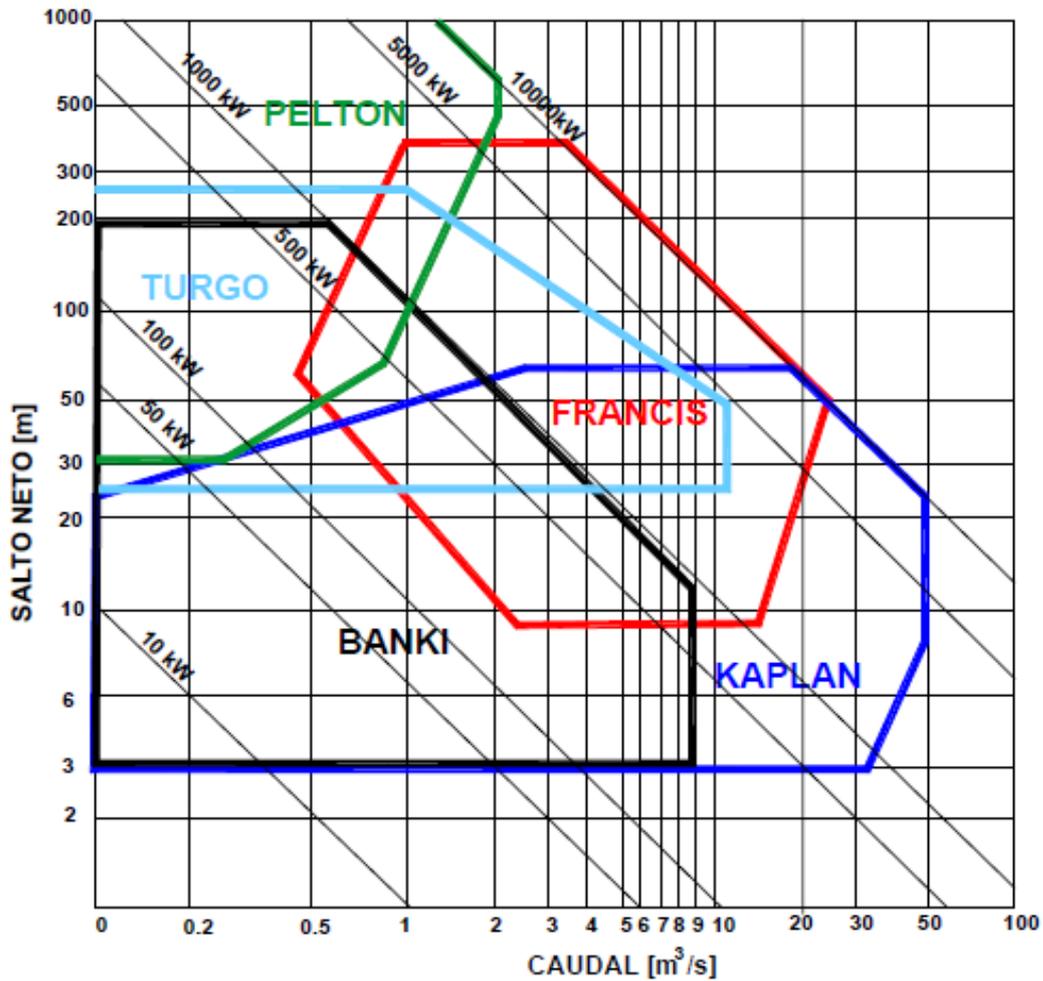
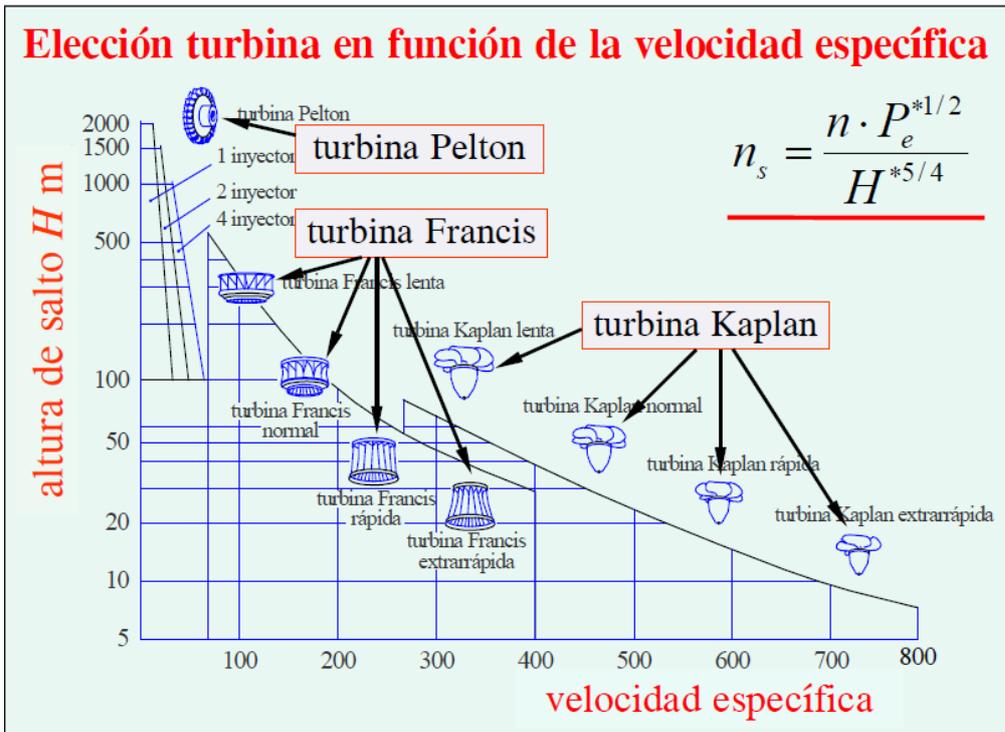


Tabla 4.1 Características principales de turbinas hidráulicas

TURBINA	Inventor y año de patente	N_s (rpm, HP, m) rpm	Q m^3/s	H m	P kW	$\eta_{\text{máx}}$ %
A C	PELTON (EE.UU.) 1880	1 Ch: 30	0.05-50	30-1800	2-300000	91
		2 Ch: 30-60				
		4 Ch: 30-60				
		5 Ch: 60-70				
C I	TURGO (G. Bretaña) 1920	60-260	0.025-10	15-300	5-8000	85
Ó N	MICHELL- BANKI (Australia) 1903 (Hung.) 1917-1919	40-160	0.025-5	1-50 (200)	1-750	82
R E	Bomba rotodinámica Dionisio Papin (Francia) 1689	30-170	0.05-0.25	10-250	5-500	80
A C	FRANCIS (G. Bretaña) 1848	L: 60-150 N: 150-250 R: 250-400	1-500	2-750	2-750000	92
C C	DERIAZ (Suiza) 1956	60-400	500	30-130	100,000	92
I Ó	KAPLAN y de hélice V. Kaplan (Austria) 1912	300-800	1000	5-80	2-200000	93
N	AXIALES: - Tubular - Bulbo - Generador periférico Kühne-1930 Hugenin-1933 Harza-1919	300-800	600	5-30	100,000	93

Nota: N_s : velocidad específica
Ch: chorro
L: lento
N: normal
R: rápida

Velocidad específica N_s	Tipo de Turbina
De 5 – 30	Pelton con un inyector
De 30 – 70	Pelton con varios inyectores
De 40 160	Michell - Banki
De 60 – 150	Francis Lenta
De 150 – 250	Francis Normal
De 250 – 450	Francis Rápida
De 450 – 600	Francis doble gemela rápida
Más de 500	Kaplan o hélice

Tabla 4.3 Velocidad sincrónica en función del número de polos. [12]

Frecuencia [Hz]	Polos	Velocidad Sincrónica [rpm]
60	2	3600
	4	1800
	6	1200
	8	900
	10	720
	12	600

Anexo 2.

PLC

10" HMI with CONTROLLINO runtime



- 800 × 480 pixel (16:9)
- TFT-LCD touch screen
- 200 MB application memory
- 1 × Ethernet, 4 × serial, 1 × USB as standard
- Operating temperature -10° to +50° C
- CE, FCC, KCC, UL approvals



General description

Warranty	2 year
----------	--------

Certifications

General	CE, FCC, KCC, UL 61010-2-201
---------	------------------------------

Mechanical

Mechanical size	284 x 187 x 52mm
-----------------	------------------

1million finger touch operations

Touch type	Resistive
------------	-----------

Cut-out size	275 x 177
--------------	-----------

Weight	1.3 kg
--------	--------

Housing material	Plastic (PC+ABS), Gray
------------------	------------------------

Power

Input voltage	24 V DC (18 to 32 VDC)CE: The power supply must conform with the requirements according to IEC 60950 and IEC 61558-2-4.UL and cUL: The power supply must conform with the requirements for class II power supplies.
---------------	---

Power consumption	10.8W
-------------------	-------

Input fuse	Internal DC fuse
------------	------------------

CPU	ARM9 400 MHz
-----	--------------

RAM	128 MB
-----	--------

FLASH	256 MB, 200 MB free
-------	---------------------

Environmental

Operating temperature	-10°C to +50°C
-----------------------	----------------

Storage temperature	-20° to +60°C
---------------------	---------------

Shock	15g, half-sine, 11ms according to IEC60068-2-27
-------	---

Vibration	1g, according to IEC 60068-2-6, Test Fc
-----------	---

Sealing front	IP65
---------------	------

Sealing back	IP20
--------------	------

Humidity	5% – 85% non-condensed
----------	------------------------

Display

Size diagonal	10.1" diagonal
---------------	----------------

Resolution	800x480 pixels
------------	----------------

Backlight	LED Backlight
-----------	---------------

Backlight life time	20000 hours
---------------------	-------------

Backlight brightness	350 cd/m ²
----------------------	-----------------------

Backlight dimming	Industrial Dimming
-------------------	--------------------

Display type	TFT-LCD with LED backlight
--------------	----------------------------

Display pixel error	Class I (ISO9241-307)
---------------------	-----------------------

Communication serial

Number of serial ports	2 Port 9pin DSUB
------------------------	------------------

Serial port 1	RS 232 (RTS/CTS)
---------------	------------------

Serial port 2	RS422/485
---------------	-----------

Serial port 3	RS 232
---------------	--------

Serial port 4	RS 485
---------------	--------

Ethernet communication

Number of ethernet ports	1
--------------------------	---

Ethernet port 1	1x10/100 Base-T (shielded RJ45)
-----------------	---------------------------------

Expansion interface

Expansion port	No
----------------	----

SD card	No
---------	----

USB	1xUSB 2.0 400mA
-----	-----------------

Anexo 3.

Válvula con actuador

VÁLVULA DE CONTROL ARI-STEVI 440

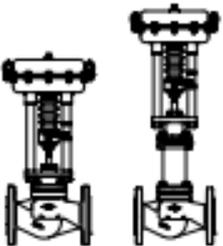


ARI-STEVI® 440 / 441 (DN15-250)
Control valve - straight through

With pneumatic and electric actuators

ARI-STEVI® 440 / 441
Pneumatic actuator
ARI-DP 32-34 Tri

- Reversible pneumatic actuator
- Actuator with rolling diaphragm
- Air supply pressure max. 6 bar
- Stem protection by bellows
- Maintenance-free O-ring sealing
- Assembly of additional devices acc. to DIN IEC 60534-6



Page 4

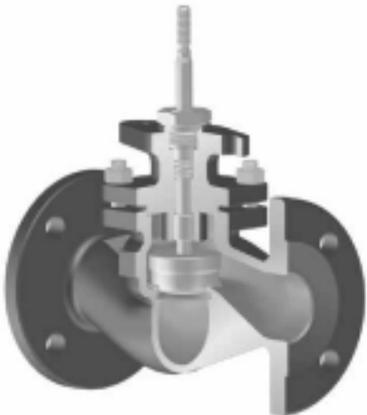
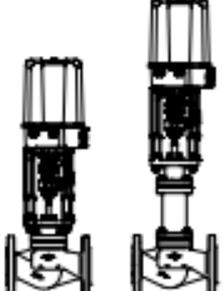


Fig. 440

ARI-STEVI® 440 / 441
Electric actuator
ARI-PREMIO 2,2-25kN
ARI-PREMIO-Plus 2G 2,2-25kN

- Enclosure IP 65
- 2 torque switches
- Handwheel
- Additional devices available, e.g. potentiometer



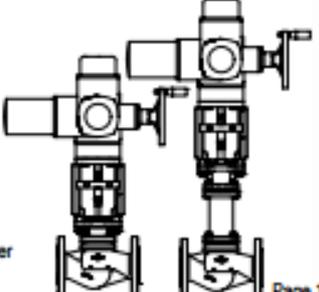
Page 12



Fig. 441

ARI-STEVI® 440 / 441
Electric actuator
AUMA SAR 07.2-10.2

- Enclosure IP 67
- 2 torque switches
- 2 travel switches
- Handwheel
- Overheating protection for motor as standard
- Additional devices available, e.g. potentiometer
- Explosion proof version available



Page 14



Fig. 441

ARI-STEVI® 440
Electric actuator with fail-safe function
FR1.2

- Operation mode for fail-safe function CLOSE
- Enclosure IP 66
- Operating time adjustable
- Additional devices available, e.g. potentiometer





Fig. 441

Control valve in straightway form with pneumatic actuator ARI-DP

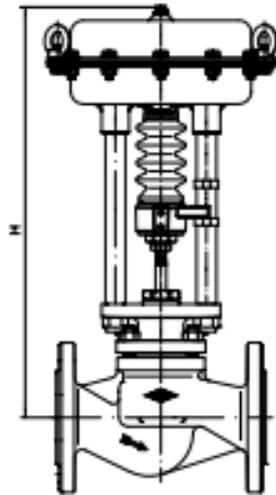


Fig. 440

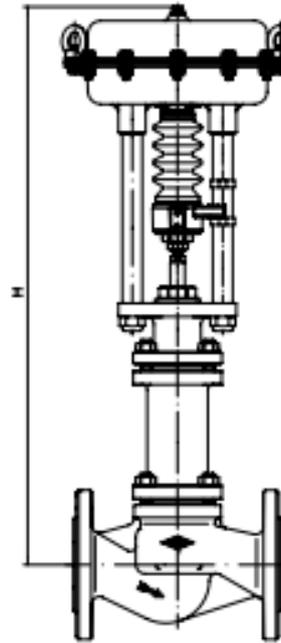


Fig. 441

Heights and weights

DN		15	20	25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	250	
Fig. 440	DP32	H (mm)	442	442	450	450	457	463	465	480	499	-	-	-	-
		PN16 (kg)	13	13	14	16	18	21	26	31	42	-	-	-	-
		PN40 (kg)	13	14	15	17	19	22	29	35	48	-	-	-	-
	DP33	H (mm)	497	497	505	505	512	518	531	546	565	-	-	-	-
		PN16 (kg)	19	19	20	22	24	27	32	37	48	-	-	-	-
		PN40 (kg)	19	20	21	23	25	28	35	41	54	-	-	-	-
	DP34	H (mm)	-	-	-	-	-	-	666	681	680	719	779	841	901
		PN16 (kg)	-	-	-	-	-	-	62	67	78	95	118	190	304
		PN40 (kg)	-	-	-	-	-	-	65	71	84	101	122	222	336
	DP34T	H (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1091	1151
		PN16 (kg)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	261	375
		PN40 (kg)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	293	407
	DP34Tri	H (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1313	1373
		PN16 (kg)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	295	409
		PN40 (kg)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	327	441

Anexo4.

A5 SERVOMOTOR BI-DIRECCIONAL	
Function:	To supply energy to the system.
Manufacturer:	Galil
Model number:	N23-54-100
Maximun speed:	55 rpm
Torque:	2.95 N
Recommended supply voltage:	60 v
R - Armature resistance:	1.8 Ω
L - Armature inductance:	4.1 mH
T _e - Electrical time constant:	2.27 ms
T _m - Electro mechanical time constant:	0.25 ms
Servo Amplifier	
Function:	To supply power to drive the motor
Manufacturer:	Galil
Model number:	MSA-12-70
Has protection against over – voltage, over-current, over-heating, and short circuits, across motor, ground and power leads. Has adjustable gain.	
Power supply	
Function:	To provide DC supply voltage to the amplifier
Manufacturer:	Galil
Model number:	CPS-12-24
Power rating:	24 VDC@ 12A

Anexo 5

Evaluación Económica

Costos

- Válvula

VÁLVULA DE CONTROL ARI-STEVI 440

Costo: \$ 3.000

- Plc

10" HMI with CONTROLLINO runtime

Costo: 1100 dólares

- Sensores

Costo: \$ 1000

- Mano de Obra

Costo: \$ 1000

Costo total por turbina: 6100 dólares

Costo total por las dos turbinas: 10100 dólares

Imprevisto (15%) = 11615 dólares

Convertido en nuevos soles = 37168 soles

costo	37168	soles
Mantenimiento	371.68	soles
costo total	37539.68	soles

Costo por KWh

0.1 Soles

Producción mensual MWh	Kwh	Producción mensual (soles)	Producción anual (soles)
290	290000	29000	348000
Producción + beneficio			
298.7	298700	29870	358440
		Diferencia	10440

EVALUACION ECONOMICA

Miles de Soles (\$/)

SISTEMA DE CONTROL DE LA CH BUENOS AIRES

INGRESOS	A) BENEFICIO POR PERDIDAS DE ENERGÍA B) C) D) VALOR RESIDUAL			
EGRESOS	1 INVERSIÓN DE EQUIPOS 2		3 COSTOS DE MANTENIMIENTO 4	

AÑO	EGRESOS				Carga Total	INGRESOS					Benef. Total	FLUJO ECONOMICO
	1	2	3	4		A	B	C	D	E		
2,017	37 540	375			37 915	10 440					10 440	-27 475
2,018		375			375	10 440					10 440	10 065
2,019		375			375	10 440					10 440	10 065
2,020		375			375	10 440					10 440	10 065
2,021		375			375	10 440					10 440	10 065
2,022		375			375	10 440					10 440	10 065
2,023		375			375	10 440					10 440	10 065
2,024		375			375	10 440					10 440	10 065
2,025		375			375	10 440					10 440	10 065
2,026		375			375	10 440			3 754		14 194	13 819

RESULTADOS FINALES

66 860

INVERSION	37 540	soles	YAN	24 558	soles
TASA DE DESCUENTO	12%	%	TIR	34.40%	%
YAN COSTOS	35 639	soles	PAY BACK	4.52	Años
YAN BENEFICIOS	60 197	soles	B/C	1.69	

Pay Back

1	-24,531.61	36.69
2	-16,508.17	27.65
3	-9,344.39	17.53
4	-2,948.15	6.19
5	2,762.77	5 -6.5
6	7,861.81	-20.72
7	12,414.53	-36.65
8	16,479.45	-54.49
9	20,108.85	-54.24
10	24,558.07	12

4.52

Anexo 6

