



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

DESARROLLO Y PRUEBAS DE UN CONTROLADOR ELECTRÓNICO PARA UNA
MICROTURBINA HIDRÁULICA DE USO ACADÉMICO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

CAMILO JAVIER ZAMORA GONZÁLEZ

PROFESOR GUÍA:
JUAN ELICER CORTÉS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
PATRICIO MENDOZA ARAYA
RODRIGO HERNÁNDEZ PELLICER

SANTIAGO DE CHILE
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: CAMILO JAVIER ZAMORA GONZÁLEZ
FECHA: 2019
PROF. GUÍA: JUAN ELICER CORTÉS

DESARROLLO Y PRUEBAS DE UN CONTROLADOR ELECTRÓNICO PARA UNA MICROTURBINA HIDRÁULICA DE USO ACADÉMICO

Debido a la dificultad de entregar energía eléctrica a casas ubicadas en zonas aisladas y bajo la motivación de aplicar una solución innovadora sobre la generación de electricidad a nivel domiciliario, ya que, se utilizan las áreas de energía, proyecto, diseño y control. Conlleva a realizar el control electrónico de una microturbina hidráulica asociada a una microcentral. Con este fin, y tomando en consideración que la microcentral hidráulica se compone por una microturbina pelton y un generador de imanes permanentes, que entregan aproximadamente 10 [kW] a distribuir en cargas variables, asemejándose al uso eléctrico de una casa, se impone que la microcentral debe entregar potencia eléctrica a una frecuencia de 50 [Hz] y un voltaje de 220 [V] de forma constante. A su vez, se debe estudiar la operación de su microturbina asociada con el fin de entregar conocimiento sobre su funcionamiento a lo largo del país.

Por lo tanto, el objetivo principal es desarrollar e implementar un control electrónico para una microturbina hidráulica, con el fin de mejorar el laboratorio de turbomáquinas hidráulicas del Departamento de Ingeniería Civil Mecánica de la Universidad de Chile, para generación distribuida, estudios e investigaciones.

Para ello, se tienen como objetivos específicos el diseño y construcción de un sistema de control electrónico para una microcentral hidráulica que genera energía eléctrica a 220 [V] y 50 [Hz] de forma constante. Al igual que del control para caracterizar el funcionamiento de la microturbina hidráulica asociada, sin requerir voltaje o frecuencia constante. Ambos con un sistema de seguridad como protección que debe ser diseñado y evaluado para un correcto funcionamiento.

Por ende, se debe proponer una solución de control electrónico, modelarla y realizar simulaciones, cotizar y montar la solución con la microcentral hidráulica, para finalmente, verificar su funcionamiento con la microcentral y con su sistema de seguridad.

Por lo tanto, se van a estudiar informes y papers de control de microcentrales hidráulicas, se realizarán simulaciones con los programas Matlab y Simulink, para luego, montar el sistema de control electrónico en el laboratorio de turbomáquinas hidráulicas del Departamento de Ingeniería Civil Mecánica de la Universidad de Chile, requiriendo la microcentral hidráulica con una piscina, una bomba, un sistema de cañerías, instrumentación, válvulas y la solución de control a proponer.

Finalmente, se puede decir que se debe lograr proponer una solución simple y factible de realizar, que es funcional para controlar y generar conocimiento de la operación de una microcentral hidráulica y su microturbina asociada. Siendo posible de ser aplicada en redes domiciliarias para su aplicación en generación distribuida y en universidades para su aplicación en la toma de conocimiento.

Dedicada a mi familia, amigos, y a todos aquellos partícipes de la realización de este trabajo.

Agradecimientos

Agradezco a mi familia por su apoyo, principalmente a mis papás y a mi polola por todo su apoyo, ayuda, aliento y ánimo para poder salir adelante, gracias por todo su esfuerzo y enseñanzas para nunca rendirse y terminar las cosas, sobre todo lo que a uno le gusta, aunque sean difíciles. Por siempre estar acompañándome, apoyándome y ayudándome, gracias.

Agradezco a mis amigos, a todos los que conocí en la universidad, ya que, cada uno de ellos me llenó de distintos sucesos y emociones que me llevaron hasta hoy. Por su compañía, muchas gracias.

Agradezco a mis profesores, cada uno por enseñarme distintas formas de resolver cada problema a enfrentar. A mí profesor guía Juan Carlos Elicer por darme la oportunidad de realizar un proyecto completo, desde la concepción de una idea hasta su ejecución y operación. Y a su vez, al profesor Patricio Mendoza por ayudarme en el pulido y ejecución del modelo y montaje de este trabajo.

Agradezco a todos los que realizaron una parte del mejoramiento del laboratorio de turbomáquinas hidráulicas como funcionarios del Taller, Eduardo, Seba, Juan Carlos Salgado, entre otros, y los alumnos Stanislas, Tom y Nicolás.

Finalmente, agradecer a todos, que son mi familia, amigos y amigas, y compañeros por estar o haber estado y/o pasado en mi vida.

A todos, muchas gracias.

Nomenclatura

P_h : Potencia hidráulica del recurso hidráulico [kW].

γ : Peso específico del agua, equivale multiplicar la densidad ($1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$) con la gravedad ($9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$).

Q : Caudal [$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$].

H_n : Altura neta [m.c.a].

H_b : Altura bruta o geodésica [m.c.a].

H_{perd} : Pérdidas de carga en circuito hidráulico, en forma de altura [m.c.a].

ε : Grado de reacción de una turbina hidráulica.

P_T : Potencia mecánica de la turbina [kW], equivalente a P_m .

η_{global} : Rendimiento global de la turbina.

$n_{\text{s}_{\text{bomba}}}$: Velocidad específica de bomba, adimensional.

N : Velocidad de giro [RPM].

H_{bom} : Presión en términos de altura [m.c.a.].

P_{el} : Potencia eléctrica del generador [kW], equivalente a P_e .

η_{el} : Rendimiento eléctrico.

P_G : Potencia de placa del generador [kW].

$\cos(\varphi)$: Factor de potencia.

P: Controlador proporcional.

PI: Controlador proporcional integral.

PID: Controlador proporcional integral derivativo.

$x(s)$: Función de entrada del sistema.

$y(s)$: Función de salida del sistema.

$G(s)$: Función del controlador.

Planta: Sistema al cual se le está aplicando control.

$u(s)$: Función de salida del controlador.

$e(s)$: Función error entre entrada de referencia y salida.

K_p : Ganancia de controlador proporcional.

T_i : Constante de tiempo del controlador integral.

T_d : Constante de tiempo del controlador derivativo.

ω_s : Velocidad de rotación del servomotor [RPM].

τ_s : Constante de tiempo del servomotor [s].

#vueltas: N° de vueltas del inyector, requeridas en total para el servomotor.

l_{hilo} : Largo del hilo del inyector [mm].

p : Paso del hilo del inyector [mm].

P_s : Potencia del servomotor [W].

T_s : Torque del servomotor [J].

T_{s-cr} : Torque del conjunto servomotor - caja de reducción [J].

C_{cr} : Coeficiente de reducción, es comercial.

ω_{s-cr} : Velocidad de rotación del conjunto servomotor - caja de reducción [RPM].

$P(t)$: Potencia electrica real del sistema [W].

V : Voltaje [V].

I : Intensidad de corriente [A].

ω_e : Frecuencia eléctrica [Hz].

t : Tiempo [s].

R : Resistencia eléctrica [Ω].

f : Frecuencia eléctrica entregada por el generador [Hz].

ω : Velocidad angular del conjunto turbina-generator $[\frac{\text{rad}}{\text{s}}]$.

T_w : Constante de tiempo del agua [s].

L: Largo de las tuberías [m].

A: Área de la sección interior de las tuberías $[\text{m}^2]$.

g: Constante de gravedad $[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}]$.

q_{base} : Caudal base para obtener la potencia nominal de 9,6 [kW] $[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}]$.

h_{base} : Altura base para obtener la potencia nominal de 9,6 [kW] [m].

H: Constante de tiempo del momento de inercia del conjunto turbina-generator [s].

J: Constante de inercia de la turbina y generator $[\text{kg m}^2]$.

ω_{ref} : Velocidad angular de referencia del conjunto turbina-generator $[\frac{\text{rad}}{\text{s}}]$.

K_c : Ganancia crítica .

P_c : Período crítico.

T_1 : Constante de tiempo de respuesta mecánica de la investigación [9], en [s].

T_2 : Constante de tiempo de respuesta eléctrica de la investigación [9], en [s].

K_{pl} : Constante de proporcionalidad de la investigación [9].

K_i constante de integración de la investigación [9].

Tabla de Contenido

Introducción	1
1. Antecedentes generales y motivaciones	1
2. Objetivos	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos	3
3. Alcances	3
1. Antecedentes	5
1.1. Centrales hidráulicas	5
1.1.1. Definición	5
1.1.2. Clasificación	6
1.1.3. Microcentrales	6
1.2. Recurso hídrico	6
1.2.1. Definición	6
1.2.2. Variables de interés	7
1.2.3. Ecuaciones de interés	8
1.3. Turbinas hidráulicas	8
1.3.1. Definición	8
1.3.2. Clasificación según grado de reacción	9
1.3.3. Ecuación de interés	10
1.4. Inyector	10
1.4.1. Definición	10
1.4.2. Funcionamiento	11
1.5. Bombas hidráulicas	11
1.5.1. Definición	11
1.5.2. Ecuación de interés	12
1.6. Generadores eléctricos	12
1.6.1. Definición	12
1.6.2. Clasificación	13
1.6.3. Ecuaciones de interés	14
1.7. Controlador o compensador	15
1.7.1. Definición	15
1.7.2. Tipos de controlador	15
1.7.3. Ecuaciones de interés	16
1.7.4. Métodos de sincronización	17
1.7.5. Límite de estabilidad Zigler & Nichols	18

1.8. Servomotor	19
1.8.1. Definición	19
1.8.2. Ecuaciones de interés	19
1.9. Discusión bibliográfica	21
1.9.1. Propuestas de solución	21
1.9.2. Investigaciones	21
1.9.3. Comparación	24
1.10. Problema a resolver	24
2. Metodología	26
3. Resultados	32
3.1. Diseño y Modelos	32
3.1.1. Propuesta de solución de control electrónico para una microcentral hidrúlica en generación distribuida	32
3.1.2. Modelo de control electrónico	33
3.2. Solución final de control electrónico	40
3.2.1. Solución final para una microcentral hidráulica en generación distribuida	40
3.2.2. Solución final para caracterizar el funcionamiento de una microturbina hidráulica de tipo Pelton	41
3.2.3. Solución final del sistema de seguridad contra embalamiento	41
3.3. Implementación	42
3.3.1. Descripción del laboratorio de pruebas.	42
3.3.2. Elementos requeridos y plano de funcionamiento.	42
3.3.3. Control en LabVIEW.	44
3.3.4. Montaje final.	48
4. Análisis	50
4.1. Análisis de material de microturbina hidráulica.	50
4.2. Análisis de controlador utilizado.	52
4.3. Análisis de funcionamiento.	53
4.4.1. Verificación de operación del control electrónico para una microcentral hidráulica en generación distribuida.	53
4.4.2. Verificación de operación del control electrónico para caracterizar el funcionamiento de una microturbina hidráulica.	53
4.4.3. Verificación de operación del sistema de seguridad contra embalamiento.	53
Conclusión	53
Bibliografía	57
Anexos	58
A. Información del Generador Eléctrico enviada por el fabricante.	59
B. Planos P&ID del laboratorio.	63
C. Pruebas de torque.	66

D. Memoria de cálculo	68
D.1. Modelo de conjunto microturbina - generador	68
D.2. Servomotor	69
E. Información de Servomotor y Controlador entregada por proveedor.	71
F. Información de Analizador de Potencia y pinza amperimétrica entregada por proveedor.	81
G. Manual de Operaciones de Microcentral hidráulica.	91
H. Manual de Operaciones de Microcentral hidráulica.	112
I. Imágenes del Montaje Final.	133

Índice de Tablas

3.1. Valores de diseño de un controlador P, PI y PID, para microturbina hidráulica de duraluminio.	35
3.2. Valores de diseño de un controlador P, PI y PID, para microturbina de acero.	38
C.1. Pruebas de torque para ángulo de 90°	66
C.2. Pruebas de torque para ángulo de 45°	67

Índice de Ilustraciones

1.1. Acción del agua en turbinas de acción y reacción [4]	9
1.2. Inyector y sus componentes [13].	11
1.3. Sistema en lazo abierto (superior) y en lazo cerrado (inferior) [3].	16
1.4. Sistema de control en lazo cerrado general [3].	17
1.5. Tabla para ajustar parámetros de controlador PID con método de límite de estabilidad [14].	18
1.6. Diagrama de solución de control de Benjamín Vergara [17].	22
1.7. Diagrama de solución de una microcentral hidráulica de Patricio Mendoza [10].	22
1.8. Diagrama de bloques de modelo lineal de control de turbinas hidráulicas con suministro aislado de carga [12].	22
1.9. Diagrama de central minihidro con carga variable [7].	23
3.1. Solución propuesta del control de la central microhidráulica con carga variable.	32
3.2. Entrada escalón de velocidad de rotación de referencia $78,54 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$	34
3.3. Entrada escalón de variación de potencia eléctrica solicitada, cada 2,22 [kVA] aproximadamente.	34
3.4. Modelo simple en Matlab de una microcentral hidráulica con microturbina de duraluminio.	34
3.5. Sistema de microcentral hidráulica de duraluminio en límite de estabilidad con periodo crítico.	35
3.6. Respuesta del sistema con controlador P y microturbina de duraluminio. . .	36
3.7. Respuesta del sistema con controlador PI y microturbina de duraluminio. . .	36
3.8. Respuesta del sistema con controlador PID y microturbina de duraluminio. .	37
3.9. Modelo simple en Matlab de una microcentral hidráulica con microturbina de acero.	37
3.10. Respuesta del sistema con controlador P y microturbina de acero.	38
3.11. Respuesta del sistema con controlador PI y microturbina de acero.	39
3.12. Respuesta del sistema con controlador PID y microturbina de acero.	39
3.13. Solución propuesta para caracterizar una microcentral hidráulica.	41
3.14. Interfaz computador-usuario en programa LabVIEW.	44
3.15. Pestaña de adquisición, lectura o envío de datos en programa LabVIEW. . .	45
3.16. Diagrama de bloques de programa LabView de Pitot y amperímetro para ambos modos de operación.	45
3.17. Diagrama de bloques de programa LabView de válvula reguladora de sobredimensionamiento de bomba, válvula de seguridad y multímetro.	46

3.18. Diagrama de bloques de programa LabView de tacómetro, torquímetro y flujoímetro.	46
3.19. Diagrama de bloques de programa LabView de modo automático con PID como control del Servomotor y control de frecuencia del generador.	47
3.20. Diagrama de bloques de programa LabView de modo manual con variador de frecuencia para la bomba y control manual de Servomotor.	47
3.21. Diagrama de bloques de función VISA, caso sin adquisición de datos.	48
3.22. Diagrama de bloques de función VISA, caso con adquisición de datos.	48
3.23. Interfaz computador-usuario de controlador con función VISA.	48
4.1. Comparación de control de frecuencia entre microturbinas de acero y duraluminio con controlador PID.	50
4.2. Comparación de control de la frecuencia eléctrica entre controladores P, PI y PID para microturbina de duraluminio.	52
E.1. Servomotor con caja reductora de velocidad, orientación de frente.	80
E.2. Servomotor con caja reductora de velocidad, orientación de perfil.	80

Introducción

1. Antecedentes generales y motivaciones

En Chile existen varias dificultades para entregar energía eléctrica a casas en zonas aisladas, debido a que existe un escaso tendido eléctrico instalado por el alto costo de su instalación, por las complejidades de realizar trabajos en terrenos de difícil acceso y porque los beneficiarios son un pequeño grupo de población. Por lo tanto, es una actividad de alto costo que genera bajo beneficio tanto económico como social.

A su vez, dentro de Chile existe un escaso conocimiento sobre la operación de una turbina hidráulica, principalmente en el área de educación, generando que los futuros profesionales que se aboquen al área energética y en particular al área hidráulica tengan un mayor conocimiento teórico que experimental, ocasionando deficiencias al momento de operar centrales hidráulicas.

Además, debido a que la forma de entregar energía eléctrica es mediante distribución al sistema interconectado central o de forma aislada, las microcentrales hidráulicas instaladas se controlan, principalmente, utilizando accesorios electrónicos que regulan la energía que produce el generador eléctrico, ocasionando el desconocimiento de la operación de la misma microturbina hidráulica.

Asimismo, no se ha realizado en el país un laboratorio que controle automáticamente una microcentral hidráulica, a través de la regulación del caudal que utiliza la microturbina hidráulica, haciendo uso de un inyector, debido a que se busca, principalmente, la generación eléctrica en la frecuencia y voltaje requerido y no la generación de conocimiento en su operación.

Producto de todo lo anterior, este trabajo se enfoca en estudiar la instalación de microcentrales hidráulicas en canales o piscinas, para producir energía eléctrica a 220 [V] y 50 [Hz], con el fin de suministrar electricidad a casas a un menor costo, incluyendo la caracterización del funcionamiento de la microturbina hidráulica asociada.

Para realizar lo dicho previamente, es de gran motivación poder aplicar una solución innovadora sobre la generación de electricidad a nivel domiciliario y que además, pueda entregar apoyo experimental a la generación de conocimiento. Lográndose relacionar el área de proyectos con las áreas de energía, diseño y control.

A causa de lo anterior, el propósito principal de este trabajo es desarrollar e implementar un control electrónico para una microturbina hidráulica, como mejoramiento del laboratorio de turbomáquinas hidráulicas del Departamento de Ingeniería Civil Mecánica de la Universidad de Chile, con el fin de que se puedan realizar estudios, investigaciones y se logre generar energía eléctrica para uso domiciliario desconectado de la red.

Para ello, específicamente se va a realizar el diseño y la instalación de un sistema de control electrónico para una microcentral hidráulica que genere energía eléctrica a 220 [V] y 50 [Hz] de forma constante, al igual que del control electrónico para caracterizar la operación de la microturbina hidráulica asociada, sin necesidad de tener un voltaje o frecuencia constante.

Igualmente, se va a instalar un sistema de seguridad como protección para mantener en el rango de operación las velocidades de funcionamiento, tanto de la microturbina hidráulica como del generador. Siendo, a su vez, probado en conjunto con los sistemas de control a realizar, con el objetivo de que sean funcionales.

Con el fin de realizar lo mencionado, se va a proponer una solución de los sistemas de control electrónico, modelar el diseño propuesto y realizar simulaciones de este. Luego, cotizar y montar el control electrónico y el sistema de protección con la microcentral hidráulica. Para finalmente, realizar las pruebas de funcionamiento del sistema de seguridad y del control electrónico de la microcentral, contrastando con los datos obtenidos en la simulación.

Para esto, se planea estudiar informes y papers de control de microcentrales hidráulicas, proponer una solución, modelarla y realizar simulaciones de esta con los programas Matlab y Simulink. Posteriormente, montar el sistema de control electrónico y el sistema de protección elegido en el laboratorio de turbomáquinas hidráulicas del Departamento de Ingeniería Civil Mecánica de la Universidad, y finalmente analizar la funcionalidad de los sistemas.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Desarrollar, montar y probar el funcionamiento de un sistema de control electrónico para una microturbina, como mejora del laboratorio de turbomáquinas hidráulicas del Departamento de Ingeniería Civil Mecánica de la Universidad de Chile, orientado a docencia e investigación.

2.2. Objetivos específicos

- Diseñar un sistema de control electrónico para una microcentral hidráulica, que genera energía eléctrica a 220 [V] y 50 [Hz] constantes, y que pueda caracterizar el funcionamiento de su microturbina asociada, a voltaje y frecuencia variable, todo con un sistema de seguridad conjunto.
- Montar el sistema de control electrónico para una microcentral hidráulica que genera energía eléctrica a 220 [V] y 50 [Hz] constantes, y que pueda caracterizar el funcionamiento de su microturbina asociada, a voltaje y frecuencia variable, en conjunto con el sistema de seguridad antiembalamiento a ser usado en la microcentral hidráulica asociada.
- Evaluar el funcionamiento del sistema de control electrónico y de seguridad a implementar para el modo de generación de energía eléctrica a 220 [V] y 50 [Hz] de forma constante, y para el modo de caracterizar la microturbina hidráulica a voltaje y frecuencia variable.

3. Alcances

El alcance de este trabajo es diseñar y montar un controlador electrónico para el laboratorio de turbomáquinas hidráulicas, con el fin de controlar sus parámetros de funcionamiento como la potencia, caudal, presión, velocidad de rotación y frecuencia, en dos experiencias distintas.

Ambas experiencias están asociadas al uso académico del laboratorio de turbomáquinas hidráulicas. La primera experiencia es utilizada para observar los efectos de regular el caudal de una microcentral hidráulica al variar el consumo de electricidad, el cual, debe ser suplido por esta al generar energía eléctrica a 220 [V] y 50 [Hz] de forma constante. Mientras que la segunda experiencia es caracterizar el funcionamiento de su microturbina hidráulica asociada, para tomar conocimiento de las variables y las pérdidas existentes. Sobre todo en la operación de una microturbina hidráulica y de una microcentral.

De acuerdo a lo dicho anteriormente, el trabajo a realizar para la primera experiencia se extiende a montar un control electrónico para mantener la frecuencia constante a 50 [Hz], mientras se varían las resistencias eléctricas conectadas a la microcentral, es decir, se varía la carga eléctrica solicitada. Ello se debe regular al variar el caudal, a través del movimiento de la aguja del inyector de la microcentral, aumentando o disminuyendo, el caudal, según corresponda.

Con motivo de generar 220 [V] de forma constante al producir energía eléctrica en la primera experiencia. Se va a mantener la altura neta nominal de la microturbina hidráulica en 40 [m], ya que, realizar un sistema que controle la variación de voltaje tanto en la microturbina como en el generador se encuentra fuera de los alcances de este trabajo.

Por otro lado, el trabajo a llevar a cabo en la segunda experiencia va a finalizar al momento de montar un control electrónico que permita variar todos los parámetros de funcionamiento utilizando una interfaz en un computador, realizada anteriormente. Pero no está contemplado caracterizar el funcionamiento de la microturbina, ni mantener la frecuencia ni el voltaje constante en esta experiencia.

Adicionalmente, este trabajo contempla incluir un sistema de protección o de seguridad para las dos experiencias mencionadas previamente. Este sistema de seguridad, debe evitar que la microcentral alcance su velocidad de embalamiento, siendo considerada en 900 [RPM], ya que, es la velocidad máxima de giro que alcanza el generador eléctrico antes de que se dañe. Por ende, debe funcionar cuando la microturbina alcance una velocidad de giro de 850 [RPM].

Además, el sistema de seguridad debe proteger al generador de alzas de corriente y voltaje que incurra la microcentral. Por ello, se va a utilizar un interruptor trifásico termomagnético que se encuentre conectado a la salida del generador, con el fin de protegerlo, y a las resistencias. Cabe recalcar que siempre debe estar conectada, al menos, una resistencia con el interruptor y éste activo con el generador, aún cuando la microcentral no se encuentre en funcionamiento, para evitar daños en el generador.

Debido a que se va a diseñar y montar distintos sistemas, tanto de control como de seguridad, se hace necesario destacar que el alumno a cargo no tiene contemplado construir circuitos eléctricos y/o componentes electrónicos, ni realizar modificaciones a los elementos requeridos, pues se busca que el diseño y montaje final sean sencillos y factibles de realizar.

Finalmente, el trabajo va a concluir al momento que el sistema de control en conjunto con el sistema de seguridad sean funcionales, siendo contemplada como mínimo una prueba de funcionamiento para su posterior discusión.

Capítulo 1

Antecedentes

Dentro de este capítulo se busca comprender los conceptos teóricos de mayor importancia para poder seguir el trabajo realizado sin dificultades. Siendo considerado uno de los apartados principales, ya que, cimienta los contenidos para comprender el tema y la realización de este trabajo.

1.1. Centrales hidráulicas

1.1.1. Definición

Las centrales hidráulicas son instalaciones que aprovechan la energía hidráulica para transformarla en energía mecánica, y a continuación, en energía eléctrica. Pueden estar en dos modos de operación distintos [10] mientras producen electricidad:

- Conectado a la red: La energía producida se conecta directamente a la red, para ello, debe mantener la potencia de funcionamiento con una frecuencia de 50 [Hz] y un voltaje trifásico de 380 [V]. De este modo, se hace necesario una subestación y/o transformador para suministrar energía eléctrica a las líneas de transmisión del país.
- Aislado o modo isla: La energía producida va directamente a cargas que pueden ser consumo en casas o en industrias. Por lo tanto, deben generar una potencia con 50 [Hz] de frecuencia y 220 [V]. En el caso de electrodomésticos o maquinarias que funcionen a algún voltaje mayor como 380 [V], 540 [V] u otro, se suministra una potencia de esos voltajes, pero se mantiene la frecuencia de 50 [Hz]. Cabe destacar que en este caso no es necesario utilizar transformador o subestación.

Para generar esta transformación de energía, las centrales hidráulicas se componen, en forma general de lo siguiente [15]:

- + Sistemas de toma de agua: Cuya configuración depende de la tipología del curso de agua interceptado y de la orografía de la zona.

Para micro-centrales, generalmente se utilizan piscinas o canales [2].

- + Sistemas de conducción de las aguas: Formados por canales o conductos forzados según la orografía, y por consiguiente la tipología de instalación.

Para micro-centrales, se utilizan frecuentemente tuberías [2].

- + Sistema mecánico: Es la turbina hidráulica con algunos componentes, donde uno de los más importantes es el inyector.
- + Sistema de generación eléctrica: Es el generador con algunos componentes. Cabe decir que, en forma general, se incluye sistema de transformación y control de electricidad, para mantener la frecuencia de red.

1.1.2. Clasificación

Por otro lado, existen varias clasificaciones de las centrales hidráulicas como los tipos de sistemas que utiliza, tipo de turbina hidráulica, por cantidad de potencia, entre otros.

La clasificación por cantidad de potencia de las centrales indica cuales son las centrales microhidráulicas, pues la clasificación es como sigue [5]:

- Grandes centrales: Potencia superior a 5.000 [kW].
- Pequeñas centrales: Potencia superior a 1.000 [kW] e inferior a 5.000 [kW].
- Minicentrales: Potencia superior a 100 [kW] e inferior a 1.000 [kW].
- Microcentrales: Potencia superior a 5 [kW] e inferior a 100 [kW].
- Picocentrales: Potencia superior a 1,5 [kW] e inferior a 5 [kW].
- Hidrocargadores: Potencia menor que 1,5 [kW], generan electricidad en corriente continua, la cual puede aprovecharse para cargar baterías.

1.1.3. Microcentrales

Tal como se menciona anteriormente, las microcentrales son centrales hidráulicas que generan una potencia superior a 5 [kW] pero inferior a 100 [kW]. Cabe destacar que las microcentrales cumplen con los modos de operación y los componentes mencionados anteriormente.

1.2. Recurso hídrico

1.2.1. Definición

Para el caso de generación hidroeléctrica, se puede definir el recurso hídrico como el movimiento del agua que pasa por una dependencia geográfica gracias a la acción de la gravedad.

1.2.2. Variables de interés

Para poder caracterizar o categorizar un recurso hídrico se utilizan las siguientes propiedades [1]:

- Caudal (Q): Volumen de agua que fluye por unidad de tiempo. Su unidad de medida es en metros cúbicos por hora [$\frac{m^3}{h}$], también puede ser en litros por segundo [$\frac{l}{s}$].
- Variaciones de caudal: Diferencia del caudal promedio del recurso hídrico respecto al caudal instantáneo. El caudal promedio puede ser mensual, anual o por década, lo cual ayuda a obtener un caudal nominal del recurso hídrico en un plazo determinado.
- Concentración de material particulado: Cantidad de material sólido presente en cierta cantidad de fluido.

Cabe mencionar que para este trabajo, se considera que las variaciones de caudal son mínimas y el fluido es agua de cañería, por lo tanto se desprecia la concentración de material particulado.

Por otro lado, para realizar una instalación de energía hidráulica, además del caudal, es fundamental determinar [1]:

- Altura bruta disponible (H_b): Es la distancia vertical entre la superficie del recurso hídrico y el punto en que éste entra a la turbina hidráulica. Su unidad de medida es el metro por columna de fluido, en este caso, agua [m.c.a], o simplemente metro [m]. También se denomina altura geodésica.
- Altura neta equivalente (H_n): También denominada simplemente altura neta, es la altura equivalente real percibida por la turbina, debido a que es la altura bruta disponible sin las pérdidas de carga (H_{perd}) que existen en las tuberías que conducen el recurso hídrico a la turbina. Al igual ue la anterior, su unidad de medida es el metro por columna de fluido, en este caso, agua [m.c.a], o simplemente metro [m].

Cabe destacar que para este trabajo, las variables de mayor interés son el caudal nominal (Q_n) y la altura neta, siendo de 35 [$\frac{l}{s}$] y 40 [m], respectivamente.

1.2.3. Ecuaciones de interés

Para poder cuantificar la potencia mecánica que se puede obtener de un recurso hidráulico, se debe sólo cuantificar la energía potencial en un lapso de tiempo, debido a que la energía cinética es despreciable. Entonces, la cantidad máxima de energía obtenida en un lapso de tiempo de un recurso hidráulico es conocida como potencia hidráulica (P_h), que cuantificada es:

$$P_h = \frac{\gamma Q H_n}{75 \cdot 1,36} \quad (1.1)$$

Donde:

- P_h : Potencia hidráulica del recurso hidráulico [kW].
- γ : Peso específico del agua, equivale multiplicar la densidad ($1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$) con la gravedad ($9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$).
- Q : Caudal [$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$].
- H_n : Altura neta [m.c.a].

Además, como se menciona en el apartado anterior, se tiene que la altura neta es:

$$H_n = H_b - H_{\text{perd}} \quad (1.2)$$

Donde:

- H_n : Altura neta [m.c.a].
- H_b : Altura bruta o geodésica [m.c.a].
- H_{perd} : Pérdidas de carga en circuito hidráulica, en forma de altura [m.c.a].

1.3. Turbinas hidráulicas

1.3.1. Definición

Las turbinas hidráulicas, también denominadas máquinas motoras, son máquinas rotativas donde el fluido de trabajo se considera incompresible o se desprecia su compresibilidad. Estos elementos son capaces de transformar la energía potencial hidráulica del fluido de trabajo en energía cinética, mediante un estator y luego en energía mecánica y torque por medio de un rotor.

Entonces, los elementos principales de una turbina hidráulica son:

+ Estator: Elemento que tal como se menciona anteriormente, aprovecha la energía potencial hidráulica del fluido de trabajo, transformándola en energía cinética.

+ Rotor: También denominado rodete, es el elemento esencial de la turbina. Está provisto de álabes en los que tiene lugar el intercambio de energía entre el fluido de trabajo, en este caso agua, y la turbina hidráulica.

1.3.2. Clasificación según grado de reacción

El grado de reacción de una turbina hidráulica (ε) se define como sigue:

$$\varepsilon = \frac{\text{altura de presión en el rodete}}{\text{altura de presión en el distribuidor} + \text{altura de presión en el rodete}} \quad (1.3)$$

Según el grado de reacción, las turbinas hidráulicas se clasifican en dos tipos, tal como se observa en la figura 1.1:

- Acción o impulsión (Turbina tipo Pelton): Son las que poseen grado de reacción igual a 0.
- Reacción (Turbina tipo Kaplan y Turbina tipo Francis): Son las que poseen grado de reacción distinto de 0.

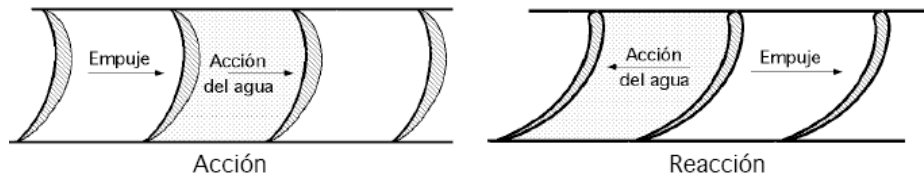


Figura 1.1: Acción del agua en turbinas de acción y reacción [4]

Algunas de las partes principales de las turbinas hidráulicas, varían al ser una turbina de acción o reacción, como el estator. Pues, para las turbinas de acción se utiliza un inyector que hace de estator, y para las de reacción son utilizados álabes fijos, parte que se denomina distribuidor, y un tubo de aspiración, llamado difusor. A su vez, el inyector hace de distribuidor en turbinas de acción, mientras que en turbinas de reacción se utiliza un distribuidor.

El inyector, además, de transformar la energía potencial hidráulica del fluido de trabajo en energía cinética, tiene la función de dirigir el fluido de trabajo, agua, desde la sección de entrada de la turbina hacia la entrada del rotor, distribuyéndola en forma completa (en turbinas de admisión total) o una parte (en turbinas de admisión parcial). Por lo tanto, permite regular el caudal de agua que entra a la turbina, desde cerrar su paso totalmente (caudal cero), hasta abrir el paso para alcanzar el máximo caudal operacional admisible.

Por otro lado, en las turbinas de acción el agua sale del inyector a presión atmosférica y llega al rodete con la misma presión. En estas turbinas, toda la energía potencial hidráulica se transmite al rodete en forma de energía cinética, mientras el rodete no se encuentre inundado.

Sin embargo, en las turbinas de reacción el rodete si se encuentra inundado, entonces el agua sale del distribuidor con una cierta presión que va disminuyendo a medida que el agua atraviesa los álabes del rodete, generando que sólo una parte de la energía potencial hidráulica se transforme en energía cinética.

Además, la presión de salida del rodete es menor que la presión atmosférica, por lo tanto, se utiliza un difusor, el cual genera que la presión de salida del rodete sea igual a la presión atmosférica y evitar la cavitación, eludiendo daños en la turbina por este fenómeno.

1.3.3. Ecuación de interés

Para cuantificar la potencia hidráulica que la turbina transforma a potencia mecánica, específicamente energía hidráulica a energía cinética, se utiliza la ecuación siguiente:

Potencia entregada por la turbina hidráulica (P_T):

$$P_T = \eta_{\text{global}} \cdot P_h \quad (1.4)$$

Donde:

- P_T : Potencia mecánica de la turbina [kW].
- P_h : Potencia hidráulica del recurso hidráulico [kW].
- η_{global} : Rendimiento global de la turbina.

1.4. Inyector

1.4.1. Definición

Dentro del sistema mecánico, el inyector es un componente principal para el control de la potencia de la turbina, ya que, siendo parte del estator de la turbina, es el órgano regulador del caudal de agua que entra al rotor de la turbina en forma de chorro. Consta de una válvula de aguja, cuya carrera determina el grado de apertura de la sección de entrada del agua a la turbina, controlando el caudal.

Por lo tanto, el inyector al regular el caudal, puede controlar la potencia hidráulica que transforma la turbina en potencia mecánica, y así, manejar la potencia eléctrica que genera el conjunto turbina - generador. Siendo sólo dependiente de la carrera de la aguja del inyector. [17].

El inyector con sus principales componentes y la aguja antes mencionada, se puede observar en la figura 1.2.

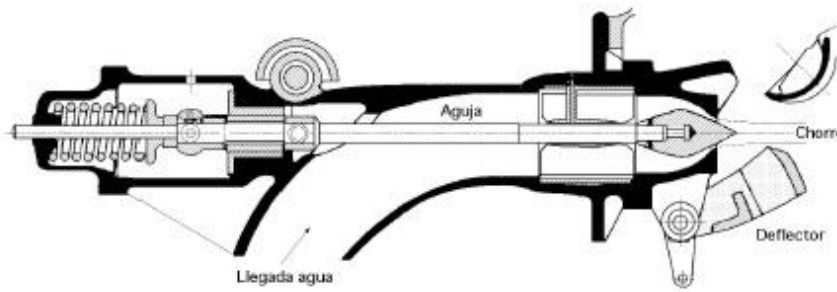


Figura 1.2: Inyector y sus componentes [13].

1.4.2. Funcionamiento

La válvula aguja, antes mencionada, es la que se utiliza para controlar el caudal. Esto se debe a que, el diámetro máximo de la aguja debe ser superior a la salida del chorro de agua para asegurar el cierre de la salida del inyector, es decir, no entra caudal al rotor de la turbina, estrangulando la sección de salida de la boquilla del inyector. Mientras que, a medida que se va mueve la aguja de la posición anterior, se genera entre la aguja y la boquilla un espacio para que el caudal pueda pasar, entrando al rotor de la turbina [17].

1.5. Bombas hidráulicas

1.5.1. Definición

Las bombas hidráulicas, también denominadas máquinas generadoras, son máquinas rotativas donde el fluido de trabajo se considera incompresible o se desprecia su compresibilidad. Estas máquinas son capaces de transferir energía cinética al fluido de trabajo, aumentando su energía potencial hidráulica, mediante un rotor y posteriormente un estator.

Por lo tanto, son máquinas opuestas a las turbinas hidráulicas, pero con los mismos principios de funcionamiento. Pues, poseen los mismos elementos principales, estator y rotor, pero realizan su funcionamiento en sentido contrario, es decir, el rotor utiliza el torque de la bomba para entregar potencia mecánica al fluido, y así el estator transformar tal potencia mecánica del fluido de trabajo en potencia hidráulica. Por lo tanto, el objetivo de operación de las bombas hidráulicas son entregar caudal y presión en términos de altura.

1.5.2. Ecuación de interés

Producto de lo anterior, como se busca que las bombas hidráulicas entreguen caudal y presión, es de interés la velocidad de operación de esta. Principalmente por que mediante un variador de frecuencia se puede controlar, para ello se utiliza la ecuación siguiente:

$$n_{s_{bomba}} = \frac{N \cdot Q^{\frac{1}{2}}}{75^{\frac{1}{2}} \cdot H_{bom}^{\frac{3}{4}}} \quad (1.5)$$

Donde:

- $n_{s_{bomba}}$ Velocidad específica de bomba, adimensional.
- N : Velocidad de giro [RPM].
- Q : Caudal [$\frac{1}{s}$].
- H_{bom} : Presión en términos de altura [m.c.a.].

1.6. Generadores eléctricos

1.6.1. Definición

Son equipos encargados de transformar potencia mecánica de su eje en energía eléctrica a través de un rotor y estator en base a pares de polos magnéticos. Generalmente se instalan en centrales eléctricas para ser accionados por turbinas o motores a combustión; o en los medios de transporte, donde son accionados por motores de combustión interna (automóviles, otros) o turbinas a vapor (barcos) [16].

El funcionamiento de los generadores se debe a que al variar en el tiempo la geometría de un circuito magnético (energía mecánica), producto de la rotación en el eje, se produce una variación del flujo magnético, induciendo voltajes en los circuitos eléctricos que lo enlazan, produciendo energía eléctrica [16].

Posee un estator y rotor al igual que las turbinas hidráulicas, pero son constructivamente distintos, y a su vez, se diferencian con respecto al tipo de generador eléctrico.

1.6.2. Clasificación

De forma general, los generadores eléctricos, según [8], se clasifican en:

- **Máquina de Corriente Continua:** Fue la primera de las máquinas rotatorias en ser desarrollada, y a pesar de las mejoras en su diseño, sigue siendo constructivamente de mayor complejidad que las máquinas de corriente alterna, pues necesita de una unión eléctrica entre rotor y estator, lo que la hace comparativamente menos robusta, requiere mayor mantenimiento y posee mayor volumen y peso por unidad de potencia.

Sin embargo, sigue siendo utilizada, especialmente como motor por su amplio rango de velocidades, por ser ajustables y controlables con alta precisión, por su característica relación torque-velocidad variable o constante, su rápida aceleración, desaceleración y cambio de sentido de giro, y porque tiene la posibilidad de frenado regenerativo, es decir, generar energía eléctrica al frenar.

- **Máquina de Inducción:** También llamadas asincrónicas trifásicas, son máquinas en las que circula corriente alterna en el estator, que está enrollado de forma trifásica de dos o más polos. Y en el rotor, que está enrollado sin alimentación propia y puede ser del tipo bobinado o del tipo jaula de ardilla. En la actualidad son las máquinas eléctricas de mayor aplicación industrial, principalmente, los motores de rotor tipo jaula de ardilla.

Su operación usual es como motor que se utiliza para alimentar el enrollado trifásico del estator desde una fuente trifásica para producir un campo magnético rotatorio. Este campo rotatorio induce corrientes en el enrollado cortocircuitado del rotor produciéndose así un torque motriz en el eje de la máquina, es decir, funciona como motor eléctrico para entregar potencia mecánica a través de su eje. Además, opera como generador eléctrico, sobre todo en la generación eólica.

- **Máquina Sincrónica:** Máquinas de corriente alterna que se caracterizan por tener una velocidad del eje dependiente directamente con la frecuencia de las variables eléctricas. Pueden ser monofásicas o polifásicas, siendo preferentemente trifásicas. Se denominan sincrónicas por que operan en sincronismo con la red.

En su aplicación, estas máquinas se utilizan mayormente en alta potencia, particularmente como generadores, ya sea, a bajas revoluciones en centrales hidroeléctricas, o bien a altas revoluciones en turbinas de vapor o gas. Siendo usadas como generadores en todo tipo de central, debido a que cuando están conectada a la red, la velocidad de su eje depende directamente de la frecuencia de las variables eléctricas (voltaje y corriente) y del número de polos. Mientras que, en la operación como generador aislado de la red, la frecuencia de las corrientes generadas depende directamente de la velocidad mecánica del eje.

Además de lo anterior, se diferencian con las máquinas de inducción debido a que, si bien en estas máquinas el estator se encuentra alimentado por corriente alterna, el rotor tiene alimentación continua, ya sea, a través de un enrollado de campo o mediante imanes permanentes.

Para este trabajo, es importante mencionar que dentro de los generadores sincrónicos se encuentran los generadores de imanes permanentes. Estos generadores son conocidos por la sigla en inglés PMG ("*Permanent Magnet generator*"), se denominan de tal forma producto de que se les ha sustituido el embobinado de excitación (común para el rotor) por un arreglo de imanes permanentes que aplican un campo de excitación constante.

El funcionamiento de este tipo de generadores es bastante distinto de uno sincrónico, ya que, en un generador con bobinas se puede controlar la tensión mediante la excitación, mientras que en este tipo la excitación es constante, por lo que al cargar el generador cae la tensión sin opción de regulación. Pero su ventaja es que al eliminar la excitación, se puede ahorrar un 20 % de energía por utilizar imanes [1].

Es de importancia lo anterior, debido a que la microcentral hidráulica a implementar posee un generador eléctrico tipo imanes permanentes, dónde sus características se observan en el Anexo A.

1.6.3. Ecuaciones de interés

Para cuantificar la potencia eléctrica que produce el generador, se tiene una potencia de diseño, denominada de placa, y potencia eléctrica que entrega el generador, la cual depende de la potencia mecánica que la turbina hidráulica transmita por el eje al generador. Ambas se observan como sigue:

Potencia eléctrica que entrega el generador (P_{el}):

$$P_{el} = \eta_{el} \cdot P_T \quad (1.6)$$

Donde:

- P_{el} : Potencia eléctrica del generador [kW].
- P_T : Potencia mecánica de la turbina [kW].
- η_{el} : Rendimiento eléctrico.

Potencia de placa del generador (P_G):

$$P_G = \frac{P_{el}}{\cos(\varphi)} \quad (1.7)$$

Donde:

- P_G : Potencia de placa del generador [kW].
- P_{el} : Potencia eléctrica del generador [kW].
- $\cos(\varphi)$: Factor de potencia.

1.7. Controlador o compensador

1.7.1. Definición

Es el elemento que se dedica a controlar un sistema, es decir, mide el valor de la variable controlada del sistema y aplica una variable manipulada al sistema para corregir o limitar una desviación del valor medido a partir de un valor deseado [11].

A su vez, la variable controlada es la cantidad o condición que se mide y controla; y la variable manipulada es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada.

Mientras que el sistema de control es la interconexión de componentes, que en su conjunto, presentan un comportamiento deseado, asumiendo relaciones de causa-efecto.

1.7.2. Tipos de controlador

Existen varias clasificaciones para los sistemas de control, una de las principales es la de lazo abierto y cerrado, ver figura 1.3:

+Sistemas de Control en Lazo Abierto: Son los sistemas en los cuales la salida no afecta la acción de control, es decir, no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada de referencia, por ende, a cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija, dependiendo la precisión del sistema de su calibración. Ya que, ante perturbaciones, señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida del sistema, un sistema de control en lazo abierto no realiza la tarea deseada.

Por ello, en la realidad, el control en lazo abierto sólo se usa si se conoce la relación entre la entrada y la salida y si no hay perturbaciones internas ni externas, al igual que en sistemas de control que opere con una base de tiempo [11].

+Sistema de Control en Lazo Cerrado: También denominado sistema de control realimentado, es un sistema que mantiene una relación prescrita entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control, para ello utiliza un controlador pues se realiza una acción de control realimentado para reducir el error del sistema.

En la práctica, en un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (que puede ser la señal de salida misma o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales), a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente o tolerable [11].

Además, cabe destacar que los controladores utilizados en forma industrial son, generalmente, los controladores proporcional (P), proporcional integral (PI) y el proporcional integral derivativo (PID). Dónde, si bien, todos buscan reducir el error, el proporcional (P) lo hace a través de la multiplicación del error, actuando en tiempo presente, el integral (I) utiliza la integral del tiempo de la señal, por lo que actúa viendo el pasado de la señal de salida, y el derivativo (D) usa la derivada del tiempo de la señal, actuando prediciendo el futuro de la señal de salida.

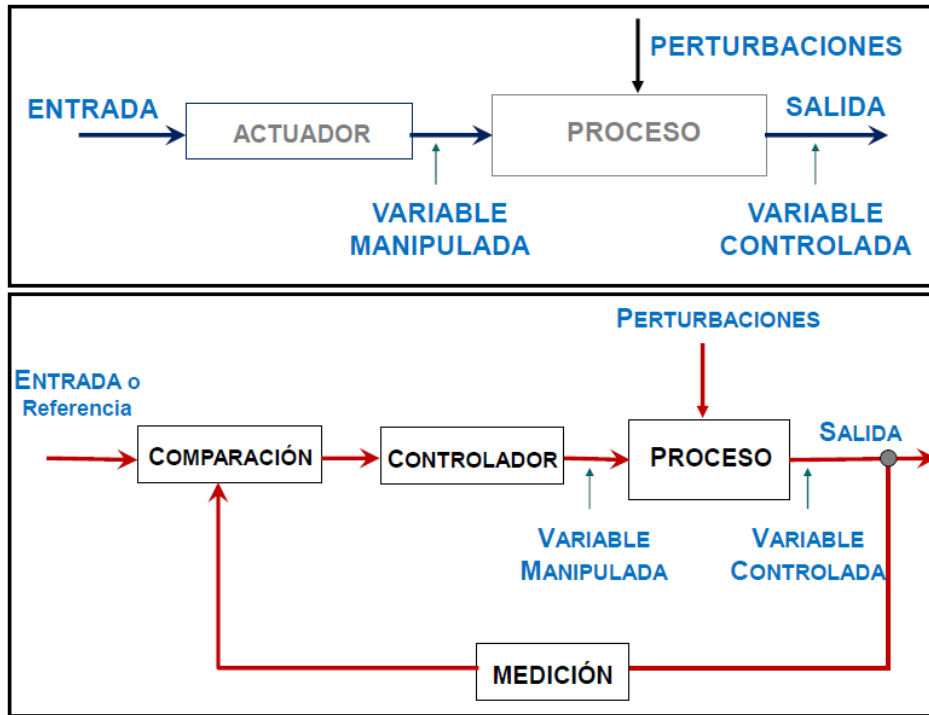


Figura 1.3: Sistema en lazo abierto (superior) y en lazo cerrado (inferior) [3].

1.7.3. Ecuaciones de interés

Para este trabajo, son de interés las representaciones matemáticas de los controladores tradicionales de lazo cerrado. Tomando en cuenta la figura 1.4, se tienen las siguientes ecuaciones:

- Controlador proporcional (P):

$$u(s) = K_p \cdot e(s) \quad (1.8)$$

- Controlador integral (I):

$$u(s) = \frac{e(s)}{T_i \cdot s} \quad (1.9)$$

- Controlador derivativo (D):

$$u(s) = T_d \cdot s \cdot e(s) \quad (1.10)$$

Donde:

- $x(s)$: Función de entrada del sistema.
- $y(s)$: Función de salida del sistema.
- $G(s)$: Función del controlador.
- Planta: Sistema al cual se le está aplicando control.
- $u(s)$: Función de salida del controlador.
- $e(s)$: Función error entre entrada de referencia y salida.
- K_p : Ganancia de controlador proporcional.
- T_i : Constante de tiempo del controlador integral.
- T_d : Constante de tiempo del controlador derivativo.

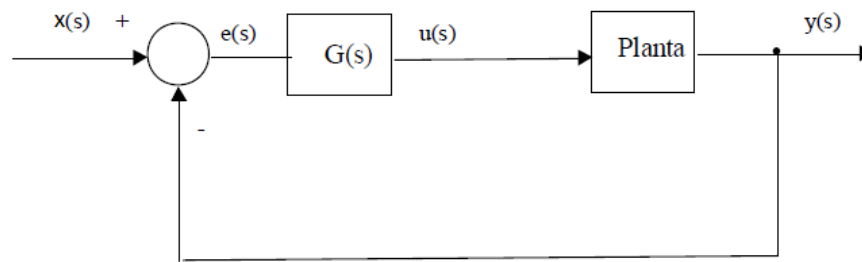


Figura 1.4: Sistema de control en lazo cerrado general [3].

Cabe destacar que al tener controladores mezclados entre sí, como PI o PID, se suman las ecuaciones de cada uno para modelar el sistema de control.

1.7.4. Métodos de sincronización

La mayoría de los controladores industriales que se usan hoy en día utilizan esquemas de control proporcional, integral y derivativo, pues, estos controladores ,en conjunto, aportan un control satisfactorio en la mayoría de los sistemas de control.

Pero existe la dificultad de obtener sus constantes de tiempo y ganancias para cada sistema distinto. Para esto, se utilizan métodos de sincronización, algunos de los más importantes son los siguientes:

- Límite de estabilidad Ziegler & Nichols.
- Curva de reacción Ziegler & Nichols.
- Criterio de López
- Control por Modelo Interno (IMC)

De estos métodos de sincronización en este trabajo se utilizará el primero, el límite de estabilidad Ziegler & Nichols para poder sincronizar los valores del control electrónico propuesto como solución.

1.7.5. Límite de estabilidad Zigler & Nichols

Este método, como el de curva de reacción, ambos de Ziegler - Nichols, proponen encontrar los parámetros de un controlador proporcional, integral y derivativo, en base a cada modelo específico de planta. Es decir, se sincroniza el controlador de acuerdo a cada planta.

Para realizar el método de sincronización de límite de estabilidad Zigler & Nichols, se debe hacer lo que sigue:

1. Utilizando sólo control proporcional, y comenzando con un valor pequeño, se debe incrementar la ganancia hasta que el sistema comience a oscilar llegando al límite de estabilidad.
2. Al momento de llegar al límite de estabilidad, se debe registrar la ganancia crítica y el período de oscilación de la salida del controlador, K_c y P_c respectivamente.
3. Posteriormente, se deben ajustar los parámetros del controlador según la figura 1.5.
4. Una vez ajustados los parámetros del controlador, se deben probar y comenzar a variar unas décimas de estos, para disminuir el error del sistema. Este punto depende de la planta del sistema y la precisión a la que se desea controlar.

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.50K_c$	∞	0
PI	$0.45K_c$	$P_c/1.2$	0
PID	$0.60K_c$	$0.5P_c$	$P_c/8$

Figura 1.5: Tabla para ajustar parámetros de controlador PID con método de límite de estabilidad [14].

Cabe destacar que para resolver analíticamente este problema, se pueden encontrar K_c y P_c a través del método Ruth - Hurwitz.

1.8. Servomotor

1.8.1. Definición

Para el término servomotor existen varias definiciones, una de ellas es la definición que realiza la NEMA (Asociación Nacional de Manufactureros Eléctricos de EUA), la cual es: “Motor electrónico que emplea retroalimentación y tiene el propósito de producir potencia mecánica para realizar el movimiento deseado de un servomecanismo”.

Para este trabajo, se considera al servomotor como un dispositivo que se emplea como motor eléctrico, al cual se le puede controlar tanto su velocidad de operación como su posición, y mantenerse en rango de operación y estable, con el fin de producir potencia mecánica, y así, realizar un movimiento requerido por un sistema [6].

Su método de funcionamiento es a través de un controlador, el cual se comunica directamente con el servodrives con el fin de controlar y gobernar al servomotor en los estados de operación requeridos. Cabe mencionar que el servodrives es un dispositivo electrónico que entrega energía eléctrica para hacer funcionar al servomotor en sus rangos de operación.

A fin de cuentas, para este trabajo de tesis, el servomotor es un actuador que va a ser utilizado para controlar el caudal de entrada de la microturbina.

1.8.2. Ecuaciones de interés

Para poder seleccionar el servomotor requerido en este trabajo, se debe obtener la velocidad, torque y potencia que se requiere. Para el torque se van a utilizar mediciones con un torquímetro, las cuales se explican en detalle en la sección metodología, mientras que para la velocidad y la potencia se usan las ecuaciones siguientes:

Velocidad de servomotor (ω_s):

$$\omega_s = \frac{\#vuelatas \cdot 60}{\tau_s} \quad (1.11)$$

Donde:

- ω_s : Velocidad de rotación del servomotor [RPM].
- τ_s : Constante de tiempo del servomotor [s].
- #vuelatas: N° de vueltas requeridas en total para el servomotor.

Antes de proseguir, se debe mencionar que la constante de tiempo de servomotor (τ_s), es el tiempo total que se demora el servomotor en realizar el número total de vueltas requeridas. Estas últimas se calculan como sigue:

Número de vueltas:

$$\#vueltas = \frac{l_{hilo}}{p} \quad (1.12)$$

Donde:

- #vueltas: N° de vueltas requeridas en total para el servomotor.
- l_{hilo} : Largo del hilo del inyector [mm].
- p : Paso del hilo del inyector [mm].

Potencia de servomotor (P_s):

$$P_s = \frac{\omega_s \cdot T_s \cdot 2 \cdot \pi}{60} \quad (1.13)$$

Donde:

- P_s : Potencia del servomotor [W].
- ω_s : Velocidad de rotación del servomotor [RPM].
- T_s : Torque del servomotor [J].

Además, se debe considerar que en el caso de utilizar caja de reducción de velocidad de los servomotores comerciales, se requiere cuantificar el torque y la velocidad del conjunto. Por esto, se muestran la siguientes ecuaciones:

Torque del conjunto servomotor - caja de reducción (T_{s-cr}):

$$T_{s-cr} = T_s \cdot C_{cr} \quad (1.14)$$

Donde:

- T_{s-cr} : Torque del conjunto servomotor - caja de reducción [J].
- T_s : Torque del servomotor [J].
- C_{cr} : Coeficiente de reducción, es comercial.

Velocidad de rotación del conjunto servomotor - caja de reducción (ω_{s-cr}):

$$\omega_{s-cr} = \frac{\omega_s}{C_{cr}} \quad (1.15)$$

Donde:

- ω_{s-cr} : Velocidad de rotación del conjunto servomotor - caja de reducción [RPM].
- ω_s : Velocidad de rotación del servomotor [RPM].
- C_{cr} : Coeficiente de reducción, es comercial.

1.9. Discusión bibliográfica

Para cumplir los objetivos expuestos en la introducción, se ha tomado conocimiento de dos trabajos y tres investigaciones que entregan posibles soluciones a considerar.

1.9.1. Propuestas de solución

El primer trabajo es el "Automatización de una turbina pelton"[17], que en primera instancia obtiene distintos antecedentes, luego trata sobre la historia de automatización de turbinas tipo Pelton, el funcionamiento del inyector y sus componentes, además de, distintas maneras de abordar el trabajo a través de investigaciones, artículos y memorias, para luego establecer una solución posible, la cual, es utilizar un sistema que controla el movimiento del inyector, que se muestra en la figura 1.6.

La solución propuesta consta de un servomotor montado en la aguja del inyector, un grupo de engranajes a definir según un análisis de eficiencia de velocidad y resistencia para entregar un torque de 14-28,1 [Nm] a la válvula, un arduino que controle el servomotor a través de algoritmos, una fuente de energía para el servomotor, asegurando su correcto funcionamiento, y varios conmutadores de posición con el fin de delimitar el movimiento máximo del servomotor, conectado a su vez al mismo arduino utilizado como controlador [17].

Por otro lado, el segundo trabajo, que es "Control electrónico de una central micro - hidráulica para su aplicación en generación distribuida"[10], es una solución e implementación distinta a la propuesta anterior. En primer lugar contextualiza y desarrolla en profundidad una investigación sobre las microcentrales hidráulicas y sus componentes, luego muestra el control, mostrando los modos de operación, estados y sincronización del sistema, actuadores, monitores y protecciones.

Posteriormente, se define e implementa la solución, la cual se basa en controlar mediante un PIC18F252 la microcentral, y utilizar microcontroladores para desarrollar algoritmos y mediciones, PIC11BF452 y PIC11BF252, respectivamente. Este control trata de analizar los modos de operación de la central y realiza control sobre el generador principalmente, a través de rectificadores, mientras que el control del inyector lo utiliza para obtener potencia máxima deseada dependiendo del estado del sistema [10]. La solución se observa en la figura 1.7 de a continuación.

1.9.2. Investigaciones

Además, de los trabajos explicados anteriormente, se estudian soluciones factibles implementadas y/o probadas, que resuelven el problema mediante la variación de caudal por el movimiento del inyector de microcentrales hidráulicas, cumpliendo los mismos requerimientos que los necesarios para este trabajo. Estas soluciones son plasmadas en tres investigaciones de a continuación.

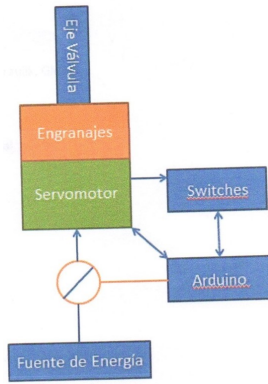


Figura 1.6: Diagrama de solución de control de Benjamín Vergara [17].

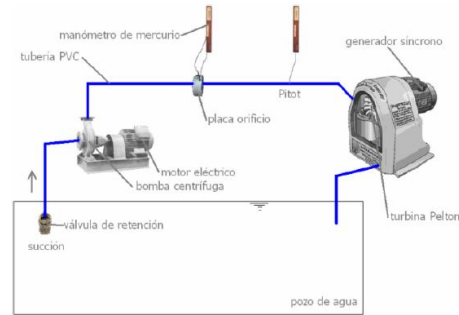


Figura 1.7: Diagrama de solución de una microcentral hidráulica de Patricio Mendoza [10].

La primera investigación plantea varios modelos para analizar el control de turbinas hidráulicas, siendo el de mayor relevancia, el modelo lineal de control de hidroturbinas de suministro aislado de carga. Este modelo considera un inyector o compuerta con tamaño fijo y no realiza supuestos de columnas de agua inelásticas. A su vez, contiene como entradas la velocidad y las cargas eléctricas, y como salida la velocidad de la central que se puede convertir a frecuencia en Hz [12]. Su diagrama de bloques es como sigue en la figura 1.8.

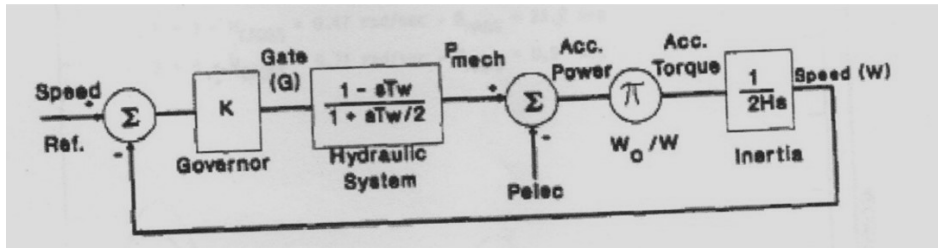


Figura 1.8: Diagrama de bloques de modelo lineal de control de turbinas hidráulicas con suministro aislado de carga [12].

La segunda investigación propone utilizar un servomotor como gobernador y controlarlo por un PI mediante tres algoritmos [9]:

- Red neuronal: Adapta los gradientes a algoritmos, específicamente al LMS.
- Algoritmo nLMS: Ve la entrada. Es utilizado para adaptar la ganancia a un valor óptimo, resultando una rápida y estable convergencia.
- Algoritmo FTF: Herramienta de señales para procesarlas, aplicado a control.

Considerando las ganancias del servomotor y un PI, se tienen las ecuaciones 1.16 y 1.17, respectivamente, que consideran a T_1 y T_2 como el tiempo de respuesta mecánica y eléctrica, ambos en [s], a K_{pl} constante de proporcionalidad y a K_i constante de integración.

$$G(s) = \frac{1}{(a + sT_1)} \frac{1}{(a + sT_2)} \quad (1.16)$$

$$G(s) = K_{pl} + \frac{K_i}{s} \quad (1.17)$$

Posteriormente de la obtención de resultados, se concluye que su solución estabiliza el sistema en 70 [s], pudiendo mantenerlo a una frecuencia de 60 [Hz] y potencia de 0.03 [MW], sólo por el PI. Por lo tanto, se sugiere un servomotor eléctrico con un nuevo esquema de control, uno lineal que incorpora un controlador PI suavizado con factores de peso en las constantes y otro no lineal, para disminuir el tiempo de estabilización [9].

La última investigación realizada muestra de forma general el potencial que se espera de la energía minihidro, el desarrollo de las centrales minihidráulicas, los tipos de generadores de inducción, distintos métodos y gobernadores de control, además de, un análisis técnico y económico.

Específicamente, cuando habla de los métodos de control, se analizan varios. El de mayor relevancia es el que resuelve el problema controlando tanto la turbina como el generador de forma separada, ya que, al controlarlos juntos es una solución tipo [10].

Entonces, la solución que controla la turbina y el generador de forma separada, propone un gobernador que controle la potencia de la central, a través del control de caudal de una turbina hidráulica, pero controlando la frecuencia y el voltaje por un generador de inducción, es decir, controla la potencia en primera instancia al botar el exceso de potencia del generador y luego controla el caudal de la turbina, ver esquema 1.9.

A su vez, considera un PI detallista (FGPI) que asume un cambio continuo de cargas del sistema como controlador, ya que, el PID demora 200 segundos en estabilizar la frecuencia [7].

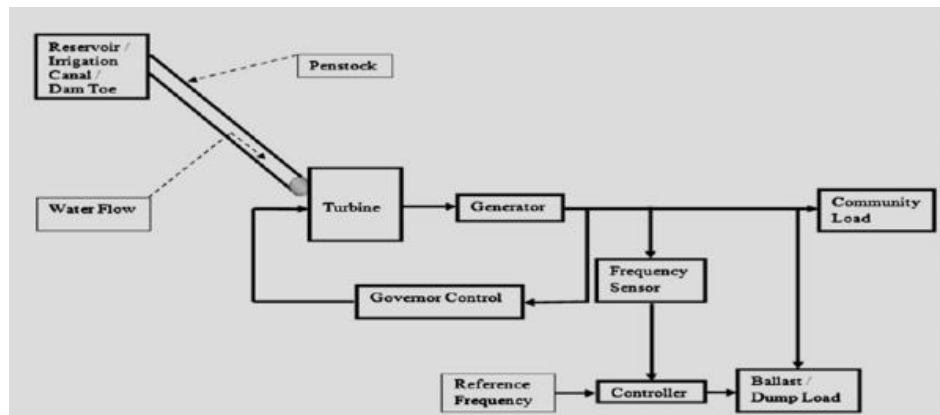


Figura 1.9: Diagrama de central minihidro con carga variable [7].

1.9.3. Comparación

Ante lo expuesto anteriormente, se decide tomar el camino del primer trabajo [17], debido a que contiene la lógica de controlar la potencia de una microcentral a través del caudal al variar la carga, utilizando el movimiento de la aguja del inyector. A su vez, y en conjunto con la última investigación [7], se toma en consideración su diagrama de control con modificaciones para evitar la inestabilidad del sistema.

Además, se van a evaluar los distintos modelos de controladores expuestos en las investigaciones [9], [7] y [12], a través de un modelo a proponer, que va a ser el modelo [12] con algunas modificaciones de acuerdo a las condiciones del sistema.

A su vez, para la construcción del laboratorio, se toma en consideración el diagrama del segundo trabajo realizado [10], pues obtuvo buenos resultados al momento de operar la microcentral hidráulica.

No obstante, se debe tener en consideración que la solución de control de potencia de mayor recurrencia en las investigaciones es controlar la potencia eléctrica del generador a través de inversores y bancos de control, entre otros componentes, debido al gran gasto económico que el control de potencia mediante caudal requiere, en comparación con el control por medio de componentes eléctricos para microcentrales hidráulicas.

Sin embargo, como controlar el generador deja de lado el movimiento del inyector, tal solución no es de interés, ya que, es un gran beneficio académico controlar la potencia de la microcentral a través del control de su caudal.

Por lo tanto, a continuación se procede a explicar el problema a resolver.

1.10. Problema a resolver

Para cumplir los objetivos de este trabajo, se busca controlar una microcentral hidráulica con equipos principales adquiridos y el montaje del sistema de control que responda a dos experiencias de mejora del laboratorio de turbomáquinas hidráulicas del Departamento de Ingeniería Civil Mecánica de la Universidad de Chile.

Los equipos principales son los siguientes:

- Microturbina Pelton de 10 [kW] de potencia, 40 [m] de altura neta y 35 [$\frac{1}{s}$] de caudal nominal.
- Generador síncrono de imanes permanentes de 10 [kW] de potencia, 750 [RPM] de velocidad de rotación nominal, 900 [RPM] de velocidad máxima y 8 polos.
- Inyector donde su eje desplaza a su aguja asociada, moviéndola entre 16 a 44 [mm] requiriendo un torque que fluctúa entre 14,0 a 28,1 [Nm] [1], con mediciones a corroborar.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, ningún trabajo revisado se ha propuesto controlar electrónicamente una microturbina hidráulica para generación de electricidad a 220 [V] y 50 [Hz] con una reacción a la variación de carga cercana a 1 [s], y teniendo un tiempo máximo de recorrido de la aguja del inyector de 10 [s]. Ni tampoco, se menciona un control cuando se busca caracterizar el funcionamiento de una microturbina hidráulica.

Por lo tanto, en este trabajo se desea aplicar una solución de control a una microcentral hidráulica para dos (2) experiencias a realizar en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Civil Mecánica de la Universidad de Chile, considerando un sistema de seguridad anti embalamiento.

Estas experiencias son:

1. Control automático de una microcentral hidráulica a través del control del caudal, mediante el movimiento del inyector, a voltaje y frecuencia constante, y cargas eléctricas variables.

Entonces, la potencia real que se va a controlar, que depende de las ecuaciones de interés mostradas anteriormente, es la siguiente:

Potencia eléctrica real del sistema ($P(t)$), con ϕ ángulo de desfase:

$$P_{el} = P(t) = VI[\cos(\phi) - \cos(2\omega_e t + \phi)] = \frac{V^2}{\sum R} [\cos(\phi) - \cos(2\omega_e t + \phi)] \quad (1.18)$$

Donde:

- $P(t)$: Potencia eléctrica real del sistema [W]. Es equivalente a la potencia que entrega el generador.
- V : Voltaje [V].
- I : Intensidad [A].
- ω_e : Frecuencia eléctrica [Hz].
- t : Tiempo [s].
- R : Resistencia eléctrica [Ω].

Cabe destacar que se mide la potencia activa por el multímetro, la cual equivale a:

$$VI\cos(\phi) = \frac{V^2}{\sum R} \cos(\phi)$$

2. Caracterización del funcionamiento de una microturbina hidráulica tipo Pelton. En esta experiencia, se controla el caudal que ingresa a la microturbina digitando en un computador la posición del servomotor, es decir, es un control semi-manual.

Además, cabe recalcar que el sistema de seguridad debe actuar cuando se alcance una velocidad de rotación de 850 [RPM], generando una disminución de la velocidad del conjunto microturbina - generador, de la la microcentral hidráulica. Ello con el fin de contrarrestar el embalamiento de tal conjunto.

Capítulo 2

Metodología

Este trabajo es de tipo cualitativo y exploratorio, siendo el tema principal controlar parámetros de una microcentral hidráulica y de la microturbina asociada a esta. Esto se debe a que, simplemente, se busca una solución propuesta para las oportunidades presentadas anteriormente, las cuales son: entregar energía eléctrica a través de una microcentral hidráulica a casas en zonas aisladas y generar conocimiento sobre la operación de una microturbina hidráulica. Lo principal es que la solución sea funcional y simple de realizar, y no se va a caracterizar la microcentral ni la microturbina, si no que solo se desea generar un controlador electrónico como solución de las experiencias dichas anteriormente.

Sumado a lo anterior, cabe mencionar que el estudio es experimental porque se hacen mediciones de torque para corroborar el valor definido anteriormente por Juan Carlos Arís [1] para poder girar el eje del inyector, ver anexo C. Además, en este estudio se verifica el funcionamiento del sistema de control propuesto al momento de variar la carga de la microcentral con voltaje a 220 [V] y frecuencia a 50 [Hz] constantes, al igual que, al momento de modificar algunos parámetros y así caracterizar la operación de la microturbina hidráulica asociada, manteniendo el voltaje y la frecuencia variables.

Por lo tanto, se deben hacer mediciones para corroborar valores definidos por trabajos anteriores, y la solución de este trabajo debe ser funcional en dos modos de operación distintos para las diferentes experiencias que se traducen en las oportunidades nombradas previamente.

Para poder realizar las distintas etapas mencionadas en los párrafos anteriores, se van a ejercer distintos pasos para poder confluir en una solución final, simple y funcional. El primero de estos pasos es revisar papers, investigaciones anteriores y memorias realizadas, para encontrar y analizar distintas y variadas soluciones.

Posterior al periodo de investigación, se propone una solución, la cual, debe ser avalada por el profesor guía y co-guía mediante reuniones de trabajo. Esta proposición debe ser la solución principal y tiene que resolver la implementación del sistema de control electrónico de la microcentral hidráulica para generar energía eléctrica a 220 [V] y 50 [Hz]. Lo anterior se produce por ser la solución de mayor dificultad al ser de lazo cerrado.

Luego de obtener una propuesta de solución, se realiza un modelo de ella. Donde se muestra el comportamiento de la frecuencia eléctrica a la que oscila la potencia eléctrica producida por la microcentral hidráulica. Para ello se utiliza el programa Matlab. Seguidamente, se pasa a realizar simulaciones de éste usando Simulink. Es importante mencionar que para generar el modelo se utilizan las siguientes ecuaciones, de acuerdo con [12] y [18]:

Velocidad angular del conjunto turbina-generator:

$$\omega = \frac{120 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}{\#\text{polos} \cdot 60} \quad (2.1)$$

Donde:

- f : Frecuencia eléctrica entregada por el generador, en [Hz]. Se requiere que sea 50 [Hz].
- ω : Velocidad angular del conjunto turbina-generator, en $[\frac{\text{rad}}{\text{s}}]$. Para obtener 50 [Hz], debe ser 78,54 $[\frac{\text{rad}}{\text{s}}]$.

Tiempo de constante del agua:

$$T_w = \frac{L \cdot q_{\text{base}}}{A \cdot g \cdot h_{\text{base}}} \quad (2.2)$$

Donde:

- T_w : Constante de tiempo del agua, en específico, es el tiempo que demora el caudal en llegar a la apertura de la aguja del inyector y generar que la turbina se mueva, en [s].
- L : Largo de las tuberías, desde la salida de la bomba al inyector, en [m]. Se supone entre 15 a 20 [m], asumiéndose 17 [m] de largo para los cálculos.
- A : Área de la sección interior de las tuberías, en $[\text{m}^2]$. Sabiendo que son 6 [in] de diámetro, el área es 0,01824 $[\text{m}^2]$.
- g : Constante de gravedad, en $[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}]$. Su valor es 9,81 $[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}]$.
- q_{base} : Caudal base para obtener la potencia nominal de 9,6 [kW], en $[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}]$. Su valor es 0,035 $[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}]$.
- h_{base} : Altura base para obtener la potencia nominal de 9,6 [kW], en [m]. Su valor es 40 [m].

Ecuación de modelo de inercia del conjunto turbina-generator:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{(P_e - P_m)}{2H} \quad (2.3)$$

Donde:

- P_m : Potencia mecánica generada por la turbina, cambiante en el tiempo, en [kW].
- P_e : Potencia eléctrica que produce el generador, cambiante en el tiempo, en [kVA].
- H : Constante de tiempo del momento de inercia del conjunto turbina-generator, en [s].

Constante de tiempo del momento de inercia del conjunto turbina-generator:

$$H = \frac{J}{2P_e} \omega_{ref}^2 \quad (2.4)$$

Donde:

- J : Constante de inercia de la turbina y generador, en [kg m²]. La turbina se asemeja a un anillo con placas rectangulares unidas de un lado a él, y el generador se asemeja a un cilindro sólido.

- ω_{ref} : Velocidad angular de referencia del conjunto turbina-generator, en [$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$]. Equivale a 78,54 [$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$].

Potencia eléctrica:

$$P_e = \sqrt{3}VI \cos(\phi) \quad (2.5)$$

Donde:

- V : Voltaje del generador, en [V]. Generador trifásico, entonces posee 380 [V].
- I : Corriente del generador, fluctúa en el tiempo, en [A].

Además, se poseen las siguientes condiciones iniciales para el funcionamiento del modelo:

- Potencia eléctrica es 0, no se solicita una potencia eléctrica inicial.
- H varía dependiendo de la turbina a usar, aluminio o acero, por lo tanto, el modelo varía según el material utilizado.
- T_w se conoce, siendo de 0,08312 [s]. Se mantiene sin variar al cambiar el material de la turbina. Pero inicialmente es 0 producto de que no hay caudal inicial en las tuberías, lo que genera una velocidad de referencia de 0 inicialmente.
- Potencia mecánica inicial es cercana a cero, depende de la constante de inercia, por ende, cambia según el material. Se obtiene con una operatoria de bloques, y utilizando el teorema de valor final a entrada escalón.
- Existe un umbral de velocidad de rotación que el sistema debe superar, que se produce al cambiar el estado de inercia del sistema de estático a móvil. Este umbral es de -10^{-5} [$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$].

Después de realizar las simulaciones, se recopilan los datos en gráficos de Matlab y en algunas tablas de Excel, ello con el fin de analizar la tolerancia del sistema, que debe ser a lo más de un 3 % de margen de los 50 [Hz] de frecuencia. Para este trabajo se asume de 2 %, para obtener una mayor precisión. Además, se analizan los tiempos de reacción y la diferenciación de los materiales de construcción de los álabes de la microturbina hidráulica, que son aluminio o acero. Cabe destacar que, los datos obtenidos y su posterior análisis deben ser observados en profundidad en conjunto con los profesores guía y co-guía para evitar errores en etapas posteriores, al implementar la solución.

Luego, tomando como pilar fundamental la solución propuesta para la experiencia n°1, se propone y selecciona un sistema de control para la experiencia n°2, y a su vez, un sistema de seguridad. Tal solución corrige las distintas acciones para que sea aplicado al momento en que se desee caracterizar el funcionamiento de la microturbina asociada a la microcentral hidráulica, cambiando a ser una solución de lazo cerrado a una de lazo abierto, en forma semi manual. Estos cambios se realizan en conjunto con el profesor guía, estudiantes y expertos que han apoyado el desarrollo del laboratorio a construir, por medio de reuniones y/o correos electrónicos.

Posteriormente de la etapa de diseño, se pasa a la etapa de implementación, donde se va a montar el sistema de control electrónico para una microcentral hidráulica que genera potencia eléctrica a 220 [V] y 50 [Hz] constantes, y el sistema para caracterizar el funcionamiento de su microturbina asociada, a voltaje y frecuencia variable. En esta etapa, en primera instancia se realizan diagramas P&ID de las dos experiencias, ver Anexo B, con el fin de observar diferencias y analizar la factibilidad y operación de las soluciones.

Además, es de utilidad para tomar conocimiento de los elementos que se necesitan comprar realizar un listado de elementos, teniendo entre ellos materiales, instrumentos y válvulas. Este listado, mostrado en la sección 3.2.2 de nombre "Elementos requeridos y plano de funcionamiento", se realiza antes del P&ID mencionado, y a su vez, sirve para analizar las posibles complicaciones en la adquisición de los distintos elementos requeridos, las cuales son sobrepasar montos de factura exigidos a la Universidad o problemas, o atrasos de los proveedores, e incluso, problemas con montar el laboratorio debido a la lentitud o el atraso de la tesorería de la universidad en la aprobación de los montos de dinero obtenidos para pagar los distintos elementos que se necesitan.

Una vez tomado conocimiento de todos los elementos que se requieren, a través del listado de elementos y del P&ID, se deben empezar a cotizar, siendo esencial realizar pruebas de medición para tener la total seguridad de que los datos que se conocen, a través de [1], son datos reales. Además, para evitar el sobredimensionamiento o que exista alguna distorsión o error en tales datos, lo que puede generar sobrecostos o mayores complejidades en la elección de los modelos de los elementos, incluso, entorpeciendo aumentando la dificultad a las soluciones ya definidas.

Por lo tanto, para las pruebas de medición, se mide el paso, el diámetro y la longitud del hilo del eje del inyector, al igual que pruebas de torque, para obtener mediante una medición exhaustiva, los valores reales en distintos ángulos para poder girar el eje del inyector, tomando en consideración el roce u otros efectos que se contrapongan a su movimiento. Para tales pruebas de medición, se utilizan elementos de diseño y constructibilidad como son el pie de metro, huincha de medir y torquímetro de reloj.

Posteriormente, y en específico, respecto al torque, se utilizan distintas referencias para tener coeficientes de seguridad necesarios para dimensionar de forma correcta el servomotor, pues el torque medido fue sin agua y se va a utilizar la microcentral con agua. Por ende, y bajo el criterio de que la microcentral pueda autoabastecerse, se busca un servomotor de 200 W requeridos, de bajas rpm pero que alcance a estabilizar en menos de 10 [s] el inicio de operación, para luego en menos de 1 [s] mantener estable la frecuencia en 50 [Hz] o dentro de la tolerancia asumida, y a su vez, logre girar el eje del inyector con agua según el torque, nominal y máximo requerido.

Además, de las pruebas sin agua, se establece que se va a utilizar el torque máximo en cada giro con agua, por lo tanto, con un torque de 8 [Nm] se podría girar sin problemas, ya que, se desprecia el torque generado en forma horizontal por el agua, excepto la fuerza que se ejerce en el punto máximo de la aguja a un brazo de 16 mm, de acuerdo a [1].

Cabe destacar que el detalle de las pruebas de torque se observan en el Anexo C; y que todas las mediciones y cálculos teóricos se muestran en el Anexo D.

De acuerdo a las distintas reuniones de trabajo, al modelo y mediciones realizadas, se establece que los elementos a cotizar son factibles de utilizar en la solución propuesta, pues son simples y funcionales en el conjunto de la implementación.

Más tarde, se cotizan los distintos elementos y se empiezan a realizar los trámites para su adquisición siendo avalados por los profesores guía y co-guía en distintas reuniones. Una vez obtenidos tales elementos, se empieza su montaje, siendo requerida la construcción del laboratorio donde se implementa la microcentral hidráulica.

Se destaca que, a pesar de estar fuera de los alcances de ese trabajo, se apoya la construcción de la parte mecánica y se realiza de forma completa la de la parte eléctrica, con el fin de facilitar y apresurar la finalización de este hito.

Por otro lado, el experto en LabVIEW, en conjunto con el estudiante responsable de este trabajo, comienzan a generar las distintas visualizaciones para que el computador muestre las mediciones requeridas como voltaje, frecuencia y velocidad.

Además, de que a través del computador se puedan variar y controlar los parámetros requeridos, se puedan adquirir los distintos datos a través de la tarjeta de adquisición (NI), y se observen los instrumentos como flujómetro, tubo de pitot, torquímetro, tacómetro, voltímetro, amperímetro, frecuencímetro, entre otros, y las válvulas de seguridad antiembalamiento y de regulación del caudal de la bomba.

En específico, el programa en LabView, debe ser capaz de medir los variables de los sistemas y controlar los sistemas de control de las dos (2) experiencias nombradas anteriormente, y el sistema de seguridad. Si bien, sus soluciones se mencionarán más adelante, para el sistema de seguridad es de relevancia saber que se debe regular una válvula de seguridad para controlar el embalamiento del conjunto microturbina - generador, y otra válvula, que regula el caudal de la bomba debido a que se encuentra sobredimensionada.

Esta válvula de control del caudal de la bomba, requiere que la microturbina hidráulica genere electricidad de acuerdo con los requerimientos nominales de funcionamiento o que caracterice su operación, dependiendo de los requerimientos del usuario o investigador. Por ello, se utiliza para entregar condiciones de operación adecuadas a la microcentral hidráulica, según su aplicación.

Luego, y una vez que se haya construido, en el laboratorio de turbomáquinas hidráulicas, la microcentral hidráulica con todos sus componentes, se hayan montado los sistemas de control y de seguridad, y se haya colocado en marcha el laboratorio, se deben realizar pruebas de funcionamiento. Para estas, en un principio se verifica el funcionamiento de las válvulas de seguridad y el sistema de protección, con el fin de no dañar ni las instalaciones ni los elementos principales de la microcentral hidráulica, considerando una primera prueba a la válvula que corrige el sobredimensionamiento de la bomba.

Posteriormente, se realiza la experiencia n°1 sobre generar potencia eléctrica a 50 [Hz] y 220 [V], para ello se verifica el funcionamiento y se obtienen los distintos datos para graficar las curvas de estabilización al momento de conectar y desconectar las cargas al sistema. Luego, se realiza la experiencia n°2, donde se prueba si en forma semiautomática el sistema funciona, siendo solamente descriptivo la obtención de los resultados en este apartado.

Finalmente, se analizan los datos obtenidos, a través de una comparación de gráficos, entre los resultados teóricos y experimentales; y se generan comentarios de mejoras y/o posibles correcciones que tenga el trabajo. Tales comentarios, tienen como objetivo poder realizar una solución con mayor simplicidad o para que se mantenga con un óptimo cuidado en el tiempo. Siendo la funcionalidad de la solución generada lo que principalmente se busca y debe generarse y comentarse.

Capítulo 3

Resultados

Tal como se menciona en el apartado anterior, se van a mostrar las propuestas de solución, tanto para la implementación del sistema de control electrónico de una microcentral hidráulica para generar energía eléctrica a 220 [V] y 50 [Hz], experiencia n°1, como para caracterizar la operación una microturbina hidráulica, experiencia n°2. Siendo considerado un sistema de seguridad antiembalamiento para ambas propuestas.

3.1. Diseño y Modelos

3.1.1. Propuesta de solución de control electrónico para una microcentral hidráulica en generación distribuida

Para la experiencia n°1 sobre control para microcentral hidráulica en generación distribuida a voltaje y frecuencia constante con variación de carga, se tiene que controlar mediante un lazo de control cerrado, el cual se observa en la figura 3.1 de a continuación.

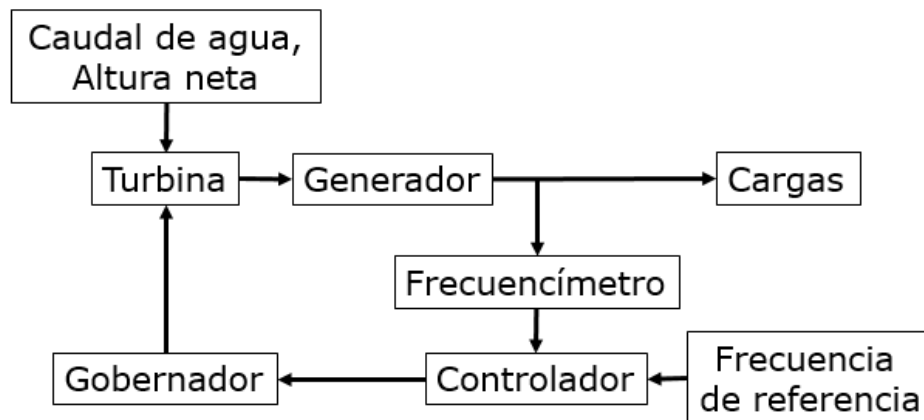


Figura 3.1: Solución propuesta del control de la central microhidráulica con carga variable.

Este diagrama de flujo de lazo cerrado muestra que las variables de entrada para el sistema son el caudal de agua y la altura neta, los cuales son respectivamente $35 \left[\frac{l}{s}\right]$, equivalente a $0,0035 \left[\frac{m^3}{s}\right]$, y $40 [m]$. Estos datos de entrada son la potencia hidráulica del sistema, la cual a través de la microturbina hidráulica, se transforma en potencia mecánica, y luego por el generador, en potencia eléctrica que se disipa en cargas o resistencias eléctricas, siendo equivalente al total de $10 [kW]$ que produce nominalmente la microcentral.

A la potencia eléctrica se le mide su frecuencia, a través de un frecuencímetro, para que así el controlador la compare con la frecuencia de referencia del generador que equivale a $50 [Hz]$ o, a $78,54 \left[\frac{rad}{s}\right]$ de velocidad de rotación de la microturbina hidráulica. Si la frecuencia de salida es de $50 [Hz]$, el sistema se mantiene funcionando sin variación. Pero si la frecuencia medida es menor o mayor a la frecuencia de referencia, $50 [Hz]$, el controlador envía una señal al gobernador, que es un inyector, el cual se encuentra acoplado a un servomotor, que ocasiona que aumente o disminuya el caudal de la microcentral, hasta que la frecuencia eléctrica sea igual a $50 [Hz]$, o se encuentre dentro de la tolerancia asumida de 2% .

Además, para el control del generador se propone utilizar un sistema de protección que consta de un interruptor conectado con las resistencias, de tal forma que la diferencia de voltaje sea $220 [V]$ constantes, considerando que la altura neta de la microturbina hidráulica se encuentre fija en $40 [m.c.a.]$.

3.1.2. Modelo de control electrónico

Siguiendo con las propuestas de solución, como la solución de la experiencia n°1 es la principal del sistema de control, se hace necesario realizar modelos de la solución propuesta, con el fin de tener el respaldo teórico numérico y a su vez el respaldo experimental.

Además, junto con verificar la solución, realizar el modelo de control electrónico es de utilidad para conocer los valores necesarios para poder comprar el servomotor del inyector y para obtener los valores con los que se requiere programar el PID. Todo esto con el fin de obtener una comparación real, acorde a lo requerido para la experiencia °1.

Para la simulación, se utilizan las ecuaciones mencionadas en Metodología, siendo realizada a través del programa Simulink, en Matlab.

Como resultado de la modelación, se realizan dos simulaciones, uno para la microturbina de duraluminio y otro para la microturbina de acero, con el fin de elegir el material con el que se fabrica la microturbina hidráulica.

Como entrada de la simulación se utilizan dos, ambas tipo escalón de velocidad de referencia ($78,54 \left[\frac{rad}{s}\right]$, o su equivalente, $50 [Hz]$) y de corriente eléctrica (para inducir variaciones hasta obtener la potencia total en un tiempo determinado). Mientras, para la salida se considera la velocidad de rotación que induce la frecuencia eléctrica de la microcentral hidráulica en Hz.

Gráficamente, las entradas son como sigue:

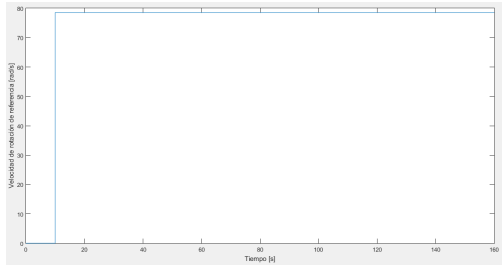


Figura 3.2: Entrada escalón de velocidad de rotación de referencia 78,54 $\frac{rad}{s}$.

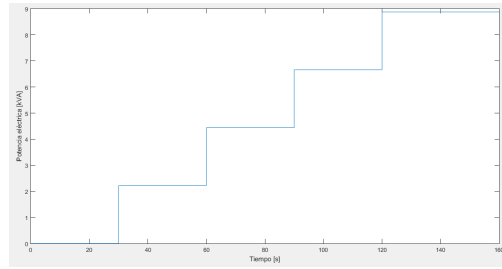


Figura 3.3: Entrada escalón de variación de potencia eléctrica solicitada, cada 2,22 [kVA] aproximadamente.

El modelo utilizando de material duraluminio, se muestra a continuación:

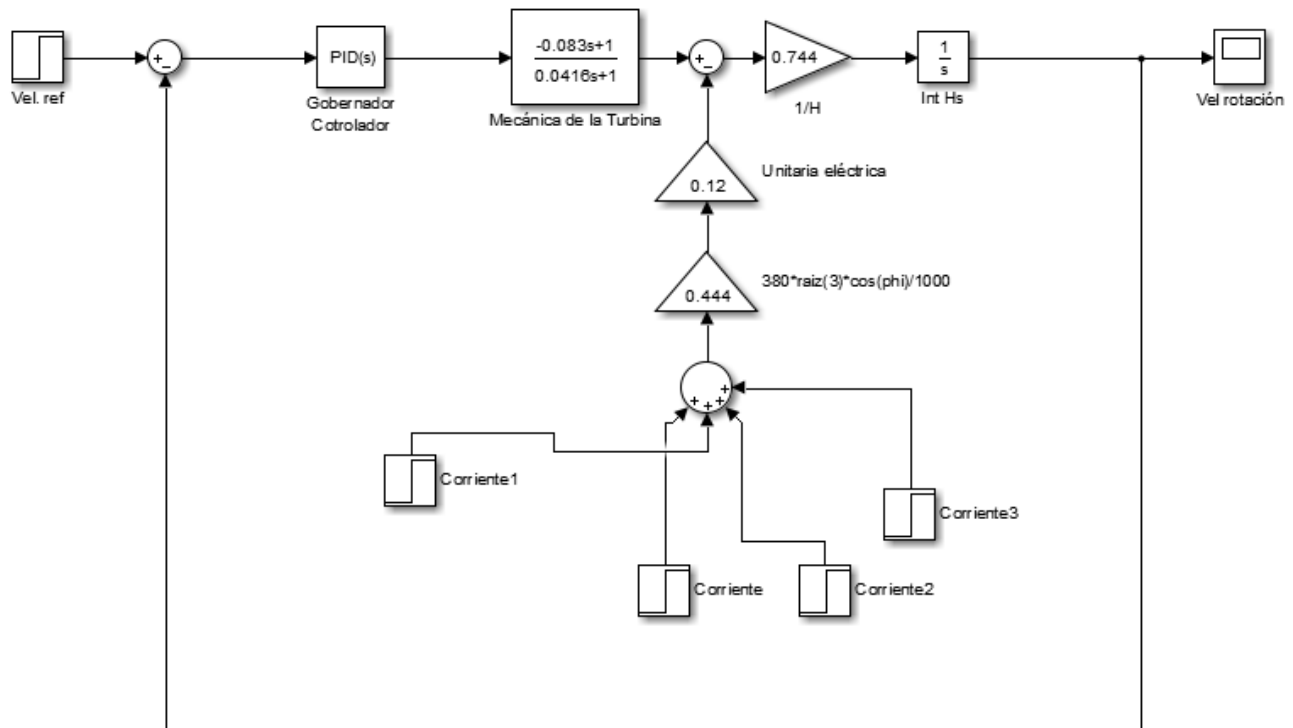


Figura 3.4: Modelo simple en Matlab de una microcentral hidráulica con microturbina de duraluminio.

Cabe destacar que la condición inicial de la potencia mecánica para el duraluminio es de $-8,362 \cdot 10^{-6}$ [kW] (es negativo, debido a que la velocidad debe romper esta barrera de inercia para empezar a mover la microturbina).

Los factores del controlador, se obtienen utilizando el método de sincronización límite de estabilidad de Ziegler & Nichols con la imagen siguiente 3.5, o analíticamente por medio del método de Ruth Hurwitz. Por lo tanto, en la imagen 3.5 todo el sistema se encuentra en el límite de la estabilidad, resultando que la ganancia crítica (K_c) es 16,194 y el periodo crítico (P_c) es 1,8 [s].

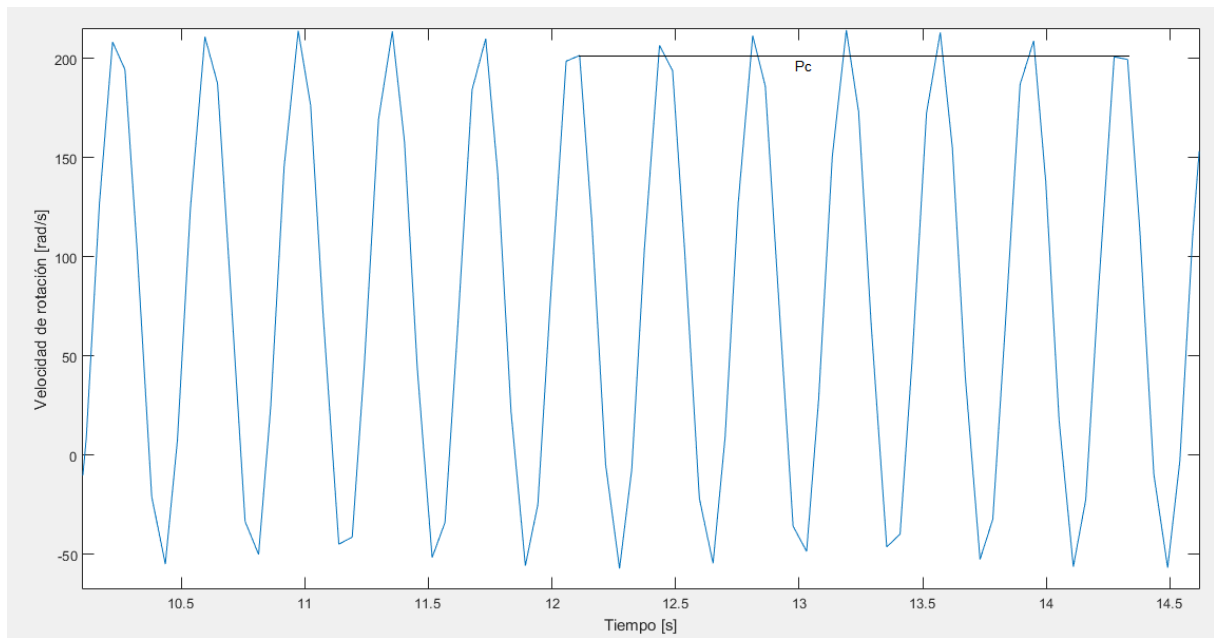


Figura 3.5: Sistema de microcentral hidráulica de duraluminio en límite de estabilidad con periodo crítico.

Luego, de obtener los parámetros para diseñar el controlador, se obtienen los siguientes valores para su implementación, ver tabla 3.1.

Tabla 3.1: Valores de diseño de un controlador P, PI y PID, para microturbina hidráulica de duraluminio.

Parámetros de diseño	P	PI	PID
K_p	8,097	7,2873	9,7164
T_i	0	1,5	0,9
T_d	0	0	0,225

Entonces, al implementarlos resulta lo siguiente.

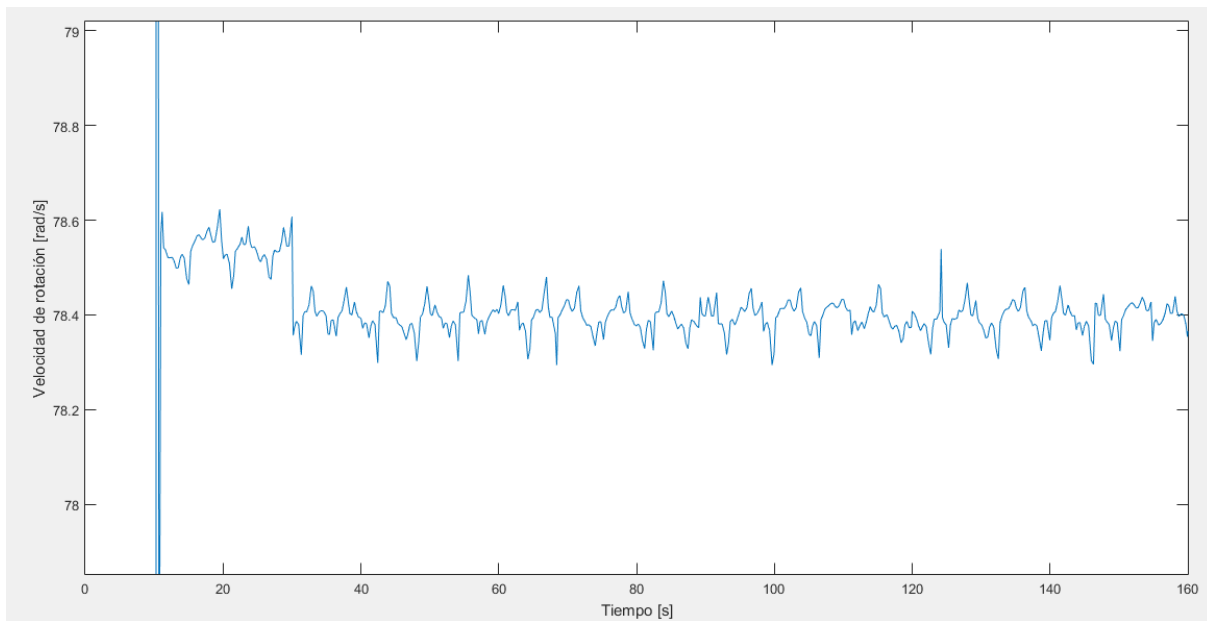


Figura 3.6: Respuesta del sistema con controlador P y microturbina de duraluminio.

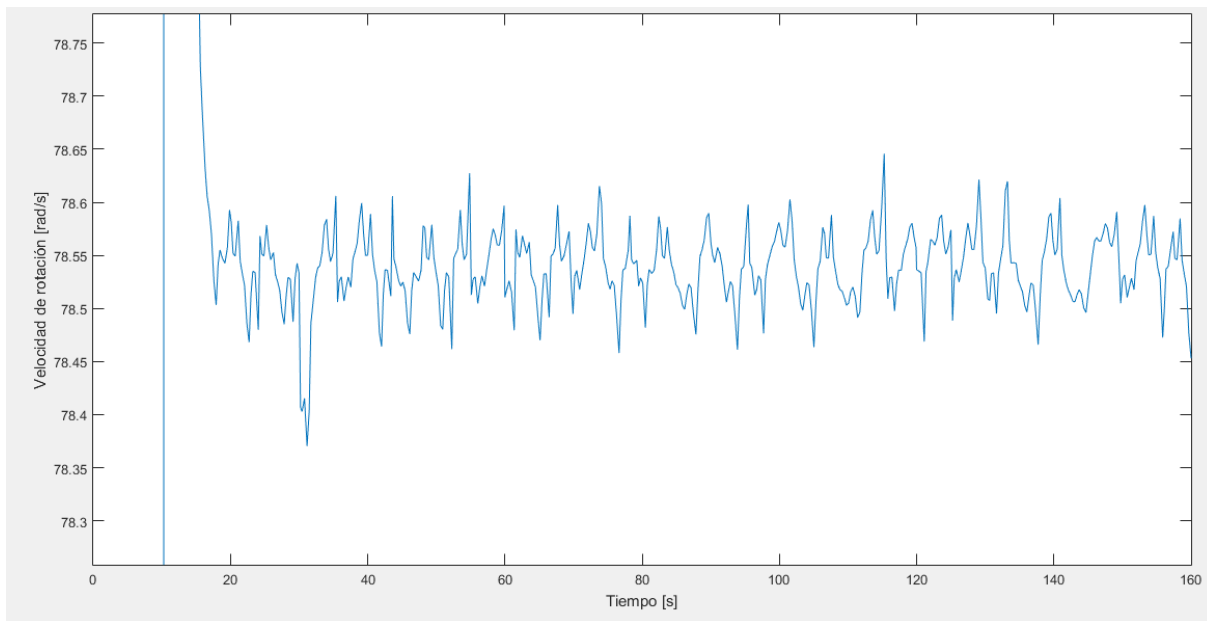


Figura 3.7: Respuesta del sistema con controlador PI y microturbina de duraluminio.

De las figuras 3.6, 3.7 y 3.8, resulta que con el controlador P la velocidad de rotación del conjunto microturbina - generador varía entre $78,6 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ y $78,3 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, lo que equivale a fluctuar la frecuencia eléctrica entre 50,04 [Hz] y 49,85 [Hz].

Mientras que, con el controlador PI, si bien, se mantiene la fluctuación, ésta varía entre $78,6 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ y $78,45 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, equivalente a 50,04 [Hz] y 49,94 [Hz], aunque hay una oscilación mayor que se muestra por 1,6 [s], siendo el momento en que se varía la carga eléctrica solicitada.

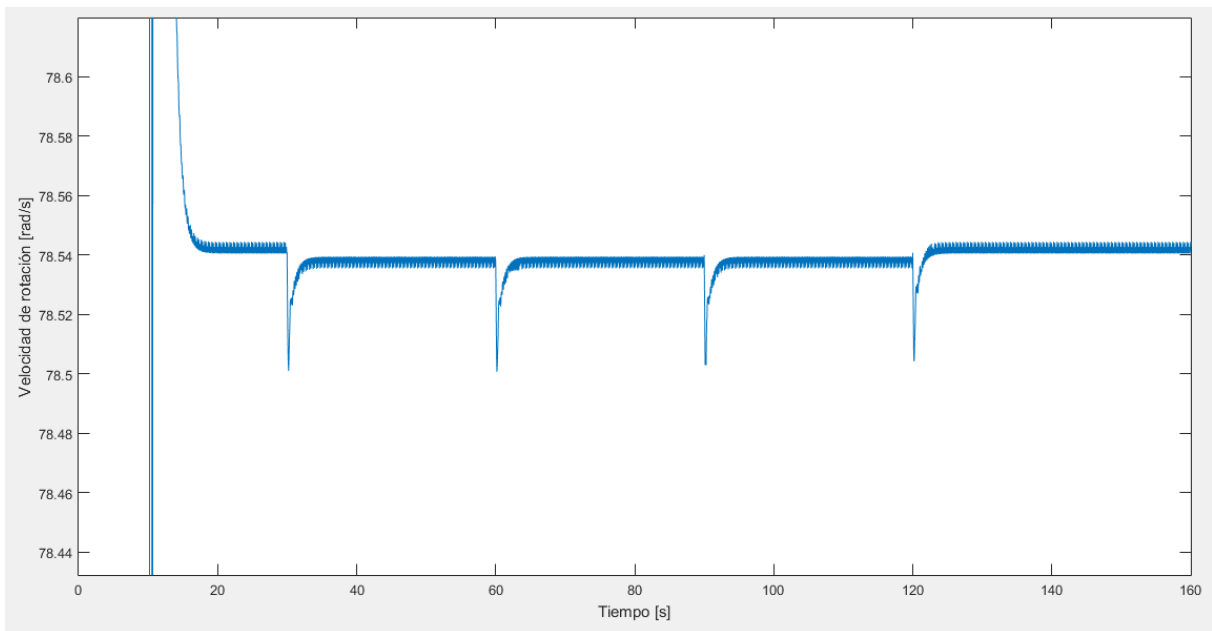


Figura 3.8: Respuesta del sistema con controlador PID y microturbina de duraluminio.

Por otro lado, con el controlador PID se mantiene la oscilación al momento de aplicar la carga eléctrica, pero en 2,5 [s] llega a mantenerse en 50 [Hz], pues alcanza los $78,54 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$ y su variación es mínima, entre $78,555 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$ y $78,535 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$, encontrándose dentro de la tolerancia asumida de 2%.

En el caso del acero, se realiza el mismo procedimiento, obteniendo un $K_c=24,145$ y $P_c=1,8$ [s], donde la potencia mecánica inicial es $-1,19252 \cdot 10^{-5}$ [kW] utilizando el modelo que sigue.

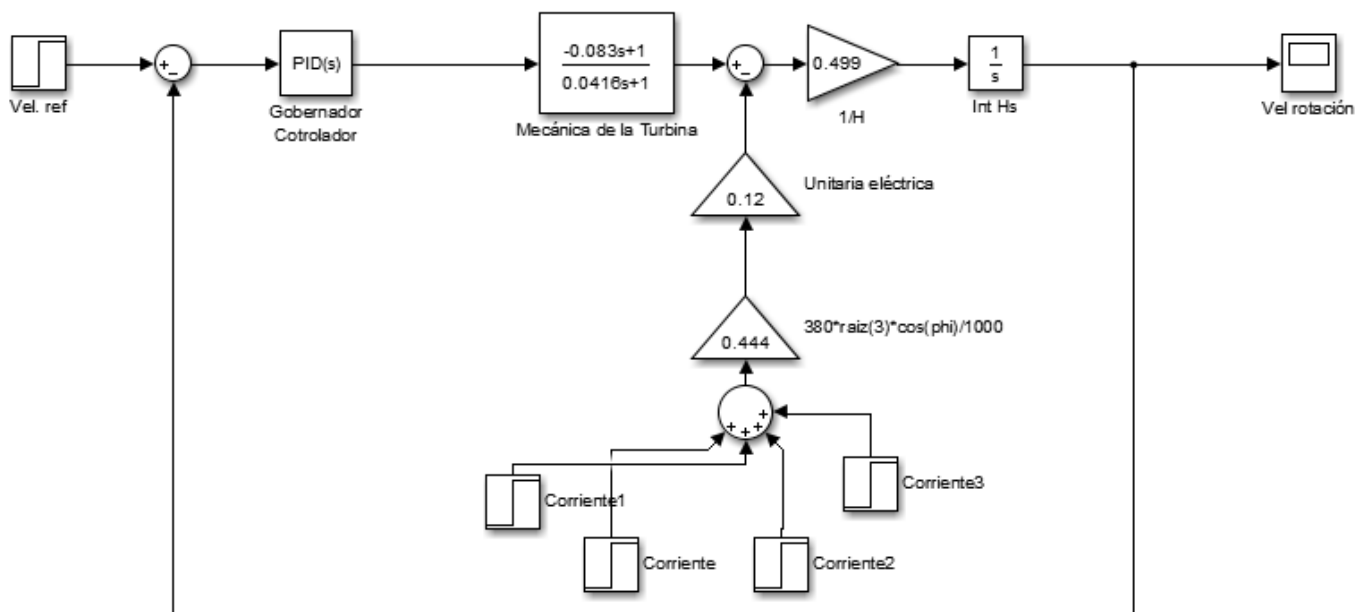


Figura 3.9: Modelo simple en Matlab de una microcentral hidráulica con microturbina de acero.

Con lo anterior, resultan los mismos parámetros que el duraluminio, pero cambia la ganancia K_p , lo cual se observa en la tabla 3.2 siguiente.

Tabla 3.2: Valores de diseño de un controlador P, PI y PID, para microturbina de acero.

Parámetros de diseño	P	PI	PID
K_p	12,063	10,865	14,487
T_i	0	1,5	0,9
T_d	0	0	0,225

Luego, al implementarlos se obtiene lo que sigue.

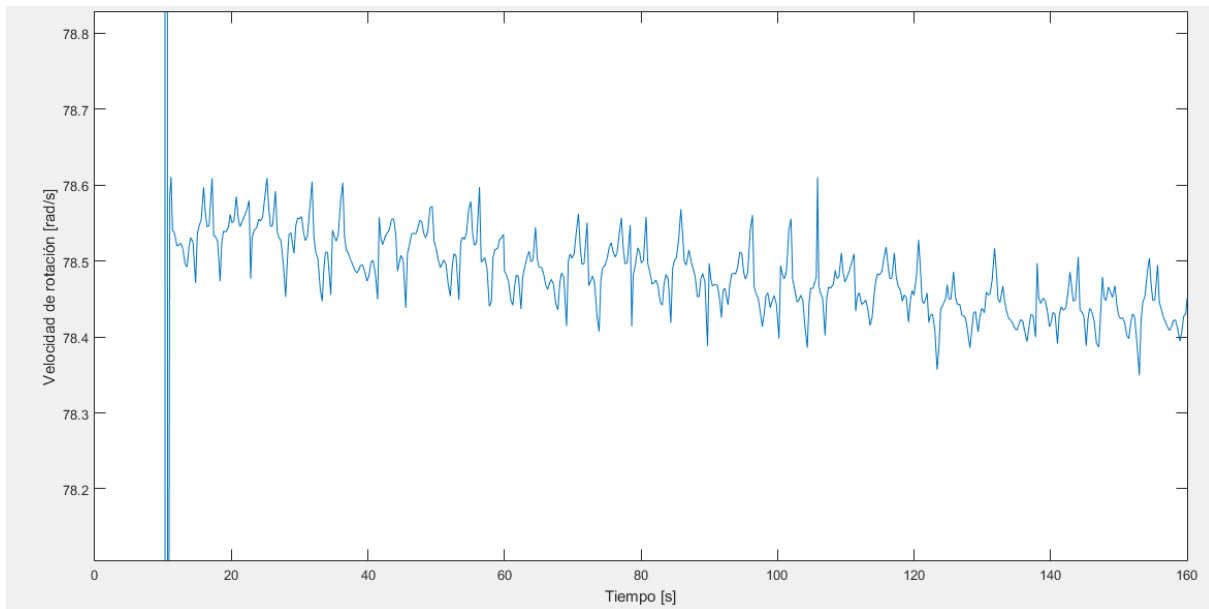


Figura 3.10: Respuesta del sistema con controlador P y microturbina de acero.

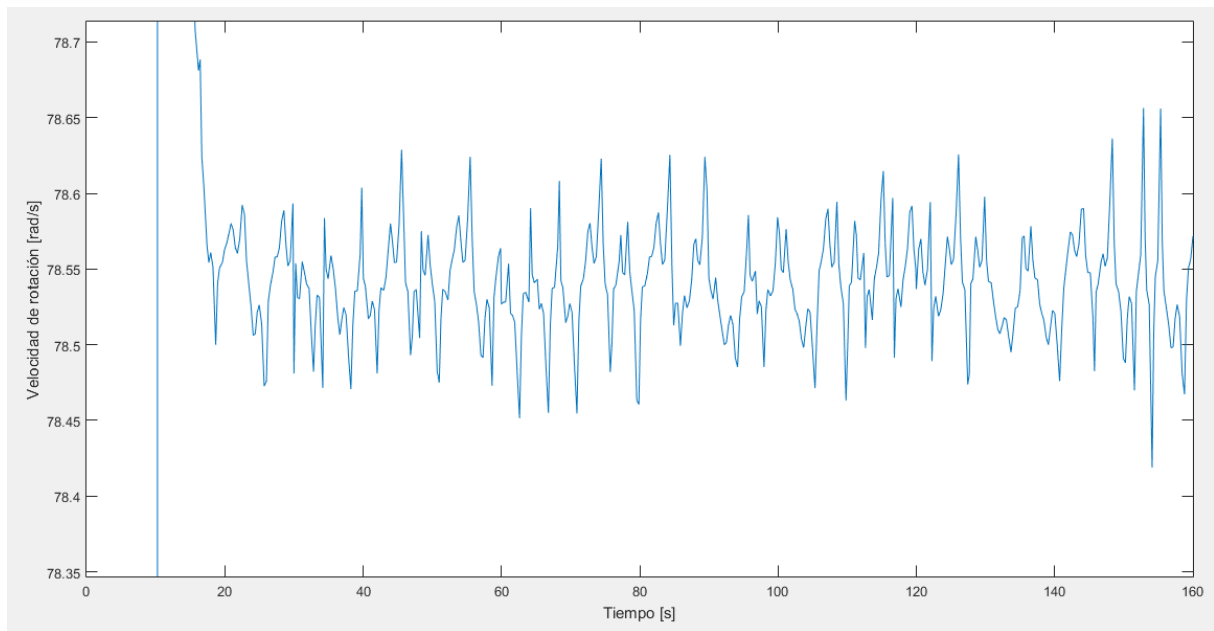


Figura 3.11: Respuesta del sistema con controlador PI y microturbina de acero.

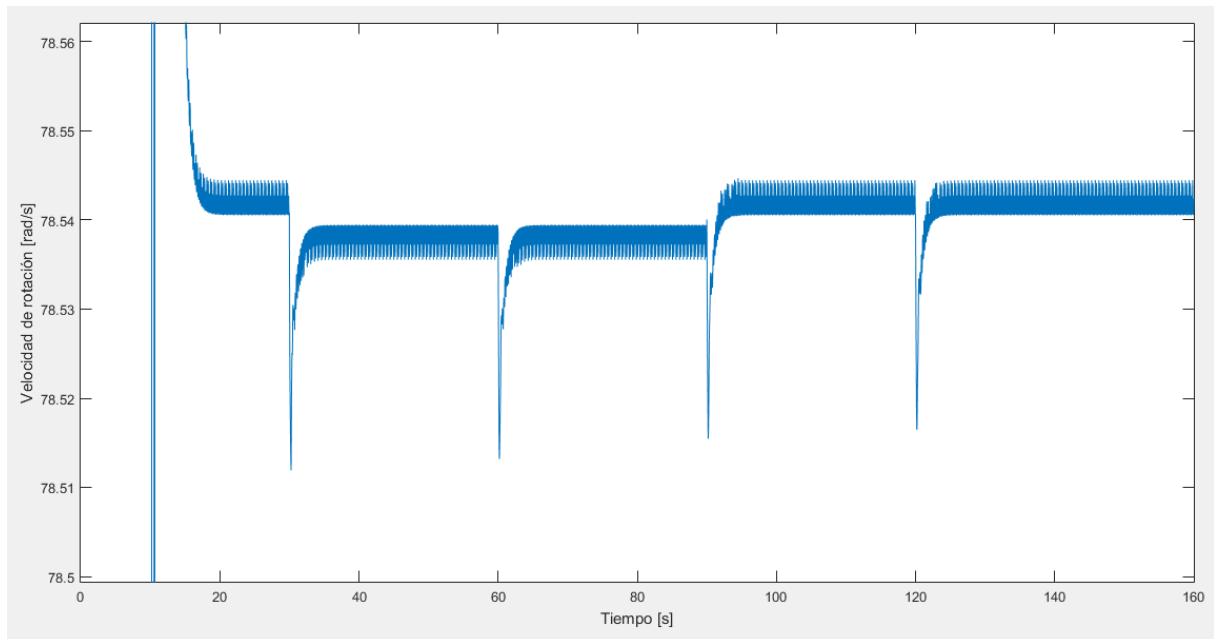


Figura 3.12: Respuesta del sistema con controlador PID y microturbina de acero.

De las figuras 3.10, 3.11 y 3.12, resulta que con el controlador P la velocidad de rotación del conjunto microturbina - generador varía entre $78,6 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$ y $78,35 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$, lo que equivale a fluctuar la frecuencia eléctrica entre $50,04 \text{ [Hz]}$ y $49,88 \text{ [Hz]}$, pero va disminuyendo a medida que pasa el tiempo.

Mientras que con el controlador PI, si bien, se mantiene la fluctuación, esta se mantiene constante, y varía entre $78,6 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$ y $78,47 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$, equivalente a $50,04 \text{ [Hz]}$ y $49,96 \text{ [Hz]}$.

Por otro lado, con el controlador PID se mantiene la oscilación al momento de aplicar la carga eléctrica, pero en 3 [s] logra mantener el sistema en 50 [Hz], pues alcanza los 78,54 y su variación es menor que usando duraluminio, entre 78,545 [$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$] y 78,535 [$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$].

Finalmente, si bien, al inicio del funcionamiento de la microturbina hidráulica se producen oscilaciones de alta amplitud y alta variación de velocidad de rotación, el sistema se estabiliza en menos de 10 [s], ocasionando que al comenzar a variar la corriente según los requerimientos, éste no se vea afectado ante el hecho transiente del inicio del movimiento del conjunto microturbina - generador de la microcentral hidráulica.

3.2. Solución final de control electrónico

Debido a los resultados obtenidos del modelo de control electrónico, y al agregar algunas consideraciones y tolerancias dentro de las soluciones planteadas, estas se modifican levemente dando a continuación las soluciones finales.

3.2.1. Solución final para una microcentral hidráulica en generación distribuida

Luego de obtener los resultados del modelo realizado para la microcentral hidráulica, se obtiene la misma solución propuesta, pero en detalle.

Los detalles considerados es la utilización de un PID como controlador, ya que, de acuerdo a los resultados del modelo es el controlador que utiliza menos tiempo para lograr la estabilización, entregando una respuesta estable al sistema, luego de variar las cargas eléctricas.

El análisis se realiza en la sección "Análisis de controlador utilizado" del capítulo 4 del presente documento.

Además, se asume una tolerancia de 2% de error para el sistema con respecto a su frecuencia, es decir, la frecuencia puede fluctuar entre 49 [Hz] y 51 [Hz]. Como al utilizar un PID, según los resultados del modelo, la salida del sistema varía entre 78,4 [$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$] y 78,6 [$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$], lo que equivale a 49,9 [Hz] y 50,04 [Hz]. Entonces, el sistema funciona con los valores PID de las tablas 3.1 y 3.2 de la subsección anterior.

Por otro lado, faltaba decidir el material de los álabes (cucharas) de la microturbina hidráulica, debido a que pueden ser de acero o duraluminio. El material elegido y utilizado es de duraluminio por tener mayor facilidad de procesar para la fabricación, ya que, no hay diferencia apreciable entre la elección de acero y duraluminio, considerando lo tolerancia asumida de 2% de la frecuencia de referencia, y el uso del PID. Un análisis más detallado se encuentra en la sección "Análisis de material de microturbina hidráulica" del capítulo 4 "Análisis".

3.2.2. Solución final para caracterizar el funcionamiento de una microturbina hidráulica de tipo Pelton

Para la experiencia n°2, caracterización de una microturbina hidráulica, la solución final es un lazo abierto de la solución de la experiencia n°1, ver figura 3.13, donde no existiría controlador, el PID se encuentra apagado, y desde un computador se debe mover la aguja del inyector para regular caudal y cambiar los parámetros del variador de frecuencia de la bomba. Con el fin de modificar la altura neta del sistema. Es decir, todos los datos iniciales se regulan de forma semimanual con un computador, y se van a obtener a través de las mediciones de los instrumentos los valores de caudal, altura, torque, velocidad de rotación del conjunto microturbina - generador, y potencia eléctrica, al igual que otras variables para la caracterización de la microturbina se van a calcular como potencia mecánica (ec. 1.13 referente a microturbina hidráulica), eficiencia de la microturbina (ec 1.4), entre otras.

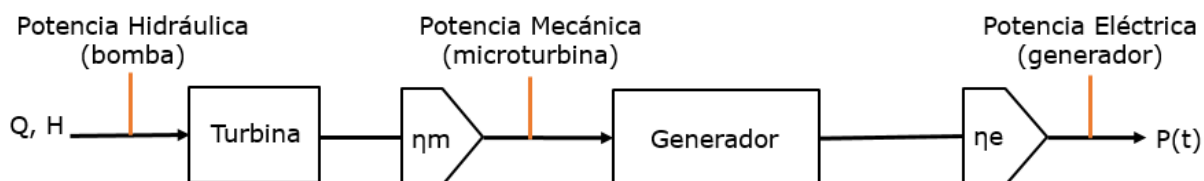


Figura 3.13: Solución propuesta para caracterizar una microcentral hidráulica.

3.2.3. Solución final del sistema de seguridad contra embalamiento

Para el sistema de seguridad contra embalamiento de la microcentral hidráulica, se considera una válvula de seguridad de acción rápida, la cual se encuentra al inicio del circuito hidráulico, anterior tanto a la microturbina como a la instrumentación.

Esta válvula va a actuar cuando el tacómetro mida una velocidad de rotación sobre 850 [RPM], equivalente a $89,1 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$ aproximadamente. Pues, si bien, la microturbina a esa velocidad no posee problemas, el generador posee una velocidad máxima de 900 [RPM], ver ficha de generador en anexo A, lo que equivale a $94,25 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$. Por lo tanto, para evitar daños en el generador se impone la velocidad máxima de rotación del conjunto microturbina - generador de 850 [RPM].

El funcionamiento de esta válvula es de tipo "on/off", es decir, cuando el sistema se encuentra sobre 850 [RPM] la válvula se activa y cierra completamente el paso del agua hacia la turbina, abriendo el paso hacia la piscina de almacenamiento hasta que el conjunto microturbina - generador disminuya su velocidad a bajo 850 [RPM], ocasionando que vuelva a abrir el paso hacia el conjunto microturbina - generador. Todo esto es controlado a través del computador mediante un relé que entrega la señal de apertura o cierre al sobrepasar de 850 [RPM] la velocidad de rotación del conjunto microturbina - generador.

3.3. Implementación

Luego de la etapa de diseño, se deben implementar las soluciones finales y los equipos para luego pasar a los análisis de funcionamiento.

3.3.1. Descripción del laboratorio de pruebas.

El laboratorio de pruebas consta principalmente de una bomba hidráulica, regalada, sobredimensionada, una microturbina hidráulica tipo Pelton, un generador eléctrico, una piscina de almacenamiento de agua, elementos de instrumentación y control, válvulas, y una línea hidráulica que va desde la succión del agua realizada por una bomba hidráulica sobredimensionada, hasta la microturbina.

La microturbina hidráulica con el generador se encuentran unidos por un eje común en el cual está instalado un torquímetro y tacómetro con el fin de medir el torque y velocidad de giro del conjunto microturbina - generador para obtener la potencia mecánica de la microturbina.

Además, la microturbina hidráulica se encuentra protegida por una carcasa. En esta carcasa se encuentra sujetado un codo, y dos acoples para unir la línea hidráulica con la microturbina. A su vez, estos acoples y el codo son utilizados de apoyo para colocar los elementos del inyector que regulan el caudal de la microturbina, al igual que son utilizados para apoyar el servomotor con su acople. Este acople del servomotor tiene como fin traspasar el movimiento de rotación del servomotor al inyector, manteniendo el servomotor fijo.

El inyector, elemento principal en las soluciones realizadas. Es utilizado para controlar la microcentral, posee un eje y una aguja, la cual, a través de su movimiento abre o cierra la sección para que pueda entrar el caudal a la microturbina, generando así el aprovechamiento de la potencia hidráulica para transformarla a potencia mecánica.

Finalmente, por otro lado, se encuentran dos bancos de resistencias las cuales están conectadas con el generador para disipar la potencia eléctrica generada, siendo de utilidad para observar el comportamiento de la microcentral frente a la variación de cargas eléctricas. Estos bancos se encuentran en proyecto de inspalación para trabajos futuros. Por ello, se reemplazaron con seis (6) estufas, cada par de ellas conectadas a una (1) fase del generador.

3.3.2. Elementos requeridos y plano de funcionamiento.

De acuerdo a lo descrito anteriormente, los elementos requeridos son los siguientes:

- Computador con tarjeta de adquisición de datos para poder almacenar y analizar los datos obtenidos con el fin de ser parte de la automatización para la experiencia n°1 o en la interfaz semi manual para la experiencia n°2.

- Servomotor de potencia máxima de 200 [W] y torque máximo de 12,8 [Nm], con su controlador. Estos valores se obtienen de acuerdo a las pruebas de torque y a la selección de servomotor, anexos C y E, respectivamente.
- Inyector con eje y aguja.
- Acople servomotor – inyector para traspasar movimiento al inyector sin desplazar el servomotor.
- Microturbina hidráulica, con potencia, altura y caudal nominal de 10 [kW], 40 [m.c.a] y 35 [l/s] respectivamente.
- Generador eléctrico trifásico.
- Instrumentos de medición de variables mecánicas mencionados anteriormente como flujómetro, tubo de pitot, torquímetro y tacómetro. Envían mediciones al computador quien a través de la tarjeta de adquisición de datos las obtiene.
- Módulos convertidores de señal Hart a USB para flujómetro y tubo de pitot. Para el flujómetro este módulo sólo convierte la señal para que los datos puedan ser adquiridos por el computador, y para el tubo de pitot, además de convertir los datos, entrega potencia de 24 [V] con una resistencia de 700 [ω].
- Fuente de voltaje de 24 [V] para electrificar controlador del servomotor e instrumentos que lo requieran.
- Bomba con motor asociado y variador de frecuencia para modificar la velocidad del motor. El variador modifica la velocidad del motor a través de parámetros entregados por el computador con un control semi – manual.
- Válvula check al inicio de la bomba para evitar contraflujo de agua en la bomba.
- Válvula de seguridad antiembalamamiento, automática que se activa a partir de los 850 [RPM] de velocidad de giro.
- Válvula reguladora de caudal para regular el sobredimensionamiento de la bomba.
- Distintos elementos hidráulicos como Tees, cañerías de 3” y 4” para instrumentación y expansiones de cañerías.
- Instrumentos de medición de variables eléctricas como Amperímetro, voltímetro y frecuencímetro, todo en el equipo analizador de potencia que se observa en anexo F, y pinza amperimétrica en anexo G.
- Interruptor trifásico termomagnético de 16 [A] para protección del generador debido a alzas de voltaje.
- Seis (6) estufas monofásicas con potencia de 2000 [W] cada una, conectadas de pares a cada fase del generador eléctrico y con sus ventiladores conectados a la red.
- Alargador para entregar corriente de la red eléctrica a ventiladores de las estufas.
- Repisa para colocar las estufas y el interruptor trifásico.
- Relé de estado sólido de 3 [V] a 24 [V] para controlar la válvula del sistema de seguridad.
- Arduino Uno y convertidor RS-232 a TTL para poder convertir la señal serial de la tarjeta de adquisición de datos a digital. Es para comunicarse con el variador de frecuencia, las válvulas y el servomotor.
- Dos bancos de resistencia de 7.500 ohm cada uno. Se encuentran comprados, pero se dejan fuera de este trabajo pues se requiere un análisis profundo sobre su conexión con el generador.

Todos estos elementos se pueden observar en los planos de tuberías e instrumentación que se observa en el Anexo B.

Con aquellos planos, se puede observar la diferencia entre la experiencia n°1 y la experiencia n°2, donde ambas consideran una válvula de seguridad. La diferencia principal es que para la experiencia de control automático de una microcentral hidráulica para generación distribuida, experiencia n°1, el computador hace de PID además de captador y analizador de datos, mientras que para la experiencia n°2, caracterización de microturbina hidráulica, el computador muestra las mediciones y se utiliza para indicar la distancia que posee de apertura la aguja, con tal de estar entregando todos los puntos de operación a diferente caudal.

Además, se encuentra que para la experiencia n°1 el variador de frecuencia se encuentra desconectado, pues sólo se requiere de 40 [m.c.a] de altura y 35 [$\frac{1}{s}$] de caudal. Mientras que para la experiencia n°2 se requiere el variador de frecuencia conectado para variar la velocidad del motor de la bomba y así obtener la curva de operación de la turbina a distinta altura.

3.3.3. Control en LabVIEW.

Tal como se menciona anteriormente, el computador es el visor y analizador de datos, los cuales se adquieren a través una tarjeta de adquisición de datos usando el programa LabVIEW. Además, para la experiencia n°1 el mismo computador es el PID de la solución planteada, por lo tanto, posee una programación con los valores de P, I y D obtenidos en la sección "Modelo de control electrónico", del capítulo 3 "Resultados".

La interfaz computador-usuario para mostrar las distintas mediciones realizadas es la misma para ambas experiencias, siendo mostrada a continuación, en la figura 3.14.

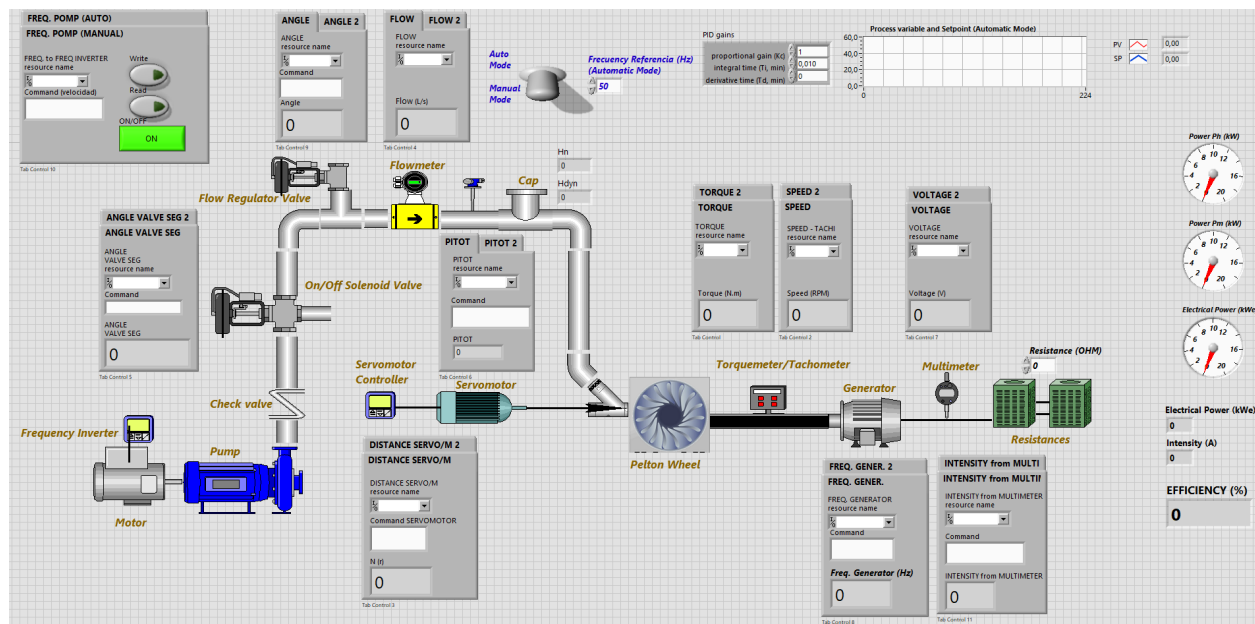


Figura 3.14: Interfaz computador-usuario en programa LabVIEW.

También, como segunda pestaña en los bloques de la interfaz, se muestra la función del sistema de control de cada elemento de la microcentral hidráulica, tanto si lee datos o a su vez envía o escribe datos el instrumento. Esta interfaz se muestra como sigue en la figura 3.15, y se debe colocar la función a cada elemento antes del inicio del control de la microcentral.

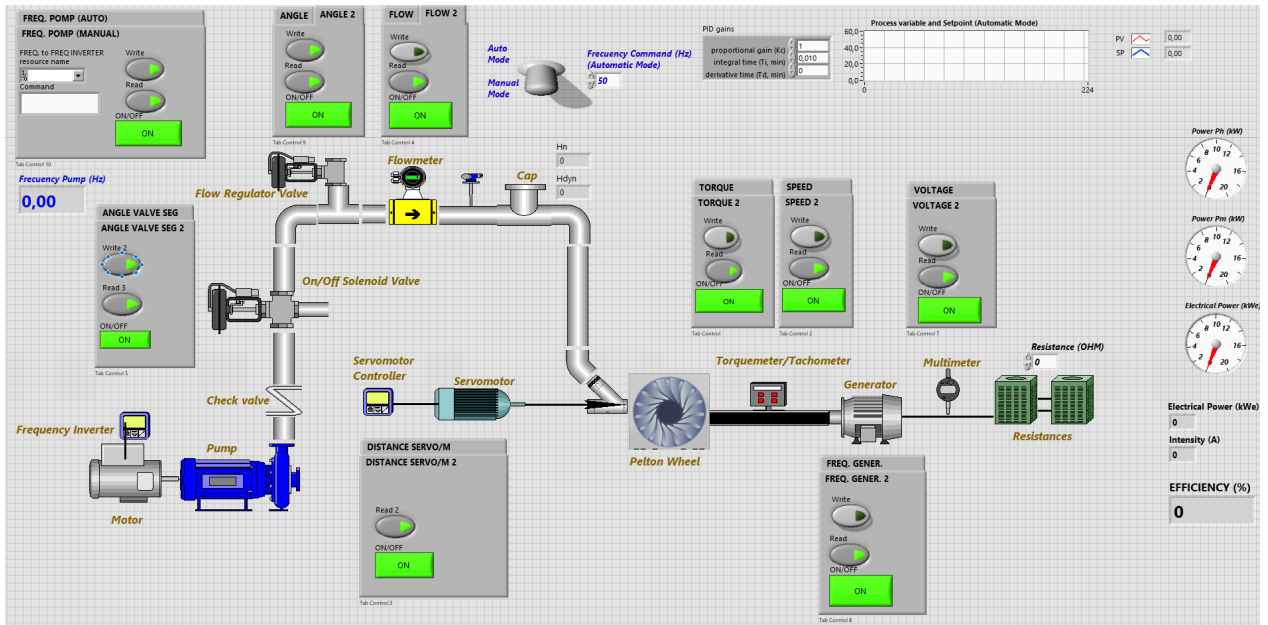


Figura 3.15: Pestaña de adquisición, lectura o envío de datos en programa LabVIEW.

Cabe destacar que se muestra un switch de modo automático o manual, que es la diferencia de obtener datos para la experiencia n°1 y la n°2.

Además, para que el computador obtenga las mediciones y funcione en distintos modos de operación, automático o manual, se debe programar la interfaz computador-usuario. La programación para ambos modos de operación, se muestra en las imágenes de los diagramas de bloques de a continuación, figuras 3.16, 3.17 y 3.18.

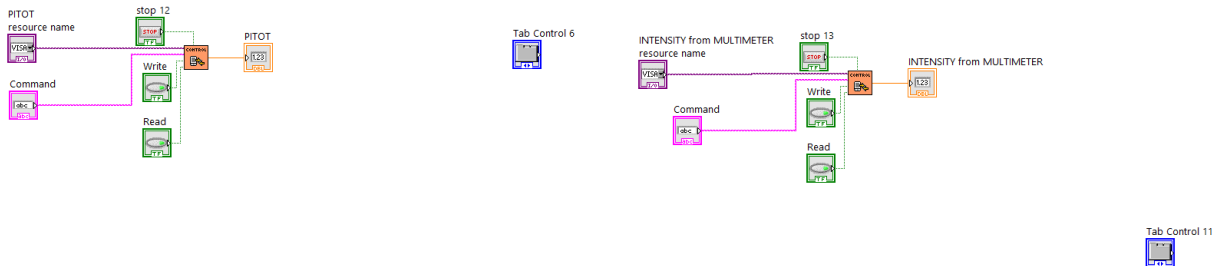


Figura 3.16: Diagrama de bloques de programa LabView de Pitot y amperímetro para ambos modos de operación.

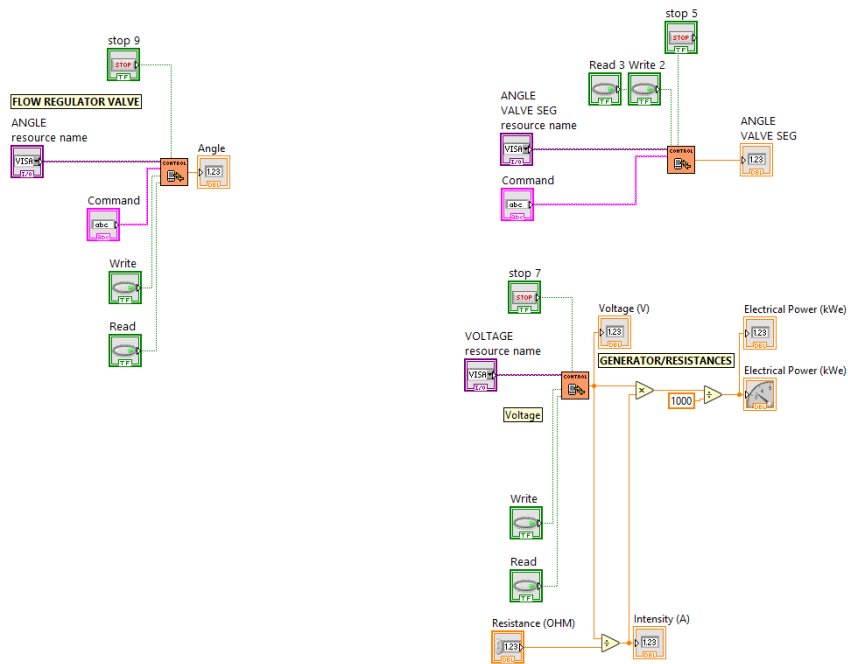


Figura 3.17: Diagrama de bloques de programa LabView de válvula reguladora de sobredimensionamiento de bomba, válvula de seguridad y multímetro.

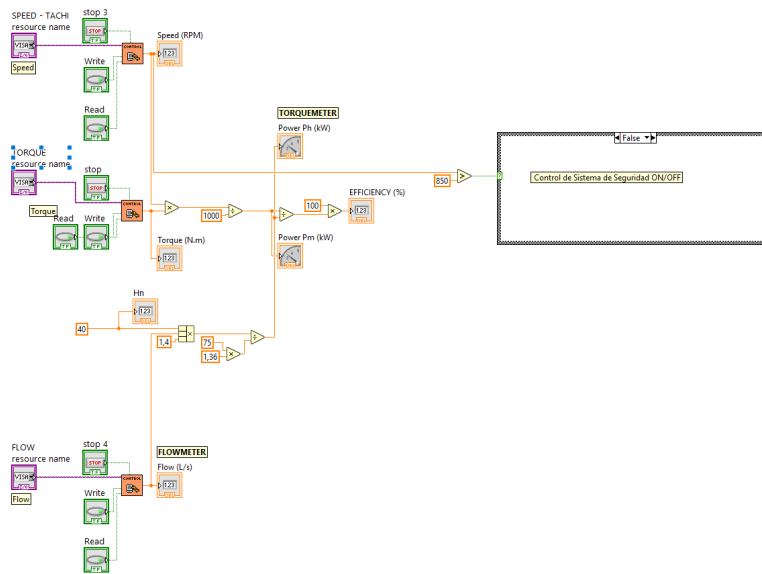


Figura 3.18: Diagrama de bloques de programa LabView de tacómetro, torquímetro y flujómetro.

Mientras, para el modo de operación automático, su diagrama de bloque es el mostrado en la figura 3.19, y para el modo manual es el observado en la figura 3.20. Ambas se muestran a continuación.

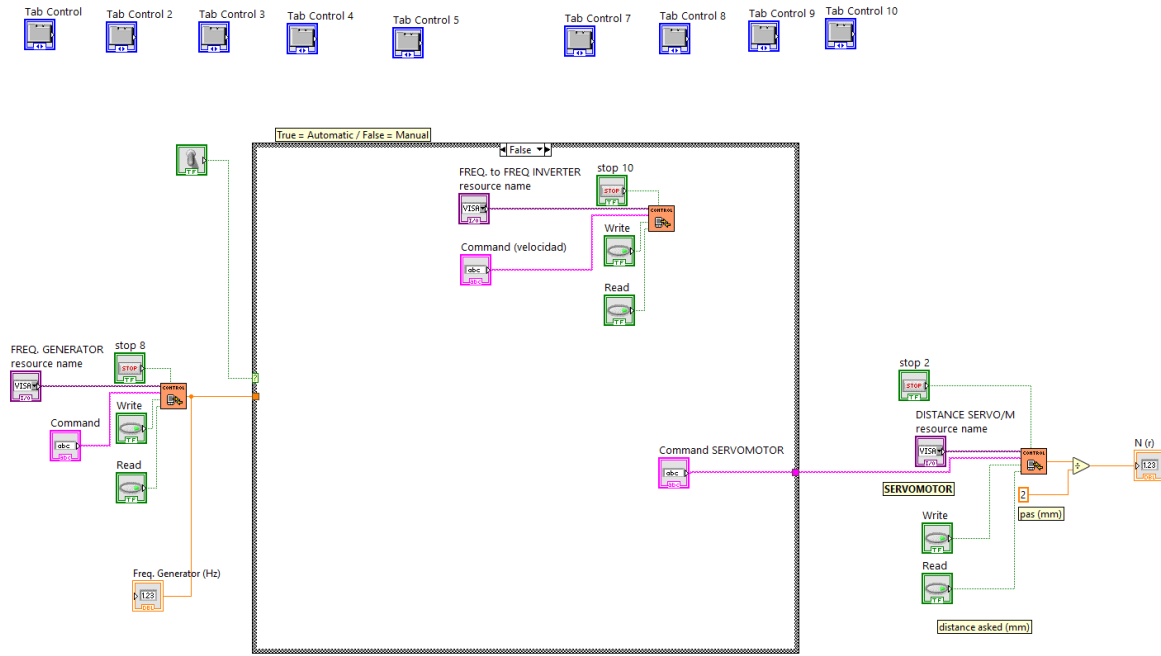


Figura 3.19: Diagrama de bloques de programa LabView de modo automático con PID como control del Servomotor y control de frecuencia del generador.

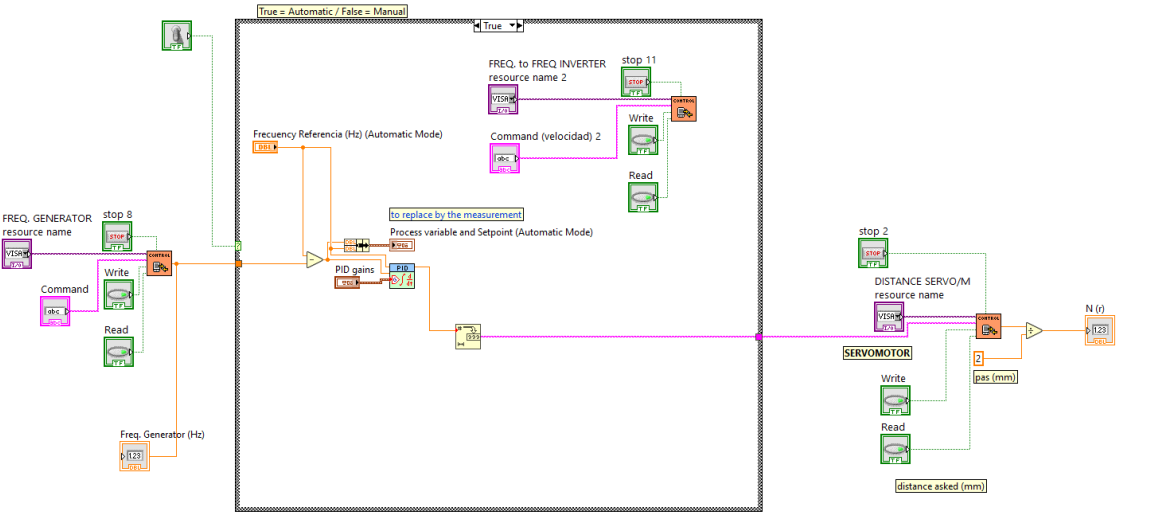


Figura 3.20: Diagrama de bloques de programa LabView de modo manual con variador de frecuencia para la bomba y control manual de Servomotor.

Finalmente, tal como se observa en algunas figuras anteriores, 3.19 y 3.16, en sus diagramas de bloque se encuentran los tableros de control que poseen la función VISA de LabView. Esta función es utilizada para poder adquirir y enviar datos con la tarjeta NI actual, siendo mostrada su programación con los diagrama de bloques en las figuras 3.21 y 3.22, y la interfaz computador-usuario en la figura 3.23 de a continuación.

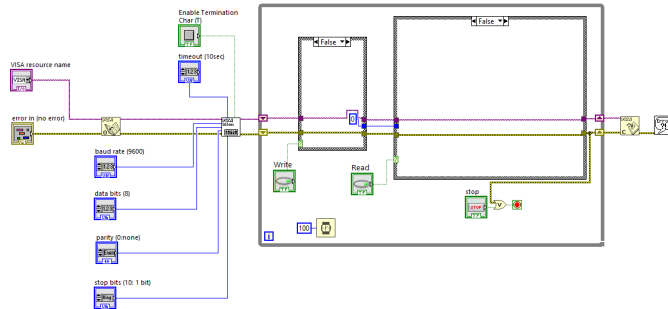


Figura 3.21: Diagrama de bloques de función VISA, caso sin adquisición de datos.

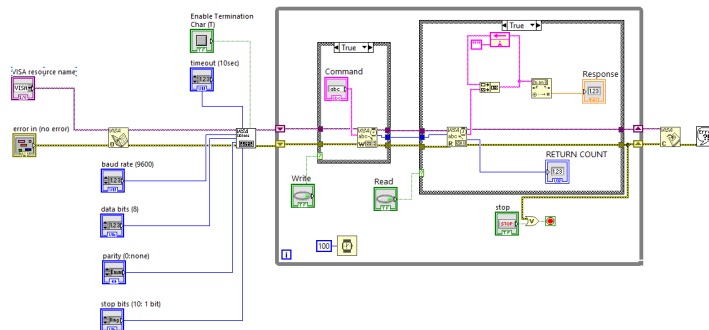


Figura 3.22: Diagrama de bloques de función VISA, caso con adquisición de datos.

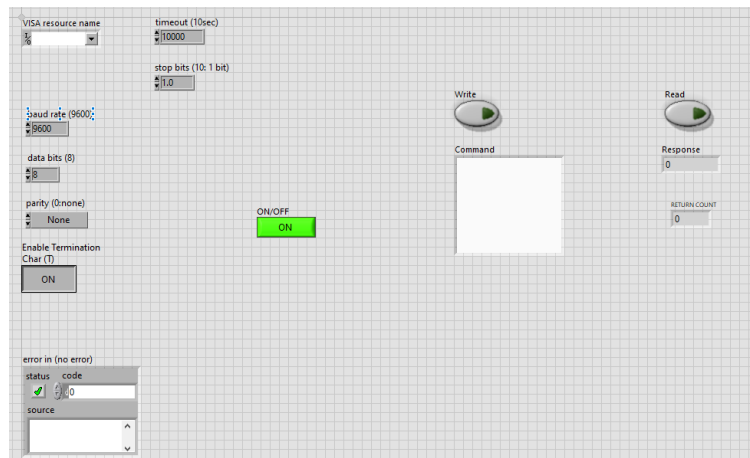


Figura 3.23: Interfaz computador-usuario de controlador con función VISA.

3.3.4. Montaje final.

Además de la realización del control a través del programa LabView, para que las soluciones propuestas funcionen, se deben montar los equipos y elementos requeridos, tanto los utilizados de forma mecánica como de eléctrica.

Como existen dos partes en el montaje, mecánico y eléctrico, se decide realizar el montaje final de forma separada. Ejecutándose primero el montaje mecánico de la microturbina hidráulica, generador, bomba, línea de cañerías, válvulas, tuberías, entre otros. Para luego, realizar el montaje eléctrico de la microcentral con los cables y conexiones de potencia del generador, de potencia de 24 [V] de las válvulas e instrumentos y de señal, al igual que la canalización de los cables, entre otros.

Todo el montaje se puede observar en Anexo I.

Capítulo 4

Análisis

De acuerdo a los resultados propuestos y obtenidos, se realiza la comparación del material utilizado para fabricar la microturbina hidráulica, la comparación entre controlador P, PI o PID elegido y el análisis de funcionamiento de las soluciones propuestas.

4.1. Análisis de material de microturbina hidráulica.

Al comparar el control de la frecuencia de una microturbina hidráulica de duraluminio con una de acero, resulta el gráfico que sigue, figura 4.1.

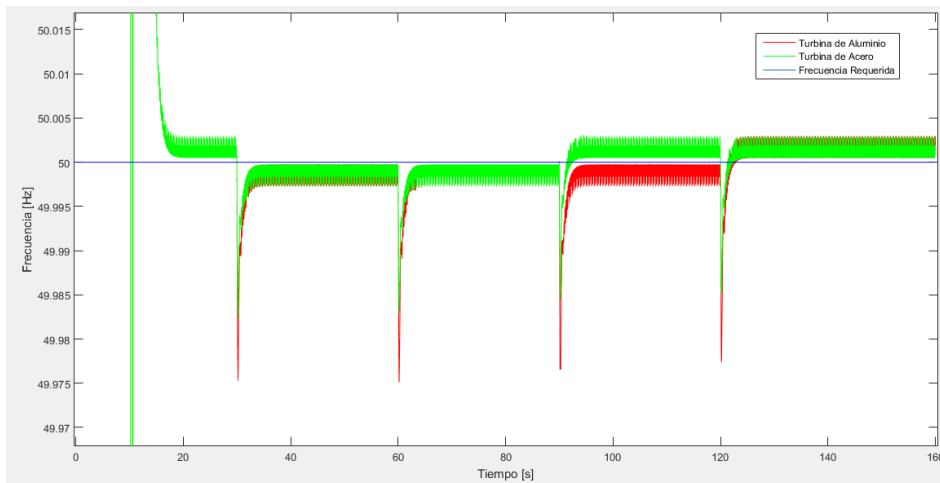


Figura 4.1: Comparación de control de frecuencia entre microturbinas de acero y duraluminio con controlador PID.

Si bien, para una microturbina de acero como para una de duraluminio la variación de la frecuencia eléctrica se encuentra dentro del rango de 2 % de tolerancia asumida, equivalente a 49 [Hz] y 51 [Hz], se puede apreciar que para una microturbina de acero la reacción de controlar la frecuencia a medida que se varían las cargas eléctricas es más rápida que para una microturbina de duraluminio.

Tal reacción mencionada, se aprecia debido a que la microturbina de acero posee a mayor velocidad de reacción desde la primera variación de carga, pues reacciona unos milisegundos antes que la microturbina de duraluminio. Esto se acentúa cuando varía la tercera carga, pues llega a estabilizarse completamente 20 [s] antes que la microturbina de acero que la de duraluminio, generando así, una menor variación de la frecuencia de la potencia eléctrica que genera la microcentral hidráulica.

Esta rápida reacción se explica por el momento de inercia que poseen los materiales de las microturbinas, dónde para el acero es de 1,3 [kg m²], mientras que para el duraluminio es 0,6 [kg m²] aprox. Esta diferencia se debe principalmente al peso de cada cuchara, pues el de acero es de 2 [kg] mientras que el de duraluminio es 0,9 [kg], un poco menos de la mitad.

Por consiguiente, al tener la microturbina hidráulica mayor peso, tiene mayor momento de inercia mecánico, y como, al generarse cualquier variación de carga eléctrica se produce un momento de inercia de parte del generador eléctrico que intenta cambiar la velocidad de giro de la microturbina hidráulica. Si es mayor el momento de inercia mecánico, esta variación de la velocidad de giro producida por la diferencia de momentos de inercia disminuye, pues se mantiene su estado de inercia, generando que la velocidad de la microturbina llegue a ser relativamente constante.

Por lo tanto, controlar la frecuencia de una microturbina hidráulica de acero resulta en una mayor velocidad de reacción para la estabilización de la frecuencia eléctrica, que la microturbina de duraluminio. Aunque la variación de velocidad de rotación para ambos casos se encuentre dentro de la tolerancia asumida.

Desde este punto de vista, se consideraba utilizar una microturbina de acero, pero al momento de fabricarla, se iba a generar un mayor costo y tiempo de fabricación, pues es engorroso obtener álabes (cucharas) de acero con pequeña rugosidad, ya que, se deben obtener de moldes a través de fundición, las cuales no deben tener ningún problema en el proceso. Luego de fundirlas, debían manufacturarse los detalles que posean, con tal de que estos álabes (cucharas) se encontraran correctamente balanceados. Por ende, y al saber que la diferencia entre las microturbinas de acero y de duraluminio para controlar la frecuencia eléctrica, teniendo una tolerancia de 2 %, no es apreciable, pues ambos cumplen, se considera utilizar una microturbina de álabes (cucharas) de duraluminio con eje de acero, siendo así una solución eficiente frente al problema a resolver.

4.2. Análisis de controlador utilizado.

Al controlar la velocidad de rotación de una microturbina hidráulica de duraluminio, resultan los siguientes datos que se observan en la figura 4.2.

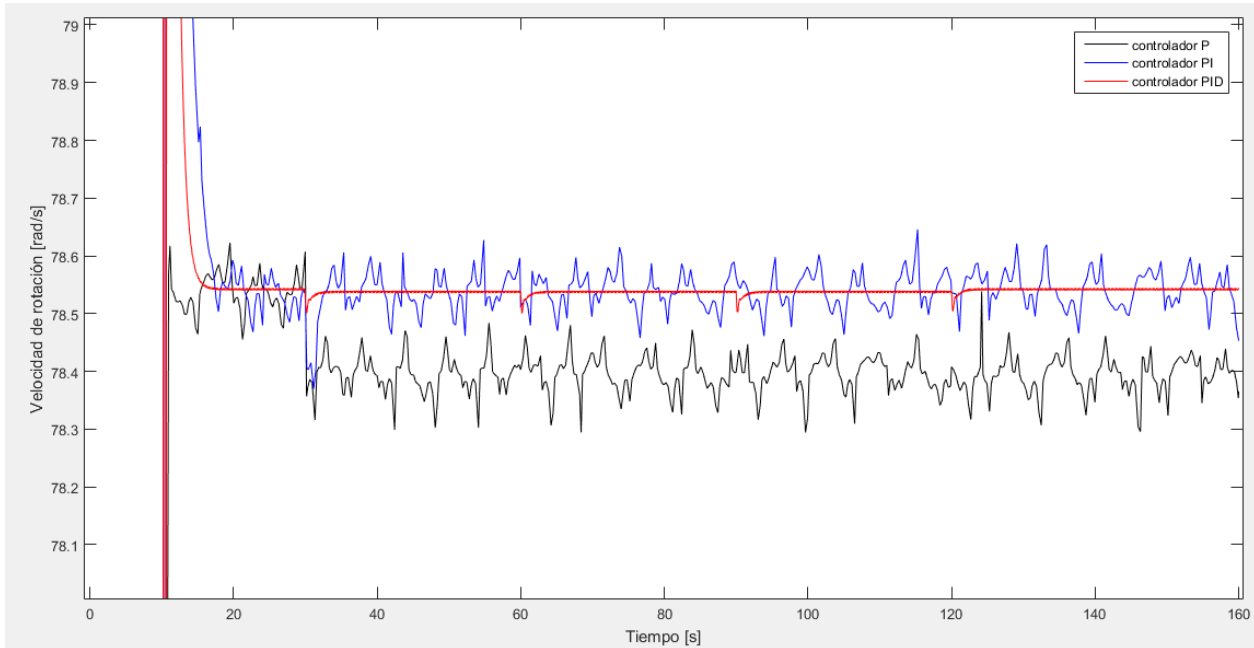


Figura 4.2: Comparación de control de la frecuencia eléctrica entre controladores P, PI y PID para microturbina de duraluminio.

Como la tolerancia impuesta para la frecuencia eléctrica es de 2 %, lo que equivale en velocidad de rotación de la microturbina a $78,4 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$ mínimo y $78,6 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$ máximo, y los controladores P y PI sobrepasan estos valores, llegando a valores cercanos de $78,3 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$ y $78,7 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$, no pueden ser considerados como controladores óptimos para las soluciones de control electrónico requeridas.

Siendo específicos, el controlador P impone en promedio una velocidad de rotación de $78,4 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$ a la microturbina hidráulica, lejano a la velocidad de rotación requerida de $78,54 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$. Además, si bien el controlador P y el controlador PI, son marginalmente estables debido a que fluctúan en torno a los valores $78,4 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$ para P y $78,54 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$ para PI, estos no son soluciones estables que es lo requerido para tener una frecuencia eléctrica constante de 50[Hz], por lo tanto, no son óptimos controladores, como si es el PID, que es estable frente a la variación de carga eléctrica y estabiliza el sistema en $78,54 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$ de velocidad de rotación, equivalente a 50 [Hz] de frecuencia eléctrica requerida para generación distribuida.

4.3. Análisis de funcionamiento.

De acuerdo a las soluciones propuestas, se realiza la verificación del funcionamiento de estas, lo cual se menciona a continuación.

4.4.1. Verificación de operación del control electrónico para una microcentral hidráulica en generación distribuida.

El sistema de control propuesto debería funcionar, pero debido a los distintos atrasos del proyecto, probar el funcionamiento de este modo de operación se va a realizar como trabajo futuro.

4.4.2. Verificación de operación del control electrónico para caracterizar el funcionamiento de una microturbina hidráulica.

El sistema de control para el modo manual funciona. Y su forma de funcionamiento es tal, que al entregar valores mayores a 0 y menores o iguales que 250, del computador al controlador del servomotor, el servomotor gira desplazando hacia el exterior al inyector y con ello la aguja reguladora de caudal. Mientras que si se le entregan valores menores a 0 y mayores o iguales que -250, el servomotor gira en sentido contrario desplazando hacia el interior al inyector. Y finalmente, si se entrega el valor de 300, el servomotor obtiene velocidad igual a cero.

Lo explicado anteriormente, se puede observar en el video del CD adjunto a este trabajo, dónde se observa la modificación de valores y con ello el cambio de giro del servomotor.

4.4.3. Verificación de operación del sistema de seguridad contra embalamiento.

El sistema de seguridad contra embalamiento funciona utilizando distintos elementos electrónicos como relés con el fin de establecer la relación de potencia que requieren las válvulas para funcionar al momento de que el conjunto microturbina hidráulica - generador sobrepase los 850 [RPM].

Cabe destacar que no se ha podido obtener un registro audiovisual del sistema funcionando debido al atraso de integración de los instrumentos en la comunicación con el programa de control en LabView.

Conclusión

Luego de proponer, montar y verificar una solución de los sistemas de control electrónico para la experiencia de generación distribuida de una microcentral hidráulica a 50 [Hz] de frecuencia y 220 [V] de voltaje, constantes, y para la experiencia de caracterización de una microcentral hidráulica. al igual que, posterior a realizar los modelos y simulaciones, se puede concluir lo que sigue.

Los objetivos se cumplen de forma parcial, pues se logran realizar todos excepto probar el funcionamiento del sistema de control electrónico para una microcentral hidráulica en generación distribuida, que corresponde a una parte del objetivo n°3.

Específicamente, se logra diseñar un sistema de control electrónico para una microcentral hidráulica, que genera energía eléctrica a 220 [V] y 50 [Hz] constantes, y uno para caracterizar el funcionamiento de la microturbina asociada, a voltaje y frecuencia variable, ambas con un sistema de seguridad antiembalamiento.

Además, se logra realizar el montaje de todos los elementos requeridos para las soluciones de los sistemas de control electrónico diseñados y propuestos, al igual que el montaje para el sistema de seguridad antiembalamiento.

Y a su vez, si bien, se logra realizar la prueba del sistema de control electrónico en modo semimanual, sistema de control para la experiencia n°2 correspondiente a caracterizar el funcionamiento de la microturbina hidráulica asociada, a voltaje y frecuencia variable, obteniendo un funcionamiento óptimo de la solución diseñada para este caso; al igual que, se logra poder activar el sistema de seguridad antiembalamiento a través de la válvula propuesta para ello. No se alcanza a probar el funcionamiento del sistema de control electrónico en modo automático, es decir, para una microcentral hidráulica, que genera energía eléctrica a 220 [V] y 50 [Hz] constantes, debido a la demora en las distintas etapas del proyecto.

También, a través de la realización de este proyecto se logra concluir que las soluciones planteadas según los resultados teóricos y las simulaciones a través del programa Matlab y Simulink, resultan ser las adecuadas para controlar electrónicamente una microcentral hidráulica y generar conocimiento de ellas.

Donde de forma específica resulta que el PID es la solución de controlador que mejor se adecúa para mantener el sistema en 50 [Hz], ya que, al inicio de operación de la microcentral se demora menos de 10 [s] en estabilizar el sistema, no generándose interferencias al variar la carga, ya que, al momento de variar las cargas eléctricas, se tiene que el PID demora entre 2 a 3 [s] en mantener la frecuencia en 50 [Hz], pero en menos de 1 [s] en mantener dentro de la tolerancia impuesta de 2% a la frecuencia eléctrica.

Además, al relacionar el tipo de material de los elementos del conjunto microturbina-generador con la rapidez de reacción del tipo de control y con la eficiencia en constructibilidad, para obtener una solución eficiente, simple y funcional de realizar, se obtiene que el material de mayor peso posee mayor momento de inercia, en una misma distribución de masa, lo cual genera una menor variación de velocidad al momento de conectar/desconectar las cargas eléctricas, por ende, se obtiene una mayor rapidez de reacción que un material de menor peso. Pero, si la reacción al control de distintos materiales no posee mayor diferencia, siempre se debe elegir el material de mayor facilidad en construcción y de bajo costo, como ocurrió en este caso entre el acero y duraluminio, siendo el duraluminio el material de elección para construir la microturbina.

En conclusión, se puede decir que se logra proponer una solución simple y factible de realizar, que es funcional para controlar y generar conocimiento de la operación de una microcentral hidráulica y su microturbina asociada. Siendo posible de ser aplicada en redes domiciliarias para su aplicación en generación distribuida y en universidades para su aplicación en la toma de conocimiento.

Trabajo Propuesto

Como trabajo propuesto, se encuentra la oportunidad de investigar, generar y aplicar una solución al control del voltaje de la microcentral hidráulica mediante controlador electrónico modificando parte de la solución planteada, con el fin de mantenerlo constante en 220 [V]. Ello se debe producto de que para controlar el voltaje se requiere controlar la altura nominal requerida de la microcentral hidráulica y en conjunto controlar el caudal de la misma, lo cual no se encuentra en los alcances de este trabajo.

Además, se debe verificar el funcionamiento del modo automático del control electrónico de la microcentral hidráulica para su aplicación en la experiencia de generación distribuida de una microcentral hidráulica a 50 [Hz] de frecuencia y 220 [V] de voltaje, constantes.

Finalmente, se propone como trabajo realizar la integración de dos bancos de resistencias de 7,5 [kohm] cada una, monofásicas y constantes, con el generador eléctrico de la microcentral hidráulica, actualizando la programación del control electrónico. Esto con el fin de poder aplicar cargas variables trifásicas para modificar la potencia eléctrica de la microcentral hidráulica entre 0 a 12 [kW] sin tener puntos discretos predeterminados, tal como se encuentra en la actualidad.

Bibliografía

- [1] J. C. Arís. Diseño, construcción y pruebas de turbina pelton. Tesis para optar al grado de magíster en ciencias de la ingeniería, mención mecánica, Depto. Ingeniería Civil Mecánica, Universidad de Chile, Santiago, 2014.
- [2] Guarnone E. y A.P.E.R. Brussa A. *Energía minihidráulica*, s.f.
- [3] R. Cárdenas. *Diapositivas de clase 1 y 4 Fundamentos de Control de Sistemas – EL 4004*. Santiago, Chile, 2017.
- [4] P. Fernández Díez. *Turbinas hidráulicas*. Cantabria, España.
- [5] J. C. Elicer. *Turbomáquinas hidráulicas - Apuntes del curso ME - 5300 Máquinas*. Santiago, 2016.
- [6] J. Morales Ceballos J. López Morales. Módulo de entrenamiento para el control de posición y velocidad de servomotores mediante plc con interfaz scada. Trabajo fin de máster en control de procesos industriales, Universidad de Córdoba, Córdoba, 2014.
- [7] A.H.A. Bakar H. Mohammad J.A. Laghari, H. Mokhlis. A comprehensive overview of new designs in the hydraulic, electrical equipments and controllers of mini hydro power plants making it cost effective technology. *Renewable ans Sustainable Energy Reviews*, 20:279–293, January 2013. University of Malaya, University of Technology MARA & University of Engineering Science and Technology.
- [8] F. Barría L. Reyes L. Vargas, J. Haas. *Apunte Generación de Energía Eléctrica con Fuentes Renovables EL - 6000*. Santiago, Chile, 2010.
- [9] H. Goyal M. Hanmandlu. Proposing a new advanced control technique for micro hydro power plants. *Electrical Power and Energy Systems*, 30:272–282, July 2007. Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology.
- [10] P. A. Mendoza. Control electrónico de una central micro-hidráulica para su aplicación en generación distribuida. Memoria para optar al título de ingeniero civil electricista, Depto. Ingeniería Civil Eléctrica, Universidad de Chile, Santiago, 2007.
- [11] K. Ogata. *Ingeniería de control moderna*. Prentice-Hall, 3rd edition, 1998. p. 2, 6, 7 y 215.

- [12] IEEE Comittee Report. Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies. *Transactions on Power Systems*, 7:167–179, Febrero 1992.
- [13] Hidráulica-turbina pelton, s.f.
- [14] D. Sáez. *Diapositivas teoría Z- N, Fundamentos de Control de Sistemas – EL 4004*. Santiago, Chile, 2015.
- [15] Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA). Centrales hidroeléctricas, s.f.
- [16] L. Vargas. *Máquinas Eléctricas - Clases del curso Generación de Energía Eléctrica con Fuentes Renovables EL - 6000*. Santiago, Chile, 2017.
- [17] B. M. Vergara. Automatización de una turbina pelton. Trabajo dirigido, Depto. Ingeniería Civil Mecánica, Universidad de Chile, Santiago, s.f.
- [18] Arturo Otto Villa. Estudio estabilidad en unidades de generación hidráulica. *Trilogía: Ciencia, Tecnología, Sociedad.*, 24:123–130, Diciembre 2012.

Anexos

Anexo A

Información del Generador Eléctrico enviada por el fabricante.

Información se muestra en página siguiente.

Página intencionalmente dejada en blanco.

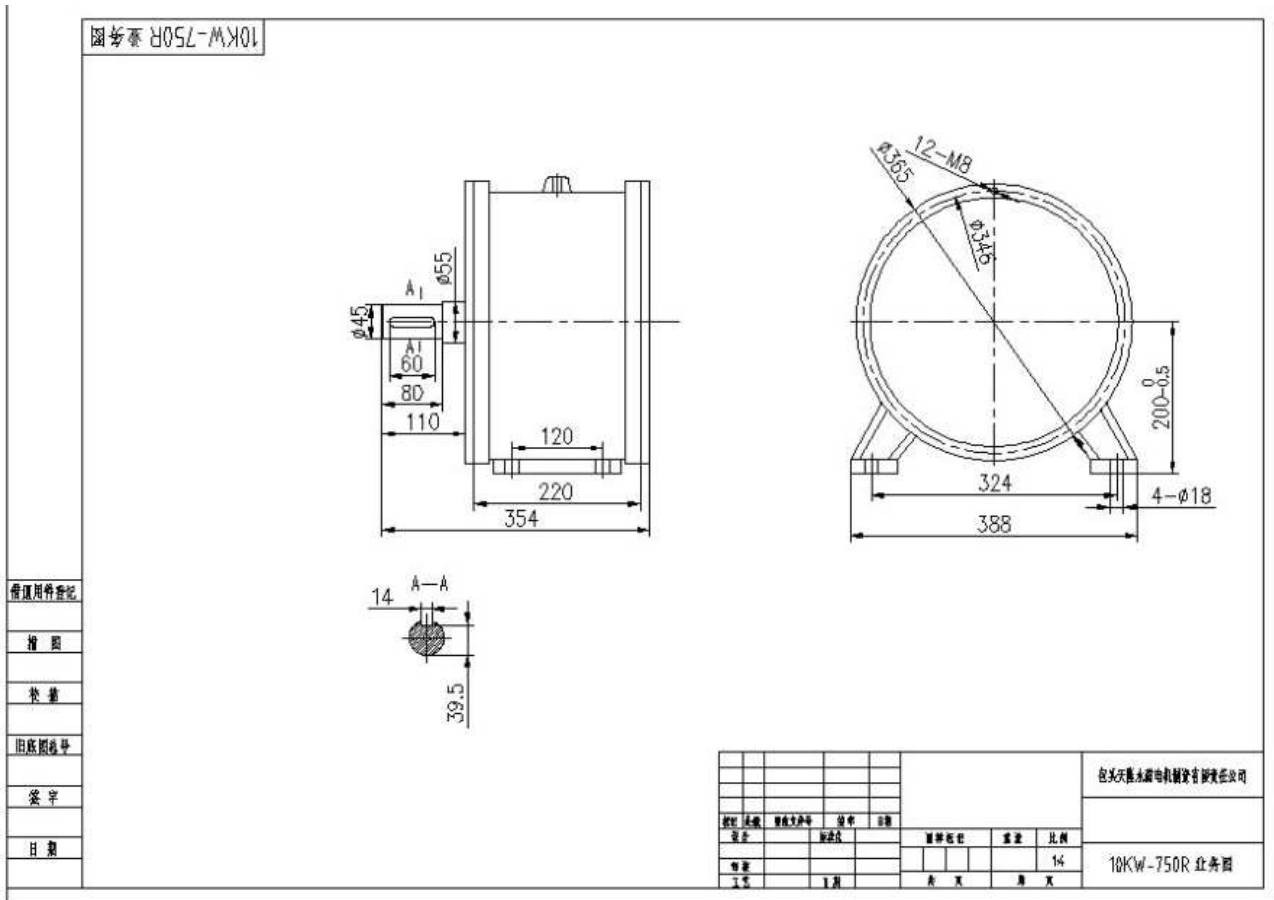
C.2. Especificaciones técnicas del generador (toda la información que da el fabricante)

10KW/750rpm/AC380V

Data Sheet :

1. Technical Details	
Rated Power(KW):	10
Rated Speed(RPM):	750
Rated Torque(N*M):	127.33
Rated Voltage(V):	AC380
Rated Current(A):	15.2
Insulation Class:	F
Efficiency (> %) :	88
PMG Collocation:	Y Connection, Three Phase Three Wires, Alternator
Service Life:	More Than 20 years
Working Environment:	-25Centigrade—40 Centigrade
Speed Range:	0-900rpm
2. Mechanical Details	
Mounting Means :	Horizontal
Weight(Kg) :	130
Start Torque(< N*M) :	2.2
3. Material Details	
Shaft Material:	40Cr Steel with quenching and tempering Treatment

Bearing:	C&U or for your order
Shell Material:	Casting
Winding Temperature Class:	150 Centigrade
Permanent Magnet Material:	Rare Earth NdFeB
Permanent Magnet Material Temperature Class:	150 Centigrade
Core:	High Grade Cold Rolling Silicon Sheet 50WW470
Protection Grade:	IP54

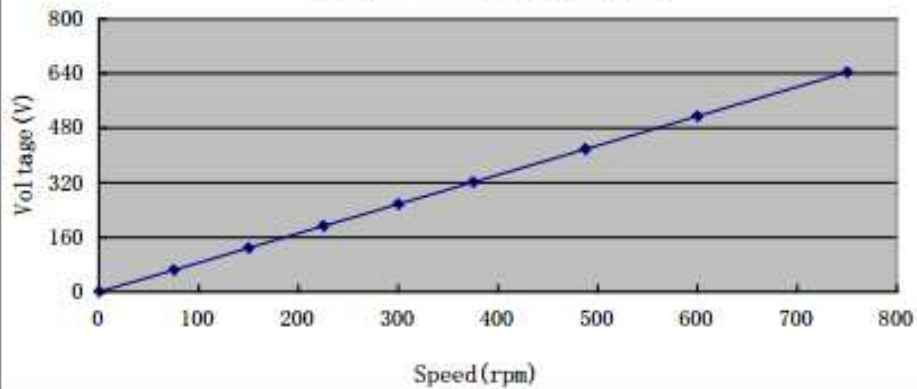




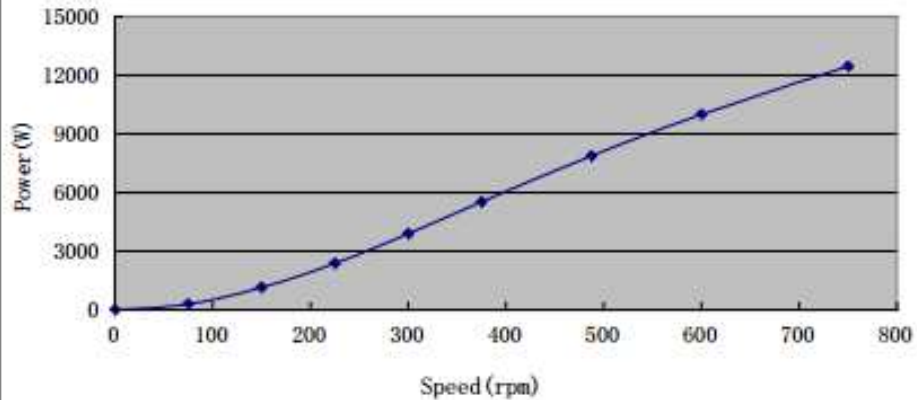
Test Report of 10KW PMG

Item	Guid Line of Design										
Rotation Speed (rpm)	750	0	75	150	225	300	375	487.5	600	750	
No-Load Test											
No-Load AC Voltage(V)	≥AC380	0	64.1	128.5	193	257.3	321.5	418.2	514.7	643.5	
Load Test											
AC Voltage(V)	AC380	0	57.5	113.8	167	214.1	255.8	305.1	344.3	380.7	
AC Current(A)	15.19	0	3.04	5.80	8.22	10.50	12.46	14.90	16.76	18.90	
Power (W)	10000	0	303	1143	2378	3894	5520	7874	9994	12462	

No Load Voltage VS RPM Curve



Load Power VS RPM Curve

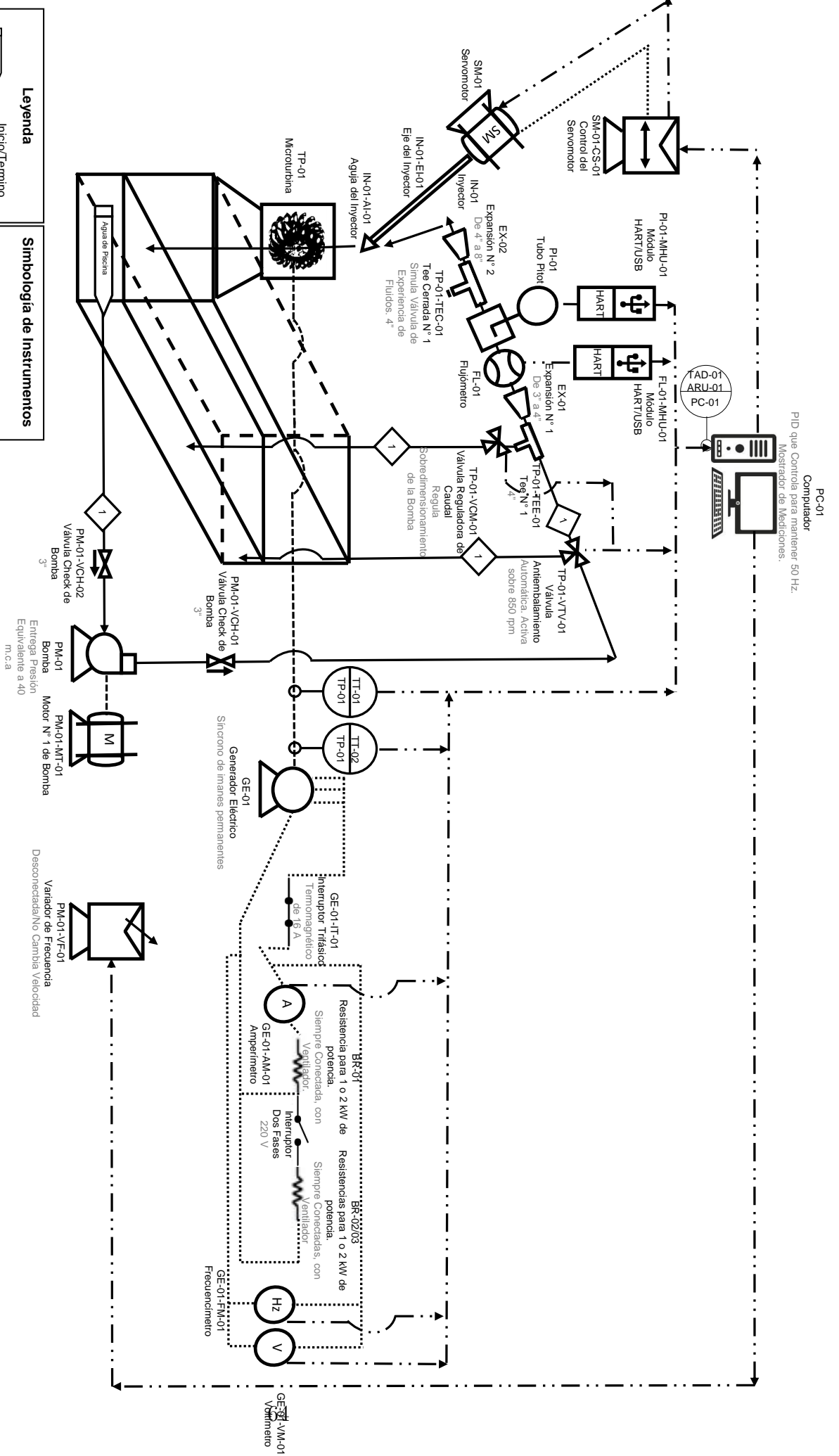


Anexo B

Planos P&ID del laboratorio.

Información se muestra en página siguiente.

Página intencionalmente dejada en blanco.



Leyenda

- Iniciador/Termino de Flujo
- Línea Hidráulica
- Línea de Corriente
- Línea de Señal/Control
- Eje Mecánico
- Número de Flujo

Simbología de Instrumentos

XX: Código de Instrumento
 YY: Número Correlativo
 ZZ: Conjunto de Equipo que pertenece

Corrientes	1
Descripción	Agua de Piscina

Sensores/Actuador	Señal	Ubicación
Tarjeta de Adquisición de Datos / Arduino UNO	Entrada	Interior CPU y Caseta
Tacómetro	Entrada	Eje del Conjunto Turbina - Generador
Torquímeter	Entrada	Eje del Conjunto Turbina - Generador

Punto de Control	
Entrada de Datos a CPU / Entrada y Salida de Datos a CPU	Entrada
Eje del Conjunto Turbina - Generador	Entrada
Eje del Conjunto Turbina - Generador	Entrada

Plano de Diagrama P&ID

Proyecto: Control Electrónico de una Micro Central Hidráulica.

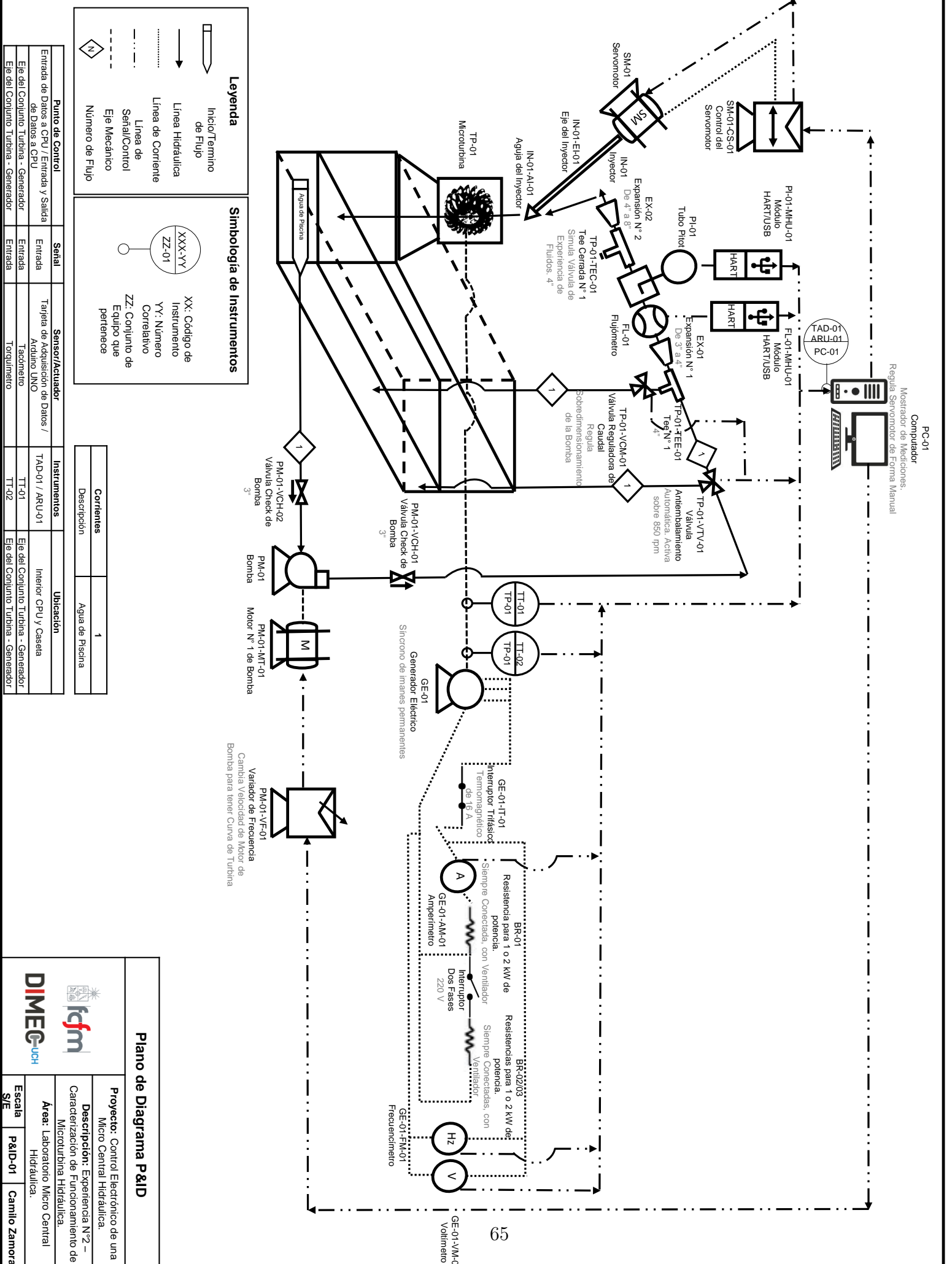
Descripción: Experiencia N°1 - Control Automático de Micro Central para Generación Distribuida a 220 V y 50 Hz.

Área: Laboratorio Micro Central Hidráulica.

Escala: P&ID-01

Camilo Zamora





Legenda

- Iniciador/Termino de Flujo
- Línea Hidráulica
- Línea de Corriente
- Línea de Señal/Control
- Eje Mecánico
- Número de Flujo

Simbología de Instrumentos

XX: Código de Instrumento
 YY: Número Correlativo
 ZZ: Conjunto de Equipo que pertenece

Corrientes	1
Descripción	Aguada de Piscina

Punto de Control	Señal	Sensor/Actuador	Instrumentos	Ubicación
Entrada de Datos a CPU / Entrada y Salida de Datos a CPU	Entrada	Tarjeta de Adquisición de Datos / Actuator UNO	TAD-01 / ARU-01	Interior CPU y Caseta
Eje del Conjunto Turbina - Generador	Entrada	Tacómetro	TT-01	Eje del Conjunto Turbina - Generador
Eje del Conjunto Turbina - Generador	Entrada	Torquímeter	TT-02	Eje del Conjunto Turbina - Generador

Plano de Diagrama P&ID

Proyecto: Control Electrónico de una Micro Central Hidráulica.

Descripción: Experiencia N°2 - Caracterización de Funcionamiento de Microturbina Hidráulica.

Área: Laboratorio Micro Central Hidráulica.

Logos: DIMEG-UCH, ifm

Escala: P&ID-01
S/E: Camilo Zamora

Anexo C

Pruebas de torque.

Para poder comprar el servomotor requerido con el fin de mover electrónicamente el inyector de las soluciones utilizadas, se realizan pruebas de torque, ya que, la referencia utilizada de 14 - 28 [Nm] por parte de [1], entregaba cotizaciones de servomotores de gran potencia, pudiendo superar en muchas ocasiones a la mitad de la potencia nominal generada por la microcentral.

Por lo tanto, se realizan pruebas de torque a través de un torquímetro de reloj que mide desde 0 [Nm] hasta 30 [Nm], posee un brazo de 100,5 mm y no fue requerido extensión de este, por ende, el torque medido es el torque real requerido para girar el eje del inyector.

Para las pruebas se considera el torque máximo, que se produce al inicio, luego el torque medio, producido al momento de continuar con el movimiento de giro del eje del inyector, y el torque mínimo generado al momento en que el movimiento de giro es constante.

Además, se toman en cuenta realizar cuatro mediciones para dos ángulos distintos respecto a la horizontal. Ángulo de 90°, ángulo para el peor caso en que se requiere la mayor cantidad de torque posible, y ángulo de 45°, ángulo en el cual se encontrará el eje del inyector.

Entonces, los resultados de las pruebas del ángulo de 90° y del ángulo de 45° se observan en las tablas siguientes, C.1 y C.2.

Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Prueba 4	
Tipo	Torque [Nm]	Tipo	Torque [Nm]	Tipo	Torque [Nm]	Tipo	Torque [Nm]
Máximo	4,0	Máximo	3,0	Máximo	2,0	Máximo	2,5
Medio	2,0	Medio	1,5	Medio	1,5	Medio	1,5
Mínimo	0,5	Mínimo	0,5	Mínimo	0,5	Mínimo	0,5

Tabla C.1: Pruebas de torque para ángulo de 90°.

Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Prueba 4	
Tipo	Torque [Nm]	Tipo	Torque [Nm]	Tipo	Torque [Nm]	Tipo	Torque [Nm]
Máximo	1,0	Máximo	1,0	Máximo	1,2	Máximo	1,0
Medio	0,5	Medio	0,7	Medio	0,7	Medio	0,7
Mínimo	0,0	Mínimo	0,5	Mínimo	0,5	Mínimo	0,5

Tabla C.2: Pruebas de torque para ángulo de 45°.

Anexo D

Memoria de cálculo

Cabe destacar que la bomba fue entregada como regalo al laboratorio, por lo tanto, no se necesitó un cálculo para su compra.

D.1. Modelo de conjunto microturbina - generador

Con el fin de obtener las variables requeridas para modelar, se deben utilizar los datos siguientes:

$$\eta_{\text{global}} [\%] = 70.$$

$$Q_{\text{base}} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] = 0,035.$$

$$h_{\text{base}} [\text{m}] = 40.$$

$$\eta_{\text{el}} [\%] = 60.$$

$$\cos(\varphi) = 0,83$$

$$D [\text{in}] = 6.$$

$$L [\text{m}] = 17.$$

Entonces, utilizando las ecuaciones 1.1 y 1.4, se tiene que la microturbina hidráulica entrega una potencia de 9,6 [kW].

Luego al usar las ecuaciones 1.6 y 1.7, se obtiene que el generador entrega una potencia de 8,54 [kW].

Por otra parte, al saber que requerimos una frecuencia de 50 [Hz] y se tienen 8 polos por parte del generador, se obtiene la velocidad de rotación del conjunto, a través de ecuación 2.1.

Lo que entrega un resultado de $\omega = 78,54 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$.

Además, sabiendo el diámetro de las tuberías, justo cuando va a entrar al acople del inyector, se obtiene que el A es $0,01824 \text{ [m}^2\text{]}$ y Tw equivale a $0,083124329$.

Por lo tanto, con todos estos resultados, se realizan las simulaciones tomando en cuenta como una entrada de referencia $\omega = 78,54 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$, y las constantes Tw= $0,083124329$, potencia mecánica de $9,6 \text{ [kW]}$ y potencia eléctrica de $8,54 \text{ [kW]}$.

D.2. Servomotor

Para poder comprar el servomotor se deben conocer los valores nominales requeridos de potencia, velocidad de rotación en [RPM] y torque.

Ante las pruebas de torque realizadas, se tiene que para disposición de uso del servomotor con el inyector, se requiere un torque máximo de $1,2 \text{ [Nm]}$. Pero considerando el peor caso, se requiere un torque máximo de 4 [Nm] . Ante ello, y tomando en cuenta un factor de seguridad debido a que las mediciones se realizan sin agua, se tiene que el servomotor requiere de un torque de 10 [Nm] máximo de diseño, siendo nominales 4 [Nm] .

Posteriormente, con la ecuación 1.12, se obtiene el #vueltas = 10, ya que, $l_{hilo} = 50 \text{ [mm]}$ y $p = 2 \text{ [mm]}$.

Luego, utilizando la ecuación 1.11, se obtiene $\omega_s = 150 \text{ [RPM]}$, pues $\tau_s = 10 \text{ [s]}$. Se requiere que desde que la aguja del inyector se encuentre totalmente abierta hasta que se encuentre totalmente cerrada se demore a lo más 1 [s] por vuelta, al tener 10 vueltas, son 10 [s] en total.

Entonces, conociendo el torque máximo y mínimo y ω_s , se puede obtener la potencia usando la ecuación 1.13, resultando una P_s mínima de $62,8 \text{ [W]}$ y máxima de 157 [W] .

Por lo tanto, al tomar en cuenta la potencia del servomotor, y revisar por catálogos las velocidades de rotación del servomotor con los coeficientes de las cajas de reducción, se tiene para el servomotor elegido, por motivos de precio, lo siguiente:

$$\omega_s = 3000 \text{ [RPM]}.$$

$$T_{s, \text{ nominal}} \text{ [Nm]} = 0,64.$$

$$P_s \text{ [W]} = 200.$$

Con tales datos y sabiendo que el $C_{cr} = 20$, reemplazamos en las ecuaciones 1.14 y 1.15 y se obtiene lo siguiente:

$$T_{s-cr} = 12,8 \text{ [Nm]}.$$

$$\omega_{s-cr} = 150 \text{ [RPM]}.$$

Encontrándose en la velocidad de rotación deseada, y teniendo un torque mayor al torque máximo fijado. Teniendo un torque de 12,8 [Nm] el servomotor comercial, significa que posee un factor de seguridad de 3,2 para el peor caso del uso del inyector en ángulo de 90° y de un factor de 5,33 para el torque máximo con ángulo de 45° . Por lo tanto, el servomotor comprado cumple con los requerimientos de diseño de la solución.

Anexo E

Información de Servomotor y Controlador entregada por proveedor.

El servomotor y controlador fue comprado a la empresa HongJun, disponible en <http://www.gearmotor-china.com/>. Este servomotor es el modelo Z5BLD200-24GU-30S de propiedades 200 W, 24 VDC, 3000 RPM, 9,6 A, Clase B y posee una caja reductora de velocidad, de modelo 5GU 20KB.

El servomotor se puede apreciar en las figuras E.1 y E.2 en las páginas que siguen, al igual que sus datos y planos comerciales con el controlador.

低压无刷直流减速电机 LOW VOLTAGE BLDC MOTOR

200W

□ 90mm



电机性能参数 Motor performance parameters

型号/Model	电压/Voltage	额定功率/Rated Power	空载参数/No-load Parameters	负载参数/Load Parameters	电机寿命/Motor Life	电机重量/Motor Weight
Z59LD200-24U	24	200	转速/Speed RPM	力矩/Torque N.m	H	1.8
Z59LD200-36U	36	200	MAX 0.80	3000	10.5	>5000
Z59LD200-48U	48	200	MAX 0.65	3000	7.0	>5000
			MAX 0.45	3000	0.64	>5000
					5.2	1.8

● 电机电压、功率及转速可在额定尺寸等条件下根据客户要求定制。
 ● Motor voltage, power and speed will be customized according to the requirement under the allowed circumstance of adaptable dimension.

种类 TYPE

电机类型	型号/Model	减速器类型	减速器型号	减速比
行星轴型	Pinion Shaft	行星轴型	Round Shaft	3, 3.6, 5, 6, 7.5, 9, 12.5, 15, 16, 25, 30, 36, 50, 60, 75, 90, 100, 120, 150, 180, 200
长寿命、低噪音	Z59LD200-24GU	行星轴型	Round Shaft	
长寿命、低噪音	Z59LD200-36GU	行星轴型	Round Shaft	
长寿命、低噪音	Z59LD200-48GU	行星轴型	Round Shaft	
长寿命、低噪音	Z59LD200-24GU	行星轴型	Round Shaft	
长寿命、低噪音	Z59LD200-36GU	行星轴型	Round Shaft	
长寿命、低噪音	Z59LD200-48GU	行星轴型	Round Shaft	

装有减速器时的容许转矩 Allowable torque when being with gearhead

- 减速器·中间减速器另售
- 减速器型号中的□中为减速比的数值。
- □表示与电动机同一方向运转，其他则为相反方向。
- 转速是以电动机的额定转速为基准除以减速比而算出来的数值。实际转速将随负载大小变化而比所示数值减少2%-20%左右。
- 希望以大于下表中的减速比进行进一步减速时，可在电动机与减速器之间安装中间减速器。这时的容许转矩为20Nm
- Gearhead and mid-gearbox can be sold separately.
- Enter the gear ratio in the box (□) within the model name.
- □ Indicates the same rotating direction of the motor while the others rotate in the opposite direction.
- The speed is calculated by dividing the motor's synchronous speed by the gear ratio. The actual speed is 2%-20% less than the displayed value depending on the size of the load.
- To reduce the speed beyond the gear ratio in the table, attach a mid-gearbox (gear ratio: 10) between the gearhead and motor. In that case, the permissible torque is 20N.m.

容许转矩单位 Allowance Torque Unit: 上段 Upside (Nm) / 下段 Downside (kg·cm)

减速比/Gear Ratio	3	3.6	5	6	7.5	9	12.5	15	18	25	30	36	50	60	75	90	100	120	150	180	200
输出轴转速/Output shaft speed	1000	833	600	500	400	333	240	200	167	120	100	83	60	50	40	33	30	25	20	17	15
输出轴力矩/Output torque	1.55	1.86	2.58	3.09	3.87	4.64	5.81	6.97	8.37	10.51	12.61	15.13	20	20	20	20	20	20	20	20	20
允许力矩/Allowance torque	15.79	18.94	26.58	31.87	39.47	47.36	59.28	71.14	85.37	107.2	128.6	154.4	204	204	204	204	204	204	204	204	204

容许过载 容许轴向负载 Permissible Overturning load and thrust load

电动机 (圆轴型) → P42 电机 (圆轴型) → P42
 减速器 → P42 齿轮 → P42

- 减速器的容许负载惯性矩 J Permissible load inertia J for gearhead
- P42页 → P42

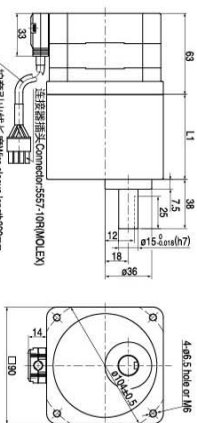
外形图(单位 mm) Dimensions (Unit mm)

减速器附有安装用螺丝。Mounting screws are included with gearhead.

电动机型号/Motor Model	减速器型号/Gearhead type	速比/Gear Ratio	L尺寸/Dimension
Z59LD200-24GU	5GU□K(B)	3-200	65.5
Z59LD200-36GU	5GU□K(B)	3-200	65.5
Z59LD200-48GU	5GU□K(B)	3-200	65.5

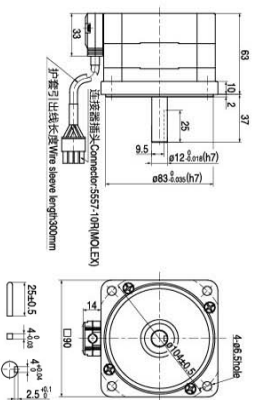
- 减速器型号中的□中为减速比的数值
- Enter the gear ratio in the box (□) within the model name

- 引线型 Lead wiring Type
重量 Weight: 电动机 Motor: 1.6kg 减速器 Gearhead 1.5kg



圆轴型的转轴部分 Shaft Section of Round Shaft Type

除重量及轴径外，电动机外形与轴轴型相同。Excluding weight and the shaft section Motor shape are the same as those of the pinion shaft.

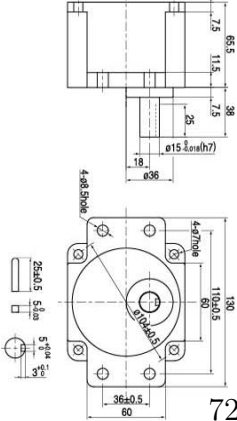


接线插孔对应信号说明 Wire pinhole corresponding signal explanation

pinhole	1	2	3	4
signal	U	W	Hv	Hu
pinhole	5	6	7	8
signal	V	GND	Hw	Vdc

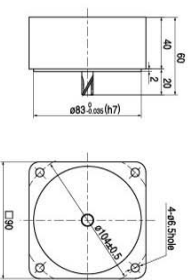
凸缘安装型减速器 Flange Mounting Reducer

可安装在GU齿形轴型上。Can be Mounted on GU Type gear shaft 5GU□K
 重量 Weight: 1.5kg



中间减速器 Mid-gearbox

可安装在GU齿形轴型上。Can be connected to GU pinion Shaft type 5GU10XK
 重量 Weight: 0.65kg



BLD-300B Brushless DC Motor Drive



Description

The BLD-300B BLDC motor drive is a high performance, cost-effective 3 phase BLDC motor drive, which can provide power output Max 300VA. The design is based on advanced DSP technology and feature high torque low noise, low vibration, PID speed loop, PID current loop, over current protection, over load protection and a combined use of manual speed adjustment and automatic speed adjustment.

Connection Definition

Mark	Definition
DC+/DC-	DC Power Input (DC24V~DC48V)
U,V,W	Motor Lead Wire
Hu,Hv,Hw	Hall Sensor Lead Wire
REF+	Hall Sensor Power Supply +
REF-	Hall Sensor Power Supply -
VCC	External Potentiometer Power Supply (Internal Power Supply Only)
SV	External Potentiometer (No Connection When Adjusting Speed With Internal Potentiometer) or Pulse Rate In Note①
COM	Common (Low Level/Ground)
F/R	Direction: Low Level/CCW High Level or No Connection/CW Note ②
EN	Enable: High Level/Stop Low Level/Run Note ②
BRK	Quick Brake: High Level/Stop Low Level/Run Note ②
SPEED	Speed Signal Output
ALARM	Alarm Signal Output

Note①: Potentiometer/10K Ω or analog signal DC 0V~+5V (Change internal switch J1/DC0-10V). Turn off the internal potentiometer RV when using an external potentiometer to adjust the motor speed.

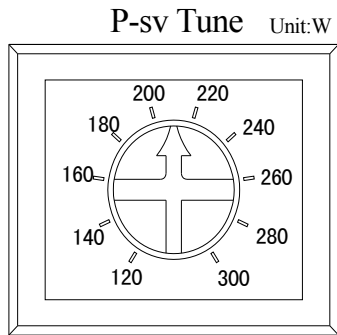
Note②: High level/5V (5mA)

Electrical Specifications

Parameter	Min	Rated	Max	Unit
-----------	-----	-------	-----	------

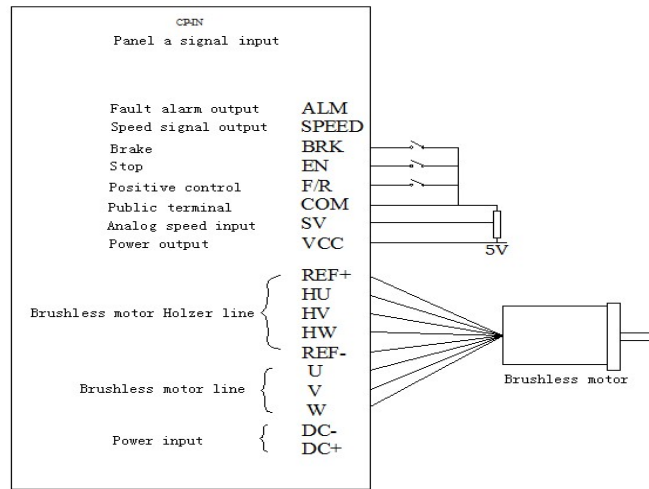
Motor Hall Sensor Angle	120°/240°			
DC Power Input	18	48	50	V
Drive Current Output	0	15	35	A
Suitable Motor Speed	0		20000	rpm
Hall Sensor Voltage	4.5	5	5.5	V
Hall Sensor Current		20		mA
External Potentiometer		10K		Ω

Peak Power Output Setting:

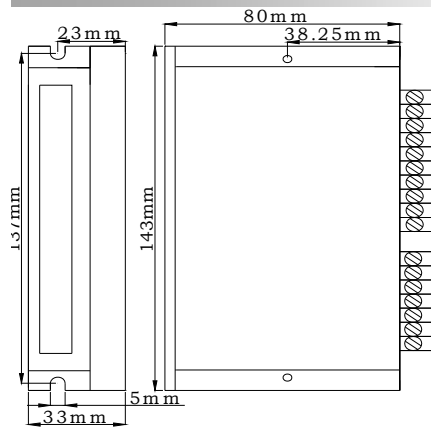


Note: To protect the motor, set the arrow number as the same as the motor nominated power. Whenever overload occurs the drive will turn out to be the protection mode.

Connection:



Mechanical Drawings:



Speed Adjustment Instruction:

- **Motor Speed Adjusted By The Internal Potentiometer RV:**

When using an external potentiometer speed control (potentiometer center tap connected to SV, a termination REF +, the other end of COM) (internal potentiometer RV Close)

Use an external analog voltage 0 ~ 5V input motor speed adjustment: (internal potentiometer RV Close)

Use an external 0 ~ 10V analog voltage input for motor speed regulation: (internal potentiometer RV closed, appropriate adjustments SV CONTROL precision potentiometers)

using an external PWM input for motor speed adjustment: pulse duty cycle of 10% -90 % , the speed linear regulator . Pulse frequency : 1K-10KHZ, pulse amplitude : 5V (internal potentiometer RV Close)

PID closed-loop control of the motor drive fast response settings: OP / CL short (user settings): PID closed-loop control - Motor rapid response

OP / CL OFF (factory setting) : No PID closed loop control - motor common response

- **Motor Speed Signal Output:**

Connecting SPEED and COM to get pulse output $F=N*P/60$

F—Pulse output frequency

P—Pole number of BLDC motor

- **Drive Alarm Output:**

When drive alarm, it will break over with the port of COM and be low level. The drive stop to work and alarm light run.

- **Lead Wire Connection:** Take care of the sequence of U,V,W

Motor Parameter set by ICAN BLDP-01 (Optional) :

- **RS232 Communication Interface CP-in**

The BLD-300B BLDC motor drive support RS232 communication

Protocol to set motor run-up time, etc. When choose ICAN BLDP-01 as host controller, the operating process and instruction as below:

- **ICAN BLDP-01 Motor Setting Panel Operating Process:**
Connect to CP-in (BLD-300B)

BLDP-01 Parameter Setting Table:

Function code	Mode	Setting range	Unit	Factory setting	Alteration
P000	Control mode	00 BLDP-01 control 01 None Panel control		None Panel control	★
P001	Panel setting speed	0~Rated speed	RPM		★
P002	Run-up time	0.1~9.9	S	0.2	★
P003	Motor pole number setting	1~99	Pole pairs	4	★
P004	CW CCW	01 CW 00 CCW		01	★
P005					Reserved
P006					Reserved

- **BLDP-01 Panel Setting Process:**
 1. Turn on the power supply, press <Set> to stop the motor
 2. Press <▲> or <▼> to choose the mode you need (Press Esc return and motor running)
 3. Press <Set> enter into parameter mode (Press Esc return and motor running)
 4. Press <◀> or <▶> to change the parameter (flashing)
 5. Press <Set> to reserve, parameter stop to flash. Press <Esc> return and motor running.

Panel Protection Mode:

When the system running, panel nixie light shows **Err**×

Err0 represents Over-voltage or Over-temperature protection

Err1 represents Over-current protection
Err2 represents Hall sensor error protection

● **Motor Parameter set by other host controller:**

BLD-300B Communication Protocol (RS232)

1. Communication Interface:

Asynchronous serial communication

Baud rate: 2400

Start bit: 1 bit

Stop bit: 1 bit

Data bit: 8 bits

Even/odd parity: none

Communication interface voltage: 3.3V

2. Communication Protocol:

Function1: Motor speed controlled by drive BLD-750 itself

Communication format : "i"

Instruction: send a character

Function2: Motor speed controlled by host computer

Communication format: "o"

Instruction: send a character

Function3: Motor speed set by host computer

Communication format: "v"0X00, 0X00

Instruction: send a character "v" then two hexadecimal numbers, the high 16bits, the low 16 bits

Function4: run-up time

Communication format: "y" 0X00

Instruction: send "y" then a hexadecimal number



Figura E.1: Servomotor con caja reductora de velocidad, orientación de frente.

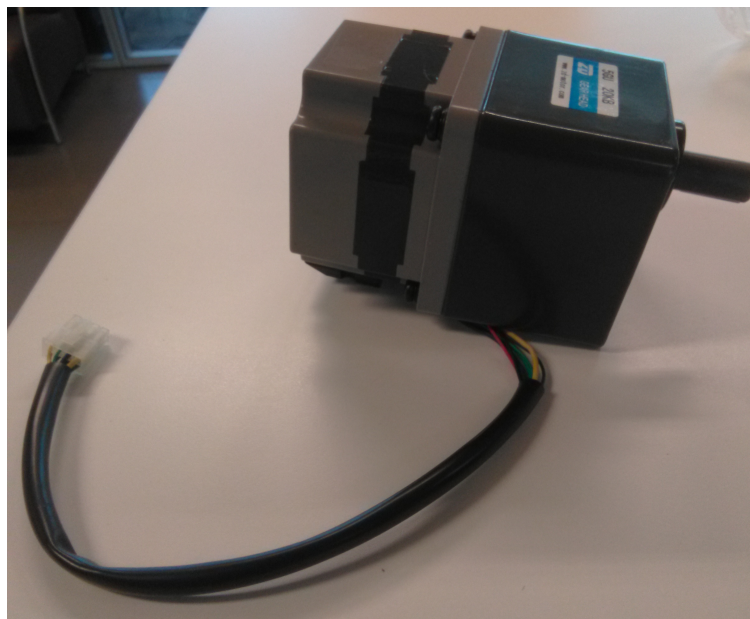


Figura E.2: Servomotor con caja reductora de velocidad, orientación de perfil.

Anexo F

Información de Analizador de Potencia y pinza amperimétrica entregada por proveedor.

Información se muestra en página siguiente.

Página intencionalmente dejada en blanco.



PCE Ibérica S.L.
C/ Mayor, 53 - Bajo
02500 Tobarra
Albacete-España
Tel. : +34 967 543 548
Fax: +34 967 543 542
info@pce-iberica.es
www.pce-iberica.es

Instrucciones de uso Analizador de potencia PCE-PA6000

- I. Introducción
- II. Especificaciones
- III. Funcionalidades
- IV. Preparación / medición
- V. Calibración / recalibración



I. Introducción

Lea atentamente la información que sigue, antes de comenzar con las mediciones. Utilice el multímetro solo de la forma descrita, caso contrario se extingue la garantía.

Condiciones Humedad ambiental máx. = <80 % H.r.
Rango de temperatura ambiental = 0 ... +50 °C

Las reparaciones en el analizador de potencia deben ser efectuadas exclusivamente por PCE Group. Por favor, mantenga el analizador de potencia limpio y seco. El aparato cumple con las normativas y estándares válidos y está certificado (CE). El medidor cumple la EN61010-1, CATII 600V. Esta pensado para uso en interiores.

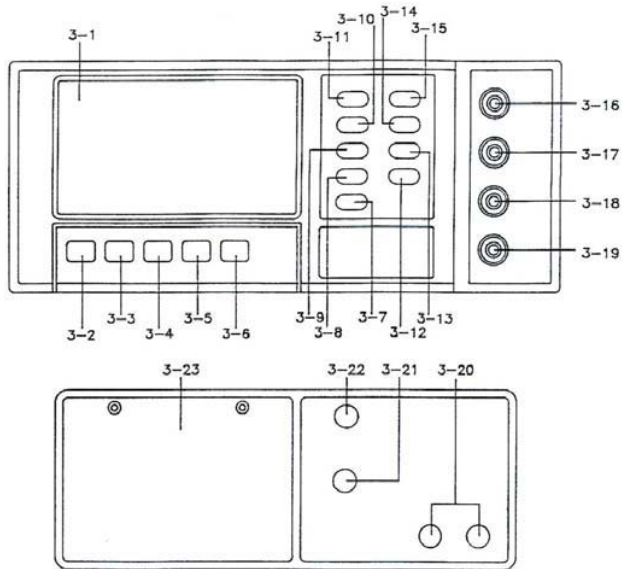
Por favor, tenga en cuenta los siguientes puntos:

- Tenga en cuenta la advertencia en el analizador de potencia
- No exponga el aparato a temperaturas y humedades extremas, ni tampoco permita que se moje
- Evite sacudidas extremas
- No use el medidor en presencia de gases o vapores inflamables ni disolventes
- Antes de ponerlo en funcionamiento el aparato debe estabilizarse a la temperatura ambiental
- Los trabajos de reparación y mantenimiento del aparato deben ser efectuados únicamente por técnicos cualificados de PCE-Group.
- Retire las puntas y el adaptador de medición del objeto a medir antes de cada cambio de rango de medición.
- Antes de cada medición debe verificar si existen daños en las líneas de prueba y el adaptador de medición.
- No apoye el medidor con su parte frontal contra la superficie de trabajo para evitar posibles daños en el dispositivo de mando.
- No efectúe ningún cambio técnico al analizador de potencia.
- Tenga en cuenta cada vez que maneja el aparato el riesgo mortal de una descarga eléctrica.**

II. Especificaciones

Función	Rango de medición ; Precisión ; Resolución
Medición de potencia activa (AC, potencia con valor real), medición directa	1 W ... 6 kW; 1 W; $\pm 1,5\%$ + 1 dígito
Medición de potencia activa (AC, potencia con valor real), a través del adaptador de pinzas o convertidor de corriente	1 W ... 999,9 kW; 1 W; $\pm 1,5\%$ + 1 dígito
Medición de potencia aparente (AC)	0,01 VA ... 9,999 kVA; 0,01 VA; $\pm 1,5\%$ + 1 dígito
Factor de potencia ($\cos \phi$)	0,00 ... 1,00; 0,01; $\pm 1,5\%$ + 2 dígitos
Contador kWh	0,001 Wh ... 9999 kWh; 0,001 Wh; $\pm 1\%$ + 1 dígito
ACV TRUE RMS / DCV	0,1 V ... 600 V; 0,1 / 1 V; $\pm 1\%$ + 1 dígito
ACA TRUE RMS / DCA	máx. directo 10 A; 10 mA, con punta de sonda por inducción máx. 1000 A; 1 A; $\pm 1\%$ + 1 dígito
ACA TRUE RMS con convertidor de corriente	hasta 2000 A (según la pinza utilizada)
Frecuencia	10,0 ... 999 Hz; 0,1 Hz; 1 % + 1 dígito
Ohmios	1 Ω ... 19,99 k Ω ; 1 / 10 Ω ; $\pm 1\%$ + 1 dígito
Velocidad de muestreo	W, VA, ACA, ACV, COS Phi, Hz: 1,5/s DCV, DCA, Ohmios: 1/s
Pantalla	- Pantalla LCD multifuncional de 93 x 52 mm
Conexión a PC	Puerto RS-232
Condiciones ambientales	máx. 80 % humedad relativa / 0 ... +50 °C
Alimentación	6 x baterías 1,5 V AA o componente de red 9 V / 500 mA
Dimensiones	280 x 210 x 90 mm
Peso	1600 g

III. Funcionalidad



- 3-1. Pantalla LCD
- 3-2. Interruptor de alimentación
- 3-3. Conmutador para AC V/A/W
- 3-4. Conmutador para DC V/A
- 3-5. Conmutador para ohmios
- 3-6. Conmutador para entrada de corriente
- 3-7. Interruptor para W / VA / Whr
- 3-8. Interruptor para puesta a cero vatios
- 3-9. Interruptor para COS Phi / Hz
- 3-10. Tecla de memoria para valor de cresta
- 3-11. Tecla de memoria para valor de medición
- 3-12. Interruptor para modo de corriente
- 3-13. " \leq " Tecla (ajuste de alarma)
- 3-14. " $>$ " Tecla (ajuste de alarma)
- 3-15. Interruptor de alarma
- 3-16. Enchufe de entrada para vatios
- 3-17. Enchufe de entrada para ohmios
- 3-18. Enchufe de entrada para COM
- 3-19. Enchufe de entrada para corriente (directo)
- 3-20. Enchufes de entrada para pinza de corriente (indirecto)
- 3-21. Enchufe de entrada para alimentación de corriente externa 9 V
- 3-22. Interfaz RS-232
- 3-23. Tapa de la batería

IV. Preparación de medición / medición

Conmutador para V/A/W

Use el interruptor para cambiar a rangos de medición de tensión, corriente o potencia AC (3-3).

Conmutador para V/A

Use el interruptor para cambiar a rangos de medición de tensión y corriente DC (3-4).

Conmutador para ohmios

Use el interruptor para cambiar a rango de medición de resistencia (3-5).

Conmutador para entrada de corriente (directa o indirecta)

Use el interruptor para seleccionar entre la entrada de corriente (10A) directa o la entrada indirecta de las pinzas de corriente (1000A) con AC y DC (3-6).

Tecla vatios/VA/Whr

Use el interruptor para seleccionar potencia activa, potencia aparente o el contador de vatios por hora (3-7).

Tecla de puesta a cero vatios

Pulse la tecla para la puesta a cero del indicador de vatios con entrada de señal abierta (3-8).

Tecla COS Phi/Hz

Use el interruptor para cambiar la indicación entre frecuencia (Hz) y COS Phi en el modo de medición de potencia activa (3-9).

Tecla Peak Hold (memoria del valor máximo)

Con la tecla PEAK (3-10) activa y desactiva el valor máximo memorizado. Cuando la función esté activada, en pantalla le aparece "PK.H". Esta función se puede utilizar solo en los rangos **AC** con potencia activa y aparente.

Tecla DATA HOLD (memoria de valores)

Con la tecla Data-Hold (3-11) activa y desactiva la memoria de valores. En la pantalla le aparece únicamente "Hold" cuando la función está encendida. Los valores de medición actuales se congelan en la pantalla. Esta función no se puede usar en la medición de resistencia.

Tecla CURRENT MODE (modo corriente)

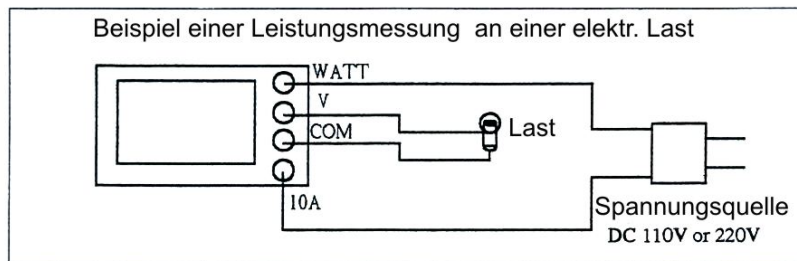
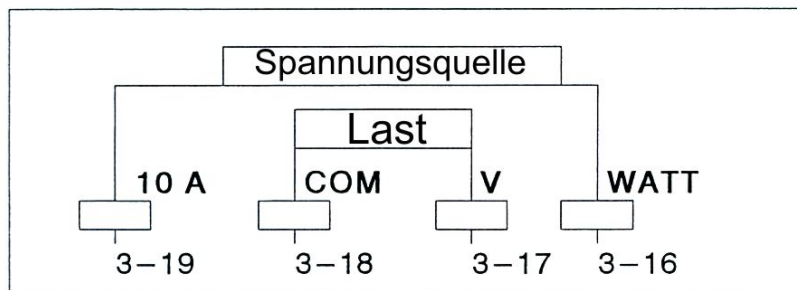
Mediante pulsar la tecla CURRENT MODE (3-12) conecta a medición (hasta 2000A) para convertidor de corriente industrial con relación de transmisión de 1000/5A o 100/5A. La indicación correspondiente aparece en pantalla.

ALARM SET / \rightarrow / \leftarrow - Teclas

Pulse la tecla ALARM SET (3-15), para llegar al modo de ajuste de alarma. Pulse una vez para "máx.", pulse nuevamente para "mín." y pulse una tercera vez para salir de este modo. Con la tecla " \rightarrow " (3-13) y la tecla " \leftarrow " (3-14) ajusta el valor límite máximo y mínimo de alarma. Esta función está solamente disponible en mediciones de potencia.

Medición AC vatios / V / A / PF / Hz

1. Encienda el aparato con el interruptor de corriente "3-2".
2. Seleccione con el conmutador "3-3" la función "AC V/A/WATT".
3. Seleccione con el conmutador de entrada de corriente "3-6" la función "DIREKT".
4. Accione la tecla puesta a cero de vatios "3-8" para poner a cero la indicación de vatios. Sólo entonces debe conectar el aparato con los adaptadores o cables de prueba.
5. Desconecte de la **corriente el objeto a medir**.
6. Conecte el medidor según el ejemplo a continuación. La carga sobre los conectores "3-17" y "3-18", la alimentación sobre los conectores "3-16" y "3-19".
7. Conecte la tensión de suministro **del objeto a medir**.
8. En la pantalla se muestran los valores de potencia tensión (TRUE RMS), corriente (TRUE RMS) y el factor de potencia simultáneamente. El **rango de medición máx.** en la medición directa de corriente es de **10A ACA** y **no debe ser rebasada**.
9. Con el interruptor COS Phi/Hz "3-9" puede conmutar en la pantalla entre COS Phi y Hz.



Medición AC VA / V / A / Hz

1. Para la medición de potencia aparente debe actuar como se describe en el párrafo anterior.
2. Pulse para cambiar a la medición de potencia aparente la tecla WATT/VA / WHR "3-7". En la pantalla LCD se le indicará la potencia aparente en "VA".
3. La indicación de frecuencia no puede ser cambiada en este modo a COS Phi.
4. Pulse nuevamente la tecla "3-7" para cambiar la medición del trabajo eléctrico (Whr). En la pantalla LCD se le indicará el trabajo en "Whr" y, además, analógicamente el tiempo transcurrido desde el inicio de la medición de trabajo.

Medición de tensión y corriente AC

1. Encienda el aparato con el interruptor de corriente "3-2".
2. Seleccione con el conmutador "3-3" la función "AC V/A/WATT".
3. Seleccione con el conmutador de entrada de corriente "3-6" la función "DIREKT".
4. Para la medición de tensión AC conecte el medidor con los conectores "3-17" rojo y "3-18" negro COM con la tensión a medir, y lea el valor en la pantalla.
5. Para la medición de corriente AC conecte el medidor con los conectores "3-19" verde 10A y "3-18" negro COM con la corriente a medir, y lea el valor de medición en la pantalla. El **rango de medición máx.** en la medición directa de corriente es de **10A ACA** y **no debe ser rebasada**.

Medición de tensión y corriente DC

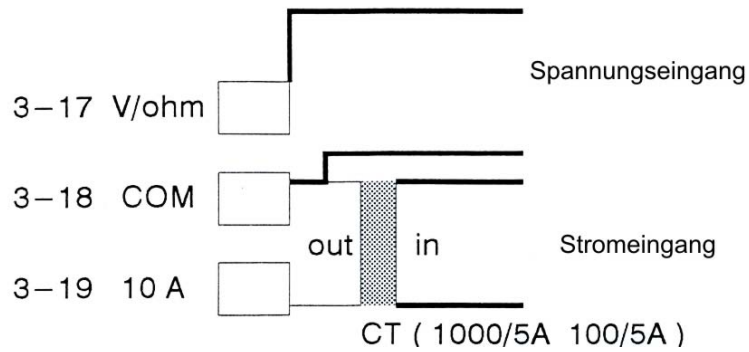
1. Encienda el aparato con el interruptor de corriente "3-2".
2. Seleccione con el conmutador "3-4" la función "DC V/A".
3. Seleccione con el conmutador de entrada de corriente "3-6" la función "DIREKT".
4. Para la medición de tensión DC conecte el medidor con los conectores "3-17" rojo y "3-18" negro COM con la tensión a medir, y lea el valor de medición en la pantalla.
5. Para la medición de corriente DC conecte el medidor con los conectores "3-19" verde 10A y "3-18" negro COM con la corriente a medir y lea el valor de medición en la pantalla. El **rango de medición máx.** en la medición de corriente directa es de **10A DCA** y **no debe ser rebasada**.

Medición de resistencia

1. Encienda el aparato con el interruptor de corriente "3-2".
2. Seleccione con el conmutador "3-5" la función "Ohm".
3. Para la medición de tensión DC conecte el medidor con los conectores "3-17" rojo y "3-18" negro COM con la tensión a medir, y lea el valor de medición en la pantalla.

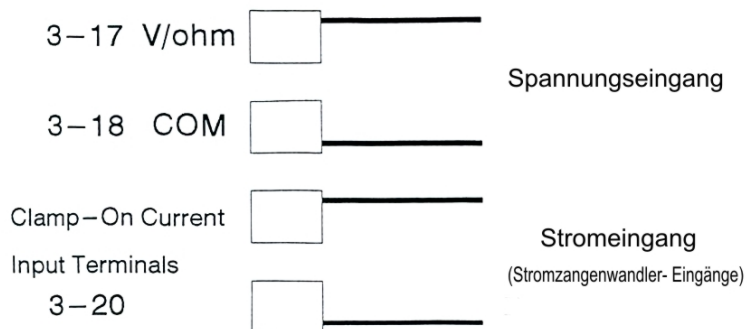
Medición AC vatios / VA / Whr con transductor industrial 1000/5A o 100/5A

1. Encienda el aparato con el interruptor de corriente "3-2".
2. Seleccione con el conmutador "3-3" la función "AC V/A/WATT".
3. Seleccione con el conmutador de entrada de corriente "3-6" la función "DIREKT".
4. Conecte el medidor según el ejemplo a continuación. Conecte la entrada de tensión a los conectores "3-17" y "3-18", la salida del transductor a los conectores "3-18" y "3-19".
5. Seleccione con la tecla CURRENT MODE "3-12" la relación de transmisión correspondiente del transductor. En pantalla se muestra "CT100/5A" o "CT1000/5A".



Medición con la pinza transductora AC vatios / VA / Whr

1. Encienda el aparato con el interruptor de corriente "3-2".
2. Seleccione con el conmutador "3-3" la función "AC V/A/WATT".
3. Seleccione con el interruptor de entrada de corriente "3-6" la función "CLAMP-ON". Se muestra en pantalla "clamp1000A".
4. Conecte el medidor según el ejemplo a continuación. Conecte la entrada de tensión a los conectores "3-17" y "3-18", el pinza transductora a los conectores "3-20".



Cambio de batería

Importante: Para impedir una descarga eléctrica verifique antes de intercambiar los cables que el aparato esté libre de tensión. Retire todas las líneas de medición antes de abrir el aparato.

Para cambiar la batería coloque el aparato con la parte frontal sobre una superficie suave y abra el el compartimiento de batería destornillando los tornillos en la parte posterior del aparato. Cambie la batería vacía por una nueva y atornille la tapa.

Cambio de fusible

Importante: Para impedir una descarga eléctrica verifique antes de intercambiar los cables que el aparato esté libre de tensión. Retire todas las líneas de medición antes de abrir el aparato.

Para cambiar el fusible coloque el aparato con la parte frontal sobre una superficie suave y abra la tapa del compartimiento de batería destornillando los tornillos en la parte posterior del aparato. Cambie el fusible defectuoso por uno idéntico y nuevo y atornille nuevamente la tapa.

Calibración / recalibración

Cualquier laboratorio acreditado puede realizar una calibración o recalibración del aparato. Por supuesto, también nos puede enviar el analizador de potencia regularmente a nosotros. Se le efectuará una calibración de laboratorio DIN ISO con un certificado de calibración al nombre de su empresa.

Encontrará una visión general de los instrumentos de medida aquí:

<http://www.pce-iberica.es/instrumentos-de-medida/instrumentos-medida.htm>

Encontrará una visión general de todos los medidores aquí:

<http://www.pce-iberica.es/instrumentos-de-medida/medidores.htm>

Encontrará una visión general de nuestras balanzas aquí:

<http://www.pce-iberica.es/instrumentos-de-medida/balanzas-vision-general.htm>

Para poder realizar la RAEEES (devolución y eliminación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos) retiramos todos nuestros aparatos. Estos serán reciclados por nosotros o serán eliminados según ley por una empresa de reciclaje.

WEEE-Reg.-Nr. DE64249495



Adaptador para pinza amperimetrica PCE-CA 502



Adaptador para mediciones indirectas de corriente hasta 1000A sin interrupción del conductor.

- Rango: 200 / 1000 DCA / ACA
- Señal salida: 0 - 1V DC
- Exactitud: $\pm 1,5 / 2 \%$
- DCA Output : 1 DCmV/1 DCA
- ACA Output : 1 ACmV/1 ACA
- DCA ajuste cero
- Dimensiones: 190 x 64 x 33 mm
- Diámetro del conductor maximo: 33,5 mm
- Alimentación: Pila 9V

Anexo G

Manual de Operaciones de Microcentral hidráulica.

Información se muestra en página siguiente.

Página intencionalmente dejada en blanco.

Manual Operación – Control Electrónico de Microcentral Hidráulica.

El control electrónico de la microcentral hidráulica se basa en controlar a través de un computador los instrumentos de medición, equipos y válvulas para dos experiencias, n°1 y n°2, y su sistema de seguridad antiembalamiento, nombrados en sección 1.10 “Problema a resolver” y en el capítulo 3 “Resultados”.

Para mayor entendimiento, en este manual se van a explicar nuevamente los equipos principales de la microcentral hidráulica, las experiencias n°1 y n°2, y su sistema de seguridad antiembalamiento. Luego se detallarán todos los elementos pertenecientes a la microcentral y al control electrónico, para posteriormente, explicar el detalle de cada uno con sus conexiones, y finalizando con la puesta en marcha y operación de cada experiencia.

1. Equipos principales de la microcentral hidráulica.

Los equipos principales son:

- Microturbina Pelton de 10 [kW] de potencia, 40 [m] de altura neta y 35 [l/s] de caudal nominal.
- Generador síncrono de imanes permanentes de 10 [kW] de potencia, 750 [RPM] de velocidad de rotación nominal, 900 [RPM] de velocidad máxima y 8 polos.
- Inyector donde su eje desplaza a la aguja, moviéndola entre 16 a 44 [mm] requiriendo un torque que fluctúa entre 0,5 a 4 [Nm] , de acuerdo con las pruebas de torque, anexo C, con un factor de seguridad de 3,2 comercialmente.

2. Experiencias y sistema de seguridad.

2.1. Experiencia n°1: Control automático de una microcentral hidráulica a través del control del caudal mediante el movimiento del inyector, a voltaje y frecuencia constante, y cargas eléctricas variables.

En esta experiencia se quiere obtener 220 [V] constantes y una frecuencia de 50 [Hz] con una tolerancia impuesta de 2%, entre 49 y 51 [Hz]. Mientras se varían las cargas eléctricas (resistencias) de la microcentral.

Siendo más específicos, al generador eléctrico de la microcentral hidráulica se le van conectando y desconectando cargas eléctricas, en este caso estufas, para simular el consumo de las conexiones eléctricas de un domicilio. Estas sucesiones de hechos afectan la potencia mecánica que debe suministrar la microturbina hidráulica al generador. La cual debe disminuir al momento de desconectarse estufas o aumentar al momento de conectarlas, con el fin de obtener 220 [V], siempre constantes, y entre 49 y 51 [Hz] en menos de 10 [s].

Por lo tanto, el voltaje se asume constante debido a que la conexión de las estufas es delta, monofásica, y que la altura es fija de 40 [m]. Pero la frecuencia, se debe controlar, realizándose mediante el caudal suministrado a la microturbina, que es controlado por el movimiento del inyector, específicamente su aguja. Este control, se realiza a través de un servomotor y su controlador asociado.

2.2. Experiencia n°2: Caracterización del funcionamiento de una microturbina hidráulica Pelton.

En esta experiencia se quiere obtener los distintos puntos de las curvas de funcionamiento de potencia, rendimiento y altura vs caudal, con el voltaje y la frecuencia del generador eléctrico variables.

Para realizarla se controla la altura y el caudal que se suministra al sistema hidráulico de la microcentral mediante una bomba que se controla por un variador de frecuencia, el cual se entrega parámetros de un computador. Y a su vez, se controla el caudal que ingresa a la microturbina digitando en un computador la posición del servomotor. Siendo un control semi - manual.

Además, el voltaje y frecuencia eléctrica no es importante, dejándose de forma variable para así sólo medir los parámetros de la microturbina hidráulica y no del generador eléctrico.

2.3. Sistema de seguridad: Es un sistema de seguridad antiembalamiento que actúa cuando el conjunto microturbina - generador sobrepasan los 850 [RPM] de velocidad de giro. Es para evitar el embalamiento de ellos y que sobrepasen los 900 [RPM] máximos de velocidad del generador.

Este sistema de seguridad consta de una válvula automática que es controlada mediante un computador el cual entrega un voltaje de 3 – 5 [V] para abrir o cerrar la compuerta de la válvula con el fin de desviar el agua que va a los instrumentos y al conjunto microturbina – generador. Este voltaje se amplía mediante un relé de estado sólido para 24 V para que actúe la válvula.

Por lo tanto, el computador tiene en el programa LabVIEW un comparador de velocidad de giro que indica que al sobrepasar los 850 [RPM] actúe la válvula enviando el agua de vuelta a la piscina de almacenamiento.

3. Elementos pertenecientes a la microcentral hidráulica.

Los elementos pertenecientes a la microcentral hidráulica consta de instrumentos de medición, válvulas, equipos de control como un variador de frecuencia, un servomotor con su controlador asociado, los equipos principales, entre otros. Todos ellos son los siguientes:

- Computador con tarjeta de adquisición de datos para poder almacenar y analizar los datos obtenidos con el fin de ser parte de la automatización para la experiencia n°1 o en la interfaz semi manual para la experiencia n°2.
- Servomotor de potencia máxima de 200 [W] y torque máximo de 12,8 [Nm], con su controlador. Estos valores se obtienen de acuerdo a las pruebas de torque y a la selección de servomotor, anexos C y E, respectivamente.
- Inyector con eje y aguja.
- Acople servomotor – inyector para traspasar movimiento al inyector sin desplazar el servomotor.
- Microturbina hidráulica, con potencia, altura y caudal nominal de 10 [kW], 40 [m.c.a] y 35 [l/s] respectivamente.
- Generador eléctrico trifásico.
- Instrumentos de medición de variables mecánicas mencionados anteriormente como flujómetro, tubo de pitot, torquímetro y tacómetro. Envían mediciones al computador quien a través de la tarjeta de adquisición de datos las obtiene.
- Módulos convertidores de señal Hart a USB para flujómetro y tubo de pitot. Para el flujómetro este módulo sólo convierte la señal para que los datos puedan ser adquiridos por el computador, y para el tubo de Pitot, además de convertir los datos, entrega potencia de 24 [V] con una resistencia de 700 [Ω].
- Fuente de voltaje de 24 [V] para electrificar controlador del servomotor e instrumentos que lo requieran.
- Bomba con motor asociado y variador de frecuencia para modificar la velocidad del motor. El variador modifica la velocidad del motor a través de parámetros entregados por el computador con un control semi – manual.
- Válvula check al inicio de la bomba para evitar contraflujo de agua en la bomba.
- Válvula de seguridad antiembalamamiento, automática que se activa a partir de los 850 [RPM] de velocidad de giro.
- Válvula reguladora de caudal para regular el sobredimensionamiento de la bomba.
- Distintos elementos hidráulicos como Tees, cañerías de 3" y 4" para instrumentación y expansiones de cañerías.

- Instrumentos de medición de variables eléctricas como Amperímetro, voltímetro y frecuencímetro, todo en el equipo analizador de potencia que se observa en anexo F, y pinza amperimétrica en anexo G.
- Interruptor trifásico termomagnético de 16 [A] para protección del generador debido a alzas de voltaje.
- Seis (6) estufas monofásicas con potencia de 2000 [W] cada una, conectadas de pares a cada fase del generador eléctrico y con sus ventiladores conectados a la red.
- Alargador para entregar corriente de la red eléctrica a ventiladores de las estufas.
- Repisa para colocar las estufas y el interruptor trifásico.
- Relé de estado sólido de 3 [V] a 24 [V] para controlar la válvula del sistema de seguridad.
- Arduino Uno y convertidor RS-232 a TTL para poder convertir la señal serial de la tarjeta de adquisición de datos a digital. Es para comunicarse con el variador de frecuencia, las válvulas y el servomotor.

4. Detalle de cada elemento perteneciente a la microcentral hidráulica.

4.1. Computador con tarjeta de adquisición de datos.

La tarjeta de adquisición de datos, de fabricante NI, de modelo PCIe-8430/16 posee señal tipo Serial y 16 puertos de conexión DB-9 machos, los pines se observan en la figura 1, para conectar instrumentos, equipos, entre otros.

Pin	232 DTE	232 DCE	422/485
1	DCD*	DCD	GND
2	RXD	TXD	CTS+ (HSI+)
3	TXD	RXD	RTS+ (HSO+)
4	DTR*	DSR	RXD+
5	GND	GND	RXD-
6	DSR*	DTR	CTS- (HSI-)
7	RTS	CTS	RTS- (HSO-)
8	CTS	RTS	TXD+
9	RI*	RI	TXD-

Figura 1: Tabla de pines de conexión de tarjeta DB-9 macho.

Para estos pines se considera el tipo RS232 DTE, dónde cada pin significa lo siguiente:

- DCD: Detector de transmisión.
- RXD: Recepción de datos.
- TXD: Transmisión de datos.
- DTR: Terminal de datos listo.
- GND: Señal de tierra.
- DSR: Ajuste de datos listo.
- RTS: Solicitud de envío.
- CTS: Listo para enviar.
- RI: Indicador de llamada.

Además, la tarjeta se encuentra colocada al interior del computador, y para conectar los puertos DB-9 machos a éste, se realiza mediante una conexión de 68-pines machos, ver figura 2, estando en el computador instalado los hembras para su unión.

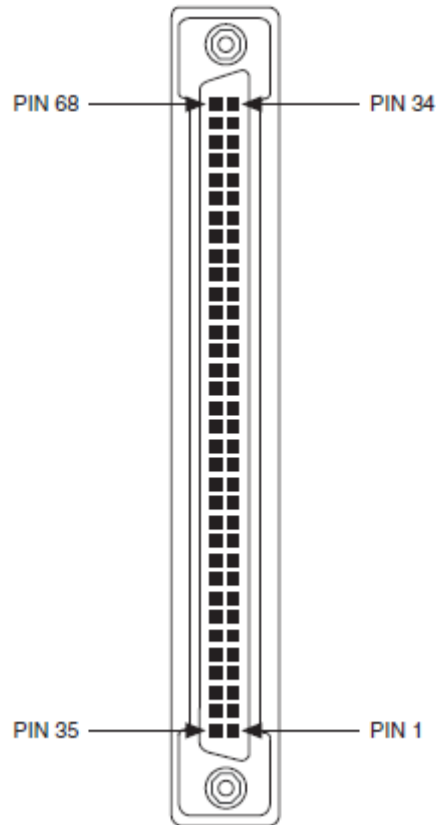


Figura 2: Conector de 68 pines de tarjeta de adquisición de datos para conectarse al computador.

Por otro lado, el computador posee distintos puertos USB para su utilización, como, por ejemplo, conectar los convertidores HART a USB del tubo de Pitot y del Caudalímetro.

Pero lo más importante del computador es que posee el programa LabVIEW, el cual, es el programa que debe abrirse cada vez que se ocupe el computador, ya que, este programa relaciona el computador con la tarjeta de adquisición, generando que se adquieran y almacenen los datos de los instrumentos, y envíen las señales o parámetros a las válvulas, variador de frecuencia y controlador del servomotor.

En específico, este programa genera que el computador obtenga los datos de todos los instrumentos: torquímetro, tacómetro, tubo de Pitot, caudalímetro, amperímetro, voltímetro y frecuencímetro. Al igual que genera que controle las válvulas de seguridad y de sobredimensionamiento, ya que, fue realizado una programación para ello. Todo esto para diferentes puertos, dónde cada instrumento se encuentra en un puerto distinto, excepto voltaje, frecuencia y amperaje que el mismo instrumento lo envía a un puerto del computador.

Cabe destacar que cada puerto es elegido por el usuario de forma física con cada conector DB-9 o USB, según corresponda, y se debe seleccionar en la interfaz del computador usuario del programa LabVIEW la entrada correspondiente antes de iniciar las experiencias.

Además, este programa posee una interfaz con el usuario para colocar los distintos puertos de la tarjeta de adquisición de datos y enlazar cada puerto con cada instrumento, válvula o equipo secundario a controlar.

A su vez, detrás de la interfaz se encuentra el diagrama de control para adquirir y almacenar datos, y enviar parámetros a cada elemento requerido. Este diagrama de control tiene dos opciones, automático o manual, lo cual se observa a través de una botonera en la interfaz con el usuario. Esta separación se realiza para la diferencia de programación al ser automático, experiencia n°1, o manual, experiencia n°2.

Tanto en la programación automática como manual se adquieren los datos de los instrumentos y se controlan las válvulas mediante el envío de señales. Lo que los diferencia es que en la experiencia n°1, modo automático, el computador utiliza a través de LabVIEW un controlador PID con el fin de controlar la frecuencia de la microcentral hidráulica al variar su caudal a través del control del servomotor, además, el variador de frecuencia está fijo para que la bomba entregue 40 [m] de altura y el caudal en ese punto que es regulado por la válvula de sobredimensionamiento manteniéndose fija.

Por otro lado, en la programación manual, el computador no funciona como PID, por ende, se encuentra desconectada esa función del programa, por lo tanto, el servomotor no es controlado automáticamente por el computador si no que se entregan parámetros para establecer un caudal distinto para cada punto de operación que se requiera. A su vez, el variador de frecuencia se encuentra conectado y se varían los parámetros manualmente, a través del computador, para variar la altura de la microcentral hidráulica.

4.2. Servomotor con su controlador asociado.

El servomotor utilizado es el encargado de controlar el caudal de la microcentral hidráulica. Esto se realiza a través de su controlador asociado, modelo BLD-300B procedente de China, ver figura en anexo E de "trabajo de título", al cual se le envía una señal de parte del computador como PID, experiencia n°1, o se entregan parámetros para que se mueva, experiencia n°2.

El servomotor, de fabricación China y modelo Z5BLD200-24GU-30S - 5GU-20KB, se conecta mecánicamente a un acople el cual transmite el movimiento al inyector para que así el servomotor no se desplace ni sufra movimientos ni desgastes poco frecuentes debido a una mala operación.

Por otro lado, el servomotor se conecta eléctricamente a su controlador asociado, para que se le entregue señal y potencia eléctrica. Esta conexión se realiza tomando en cuenta la figura 3 y la tabla 1, de a continuación.

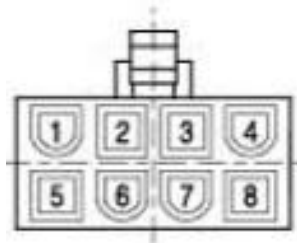


Figura 3: Conector de servomotor con diferenciación de conexión por números.

Tabla 1: Conexión de controlador de servomotor a número de servomotor, según fábrica.

N° Servomotor	1	2	3	4	5	6	7	8
Señal Controlador	U	W	Hv	Hu	V	GND / REF -	Hw	Vcc / REF+

Cabe destacar que el usuario se debe fijar en el conector del servomotor antes de iniciar su conexión para no equivocarse en el orden, y se debe tener el manual del servomotor con su controlador para realizar las conexiones.

Luego de conectar el servomotor en el controlador, se deben realizar las conexiones del controlador.

Las primeras conexiones son entre el mismo controlador, se conecta el puerto COM con EN para que el servomotor se detenga de forma rápida, si no se va a detener lentamente; y se conecta el puerto COM con F/R para que el servomotor gire contra las manecillas del reloj, si no girará para el otro sentido.

Luego, se sigue con las conexiones del controlador con la fuente de poder. Para ello, se conecta en DC+ el cable en el positivo de la fuente de poder (color rojo) y en DC- el cable en el negativo de la fuente de poder (color negro).

Posteriormente, para la unión con el computador se conecta la velocidad (SPEED) a una salida digital configurada como PWM del Arduino Uno y luego se conecta F/R a una salida digital del mismo Arduino, con el fin de establecer dirección del servomotor. El Arduino luego se conecta al convertidor RS-232 – TTL para poder conectarse mediante un DB-9 a un puerto de la tarjeta de adquisición de datos.

Cabe destacar que para la realización de todas las conexiones de control se requieren cables de tipo TAG o en su defecto cables de 18 AWG; y para las conexiones de potencia del controlador, se requieren cables para 24 [V], que serían cables de 1,5 mm². Estos cables actualmente se encuentran conectados con un código de colores, el cual se observa en la tabla 2 y diagrama 1 de a continuación.

Tabla 2: Código de colores de cables de conexiones del servomotor y controlador, según fábrica.

N° Servomotor	1	2	3	4	5	6	7	8	-	-
Señal Controlador	U	W	Hv	Hu	V	GND / REF -	Hw	Vcc / REF+	DC+	DC-
Código de Color	Rojo	Verde	Negro	Blanco	Amarillo	Azul	Rojo - Negro	Amarillo - Rojo	Café	Celeste

Diagrama 1: Código de colores de cables de conexiones del servomotor y controlador en laboratorio.

N° Servomotor	1	2	3	Señal Controlador	U	REF+	Hv	Código de Color	Negro	Azul	Amarillo
	4	5	6			Hu	Hw			Verde	Blanco
	7	8	9		W	V	REF-		Naranja	Café	Rojo

4.3. Válvula de seguridad.

La denominada válvula de seguridad es la encargada de controlar el embalamiento del conjunto microturbina – generador, desviando el agua hacia la piscina de almacenamiento una vez que dicho conjunto sobre pase los 850 [RPM] de velocidad de rotación.

Esta es una válvula de tres vías (3-vías) automatizada de modelo VFD030HB con actuador modelo M9124-AGA-2, ambos pertenecientes a Jhonson Controls. Su dimensión es de 30 pulgadas y resiste una presión de 175 [psi] al momento de su cierre. Su actuador es de tipo eléctrico y su condición de operación es de tipo “On/Off”.

La válvula se encuentra inmediatamente después de la bomba en la línea hidráulica, siendo conectada mecánicamente a ella, la línea hidráulica, por medio de pernos de sujeción.

Por otro lado, eléctricamente, la válvula se conecta con tres (3) cables de potencia para 24 [V] (cables de 1,5 mm²), uno va a negativo, 24 [V] -, a conectarse a la fuente de poder. Mientras que los otros dos positivos, 24 [V] +, se conectan con el relé en estado sólido de 3 [V] - 24[V], que se encuentra al interior de la caseta. Luego el relé se conecta con el Arduino Uno para comunicarse con la tarjeta de adquisición de datos, todo al interior de la caseta, con el fin de controlar la válvula.

La forma de conectar la válvula de seguridad se muestra en la figura 4 siguiente, y se observa al retirar la tapa del actuador.

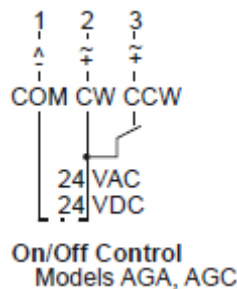


Figura 4: Conexión de cables de la válvula de seguridad.

Este tipo de conexión se realiza producto de que el computador, a través de la tarjeta de adquisición de datos, entrega una señal, esta señal de tipo serial se envía al Arduino Uno para que la traduzca de serial a digital, y así envíe voltaje de 3 a 5 [V] al relé que amplifica el voltaje llevándolo a 24 [V], requerido por la válvula de seguridad.

Cabe destacar que actualmente se encuentra conectada con código de colores mostrados en la tabla 3 siguiente, los cuales se observan a retirar la tapa del actuador.

Tabla 3: Código de colores de cables de conexiones de la válvula de seguridad

Conector Válvula	1: COM (-24[V])	2: CW (+24[V])	3: CCW (+24[V])
Color Cable	Blanco	Rojo	Azul
Código de Color	Blanco: Amarillo/Blanco	Rojo: Amarillo/Blanco	Azul: Amarillo/Blanco

4.4. Válvula reguladora de caudal de la bomba o de sobredimensionamiento.

La denominada válvula reguladora de caudal de la bomba o de sobredimensionamiento es la encargada de controlar que el caudal que se introduce por la línea hidráulica sea el caudal nominal de 35 [l/s], para la experiencia n°1, o sea el caudal de operación de la microturbina hidráulica para caracterizar su operación. Esto se produce debido a que la bomba instalada se encuentra sobredimensionada, ya que, al ser regalada, se busca su utilización dentro de este laboratorio.

Es una válvula tipo mariposa automatizada de modelo VFDN30HB con actuador modelo M9116-GGA-2, ambos pertenecientes a Johnson Controls. Su dimensión es de 30 pulgadas y resiste una presión de 175 [psi] al momento de su cierre. Su actuador es de tipo eléctrico y su condición de operación es de tipo Modulante, control proporcional entre 0 a 10 [V].

La válvula se encuentra posterior a la válvula de seguridad, en la línea hidráulica, siendo conectada mecánicamente a ella, la línea hidráulica, por medio de pernos de sujeción, igualmente que la válvula descrita anteriormente.

Por otro lado, de forma eléctrica, la válvula posee cuatro (4) conexiones. Dos (2) de ellas son de señal, con voltaje de 0 a 10 [V], "Voltage Input" y "Feedback Output", los cuales requieren un cable para parlante el cual se conecta al Arduino Uno para comunicarse con la tarjeta de adquisición de datos, todo al interior de la caseta, con el fin de controlar la válvula. Y las otras dos (2) conexiones son de potencia, cables de 1,5 mm², por ende, van a la fuente de poder, siendo denominados como rojo positivo y blanco negativo en su conexión.

La forma de realizar la conexión de la válvula de sobredimensionamiento se muestra en la figura 5 siguiente, y se observa al retirar la tapa del actuador.

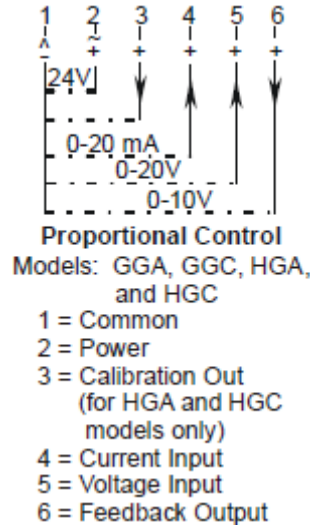


Figura 5: Conexión de cables de la válvula reguladora de caudal de la bomba.

Cabe mencionar que actualmente se encuentra conectada con código de colores mostrados en la tabla 4 siguiente.

Tabla 4: Código de colores de cables de conexiones de la válvula de seguridad

Conector Válvula	1: Common (-24[V])	2: Power (+24[V])	5: Voltage Input	6: Feedback Output
Código de Color	Blanco Amarillo	Rojo Amarillo	Rojo Negro Amarillo	Negro Amarillo

4.5. Caudalímetro.

También llamado flujómetro, es el instrumento que se utiliza para medir el caudal de la microcentral hidráulica.

Este instrumento se separa en dos partes. La parte mecánica, de modelo Optiflux 2000, que se conecta en la línea hidráulica y es la que realiza las mediciones del caudal. Y la parte eléctrica y electrónica, de modelo IFC 300, que es de variante de alojamiento compacto, encargado de mostrar las mediciones realizadas por la parte mecánica del instrumento, para ello lleva una pantalla de visualización, al igual que, de enviar los datos de las mediciones al computador.

Para poder enviar las mediciones, se conecta el cable de señal tipo DS 300 o tipo BTS 300 de forma pasiva, ver manual de IFC 300, de acuerdo con las conexiones de la tabla 5, para luego conectarlo al módulo convertidor de señal Hart a USB en modo normal, el cual se conecta a un módulo USB a DB-9 para poder finalmente unirse al computador por un puerto a la tarjeta de adquisición de datos.

Cabe mencionar que la conexión USB a DB-9 es netamente para que se adquieran los datos a través de la tarjeta de adquisición, ya que, al conectarse directamente por USB al computador es posible captar los datos de las mediciones, sin necesidad de conectarse a la tarjeta de adquisición de datos.

Por otro lado, para entregarle potencia a este instrumento, se requieren dos cables de 24 [V], cables de 1,5 mm², los cuales se conectan en la sección de potencia del flujómetro, de acuerdo con las conexiones de la tabla 5. Posteriormente, estos cables se conectan a la fuente de poder del laboratorio para entregar 24 [V].

Cabe destacar que el módulo convertidor de señal Hart a USB puede alimentar en forma de potencia al flujómetro. Para ello sólo se requiere cable de señal conectado de forma activa y el módulo convertidor Hart a USB en modo 24 [V].

Además, se requiere una conexión de tierra que se realiza tanto de forma interna, ver manual del IFC 300, como externa. Para ello se conecta un cable de alambre de cobre de 1,5 a 2,5 mm² a la tierra del laboratorio de Turbomáquinas hidráulicas y a la tierra del caudalímetro de forma interna, del IFC 300, como la tierra externa, del Optiflux 2000.

Las conexiones del caudalímetro poseen, igual que las válvulas, un código de colores el cual se muestra a continuación.

Tabla 5: Código de colores de cables de conexiones de caudalímetro.

Conector Caudalímetro	L	N	A+	A	A-	Tierra
Tipo de Conector	Potencia + 24 [V]	Potencia - 24 [V]	Señal Activa	Señal Activa o Pasiva	Señal Pasiva	-
Código de Color	Café	Azul	Blanco	Negro	Blanco	Verde

Es de importancia mencionar que la conexión física de los cables del caudalímetro se encuentra al costado de este en su tapa roscada, la cual, sólo se requiere girar.

4.6. Tubo de Pitot.

Es el instrumento que se utiliza para medir la presión de la microcentral hidráulica.

Al igual que el instrumento anterior, se separa en dos partes. Una parte mecánica y otra eléctrica y electrónica, las cuales son de modelo EJX11A, pertenecientes a Yokogawa. Este instrumento alcanza hasta 160 [bar] como presión máxima.

La parte mecánica sólo es para sujetar la parte eléctrica y electrónica y para que pase el agua por su interior, siendo conectada en la tubería hidráulica, según el manual de EJX11A. Mientras que la parte eléctrica y electrónica realiza las mediciones a través de diferencias de presión por medio de tubos que van desde esta sección a la parte mecánica, y se sujeta a una base que posee la parte mecánica del tubo de Pitot.

Además, la parte eléctrica y electrónica posee una pantalla en la cual se pueden observar las mediciones realizadas y en su reverso se encuentran las conexiones eléctricas y de control, tanto para electrificar el instrumento como para poder enviar las mediciones realizadas al computador.

Para las conexiones, se debe conectar dos cables de potencia de 24 [V], cables de 1,5 mm², de los cuales, además, llevan en señal tipo Hart las mediciones realizadas.

Por lo tanto, para este instrumento los cables de potencia son a su vez cables de envío de mediciones, por ello, se utiliza el módulo convertidor de Hart a USB el cual alimenta al tubo de Pitot en su modo 24 [V] y 700 [Ω], y a su vez obtiene las mediciones para luego conectarlo a un módulo USB a DB-9, y así finalmente conectarse al computador por un puerto a la tarjeta de adquisición de datos.

Cabe mencionar que la conexión USB a DB-9 es netamente para que se adquieran los datos a través de la tarjeta de adquisición, ya que, al conectarse directamente por USB al computador es posible captar los datos de las mediciones, sin necesidad de conectarse a la tarjeta de adquisición de datos.

Además, se requiere una conexión de tierra, que se realiza en cualquiera de las dos (2) tierras internas existentes. Para ello se conecta un cable de alambre de cobre de 1,5 a 2,5 mm² a la tierra del laboratorio de Turbomáquinas hidráulicas y a la tierra del tubo de Pitot, de forma interna, ver manual EJX11A.

Igual que en los elementos anteriores, las conexiones del tubo de Pitot poseen un código de colores el cual se muestra a continuación, en la tabla 6.

Tabla 6: Código de colores de cables de conexiones del tubo de Pitot.

Conector Caudalímetro	Positivo +24 [V]	Negativo - 24 [V]	Tierra
Código de Color	Rojo Rojo - Amarillo	Blanco Rojo - Amarillo	Verde

Es de importancia mencionar que la conexión física de los cables del tubo de Pitot se encuentra en la parte posterior de la pantalla y es de tapa roscada, por ende, para su instalación sólo se requiere girar.

4.7. Torquímetro y tacómetro.

El torquímetro es el instrumento para medir el torque en el eje del conjunto microturbina – generador. Mientras que el tacómetro es el instrumento que se mide la velocidad de rotación del conjunto microturbina – generador.

Ambos instrumentos se encuentran en el mismo transductor de modelo RWT420 el cual se conecta directamente con acoples entre el eje de la microturbina hidráulica y el generador, siendo parte de este conjunto. Por ende, cuando gira el conjunto, este transductor mide su torque y su velocidad de rotación.

Eléctricamente, este transductor se conecta a través de un cable DB-15 al computador, para ser electrificado y enviar las mediciones realizadas. Esta conexión puede ser tanto en el modo análogo del transductor como en el digital. En nuestro caso será en el modo digital.

Por lo tanto, para conectar el transductor al computador se utiliza el cable DB-15 nombrado anteriormente, unido a la entrada digital del transductor, y en conjunto con sus cables del modo digital, se conecta por DB-9 a un puerto de la tarjeta de adquisición de datos de forma directa, todo al interior de la caseta.

Cabe destacar que al no poder alcanzar la distancia del transductor a la entrada del puerto de la tarjeta el cable del transductor, se realiza un alargador de hembra DB-15 tanto para la entrada como para la salida. Este alargador posee un código de colores para los 15 cables internos al momento de su construcción. Tal código se muestra como sigue en la tabla 7.

Tabla 7: Código de colores de alargador DB-15 para transductor de torquímetro y tacómetro.

Pin Alargador	1	2	3	4	5	6	7	8
Código de Color	Naranja	Negro	Verde Agua	Café	Rosado	Blanco Negro	Verde Agua Negro	Rojo

Pin Alargador	9	10	11	12	13	14	15
Código de Color	Blanco	Amarillo	Verde Claro	Azúl	Gris	Celeste	Morad

4.8. Amperímetro y componentes.

El amperímetro de modelo PCE-PA 6000 de fabricante PCE Instruments es el instrumento que mide la corriente eléctrica (amperímetro), la frecuencia eléctrica (frecuencímetro) y el voltaje (voltímetro).

De acuerdo a sus especificaciones técnicas, ver hojas de datos, este instrumento posee los siguientes rangos de medición, de importancia:

- 1 [W] a 6000 [W] de potencia, con un error de $\pm 1,5\%$ + 1 digital.
- 10 [A] máximos de forma directa, con un error de $\pm 1\%$ + 1 digital.
- 10 [Hz] a 999 [Hz] de frecuencia, con un error de $\pm 1\%$ + 1 digital.
- 0,1 [V] a 600 [V], con un error de $\pm 1\%$ + 1 digital.

Como la potencia de la microcentral hidráulica es de 10 [kW] nominales y 12 [kW] máximos, se utiliza la pinza amperimétrica de modelo PCE-CA 502, de fabricante PCE Instruments, para poder obtener mayor rango, y obtener los datos de medición. A su vez, a través de esta medición, se logra obtener la medición de la corriente eléctrica producida por la microcentral hidráulica.

Por lo tanto, la pinza amperimétrica es un componente anexo del amperímetro la cual se mantiene conectada a los cables de fase del generador, antes del interruptor. Y por el otro lado, se mantiene conectada su negativo al puerto COM (de potencia) y su positivo al puerto de la potencia, ambos perteneciente al amperímetro.

Por otra parte, se conecta una pinza de multímetro al mismo amperímetro para medir voltaje y frecuencia. Su negativo se conecta al puerto COM (de voltaje) y su positivo al puerto del voltaje. Mientras, por el lado de las pinzas, para obtener las mediciones, se conecta a una fase del generador y al neutro, de forma de distribución tipo paralelo, para así obtener mediciones del voltaje, y al mismo tiempo obtiene mediciones de frecuencia.

Además, luego de las mediciones, todo se observa en la pantalla de interfaz del amperímetro, el cual se conecta, a través de su adaptador de RS – 232, directamente a un puerto de la tarjeta de adquisición de datos, para que el computador obtenga las mediciones realizadas.

Cabe mencionar que los cables utilizados para realizar las mediciones son cables de multímetro, sin requerimiento de medidas, pero por protección se utiliza uno de gran sección transversal.

4.9. Variador de Frecuencia

El variador de frecuencia, también denominado VDF en siglas, es el equipo que varía la velocidad de rotación de la bomba de la microcentral hidráulica. Se requiere que se utilice a través del computador para la experiencia n°2 de caracterización de la microcentral hidráulica, mientras que para la experiencia n°1, no es relevante su uso, por ende, no es necesario que esté conectado, y si lo está, no debe variar ningún parámetro de la bomba, sólo mantenerla en el punto de operación requerido.

El variador de frecuencia es de fabricantes procedentes de China, de modelo HC 800. Es un inversor que puede controlar la velocidad de giro de los motores asíncronos, logrando controlar el motor de la bomba perteneciente a la microcentral hidráulica.

El variador posee dos conexiones, una eléctrica y otra de control. La eléctrica se realiza de forma trifásica directamente de la toma de corriente del variador, ver figura 6, a un enchufe perteneciente al tablero eléctrico que se encuentra en el laboratorio de turbomáquinas, lugar donde se emplaza la microcentral. Sus cables de conexión son trifásicos de alto amperaje, para ello ver manual de variador de frecuencia.

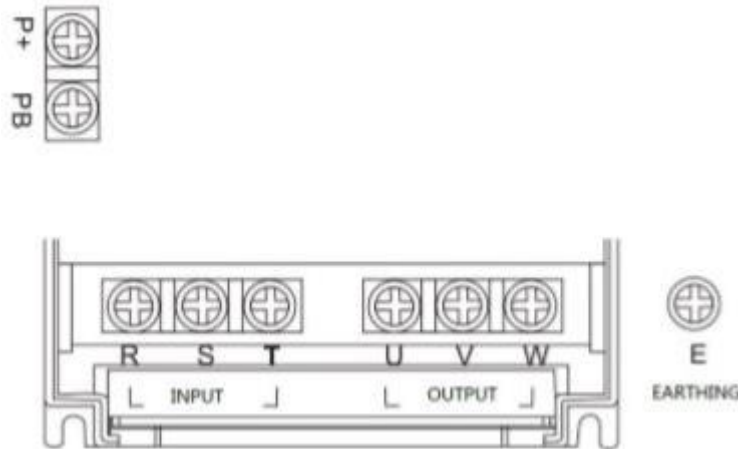


Figura 6: Toma de corriente del variador de frecuencia, de acuerdo a su manual.

Por otro lado, la conexión de control se realiza conectando la entrada AI0, entrada de 10 [V], y la tierra (GND) al computador. Ambos terminales, se encuentran en el circuito de control del variador, ver figura 7.

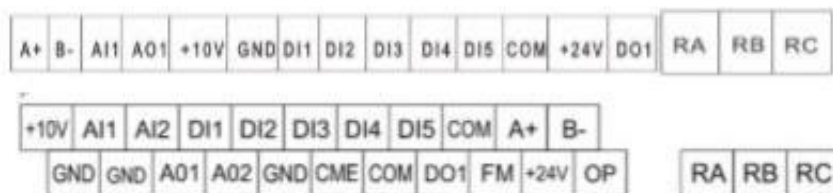


Figura 7: Circuito de control del variador de frecuencia, de acuerdo a su manual.

Para conectar ambos terminales al computador se debe conectar la tierra del variador a la tierra del Arduino Uno (GND) y la entrada AI0 a una entrada PWM del Arduino Uno. Posteriormente, el Arduino Uno se conecta con el conversor RS – 232 a TTL con un puerto de la tarjeta de adquisición de datos, y así se obtiene la unión del control del computador con el del variador de frecuencia. Esta conexión

se realiza con cables para parlante, pues es un cable de señal de bajo voltaje y amperaje, y posee un código de colores la cual se observa en la tabla 8, de a continuación.

Tabla 8: Código de colores de conectores de control del variador de frecuencia para su control por computador.

Conector VDF	A11	GND
Código de Color	Negro Rojo	Rojo Rojo

Cabe destacar que si bien se requiere una señal digital de 0 a 10 [V] para el variador de frecuencia, el Arduino Uno entrega entre 0 a 5 [V] de señal, obteniéndose el fin que se requiere para controlar el VDF del computador.

Tal control nombrado anteriormente, se realiza para al experiencia n°2, en la cual, se entrega un parámetro de velocidad de la bomba al computador, este envía a través de una señal RS – 232 al Arduino Uno tales valores, el Arduino Uno envía a través de su programación una señal, de tipo digital, de voltaje (entre 0 a 5 [V]) al puerto PWM perteneciente al variador de frecuencia, para que luego este voltaje sea interpretado por el variador y cambie la velocidad de rotación de la bomba al parámetro introducido en el computador.

4.10. Estufas y ventiladores.

Son seis (6) estufas monofásicas de 2000 [W] en dos (2) niveles, 1.000 y 2.000 [W], conectadas en pares a cada fase del generador, con cables de 2,5 mm² para el generador y 1,5 mm² para cada monofase de las estufas, teniendo un código de colores pertenecientes a la conexión entre estufas y generador, de acuerdo a la tabla 8.

Tabla 8: Código de colores de cables de conexión entre cables positivos de estufas y fases del generador.

Color Cable Estufa	Negro	Negro Negro	Negro Rojo
Color Cable Generador	Café	Negro Azul	Rojo

Las estufas con sus ventiladores se encuentran sobre una repisa, en la cual, cada una se conecta por medio de entrada macho monofásica a un interruptor, 2 por cada nivel de la repisa. Esta conexión eléctrica se realiza considerando que el color negro (o café) son los positivos y el azul (o celeste) son los neutros. Los neutros se conectan directamente al neutro del generador, mientras que cada par de estufas por medio del enchufe hembra y en disposición de tipo paralelo, se conectan a cada fase del generador, a través de un interruptor.

El interruptor, es de 16 [A] y es un método de protección de las estufas y del generador ante un alza de corriente, al momento de operar la microcentral hidráulica.

Por otro lado, cada estufa posee un (1) ventilador, el cual se encuentra separado eléctricamente de las estufas, pues se conectan directamente a la red para mantener su estabilidad y mantenerlos siempre encendidos y proteger que las estufas se quemen.

Lo anterior se debe, ya que, incluso al momento de que la microcentral hidráulica deje de entregar electricidad requerida para el funcionamiento de las estufas, los ventiladores sigan funcionando para disipar el calor obtenido por las estufas en su operación, y así mantenerlas protegidas.

Por otra parte, para la operación de las estufas y los ventiladores, estos siempre deben estar conectados y encendidos antes de iniciar la operación de la microcentral hidráulica. Mientras que las estufas siempre deben encontrarse al máximo de su potencia, y conectadas al menos una en cada fase con su valor mínimo, 1000 [W].

Posteriormente, se va conectando en cada fase y al mismo tiempo una estufa con el mismo nivel de potencia, ojalá de nivel 1, con el fin de obtener todos los datos y casos posibles, o también aumentar el nivel de potencia al 2 a cada estufa ya conectada, todas al mismo tiempo. Es de gran importancia que se conecten, o aumenten el nivel a cada estufa, de cada fase al mismo tiempo que de las otras fases para no generar vibraciones en el eje, con posibilidades de romperlo o dañarlo operativamente.

La variación de carga se realiza para poder realizar la experiencia n°1, de aumentar o disminuir la carga a un voltaje y frecuencia constante.

4.11. Fuente de Voltaje.

La fuente de voltaje que se requiere para el laboratorio es de 24 [V] y de 15 [A] aproximadamente.

Su función es entregar voltaje al controlador del servomotor, al caudalímetro, a la válvula de sobredimensionamiento, y al negativo de 24 [V] a la válvula de seguridad.

Para el caso del controlador del servomotor, caudalímetro, válvula de sobredimensionamiento, sus cables de potencia se conectan al positivo (rojo) y negativo (negro) de acuerdo al código de colores de cada uno, en tipo de distribución paralelo, para poder entregar a cada elemento el mismo voltaje, 24 [V]. Mientras que la válvula de seguridad, se conecta su negativo al negativo de la fuente para obtener los -24 [V] requeridos.

Todos los cables de potencia conectados a la fuente de voltaje deben ser para 24 [V], siendo utilizados cables de 1,5 mm².

4.12. Arduino Uno y conversor RS-232 a TTL.

Tal como se ha dicho en los detalles anteriores, el Arduino Uno se utiliza para convertir las señales analógicas y digitales de los instrumentos, válvulas y servomotor para poder ser transmitidas a la tarjeta de adquisición de datos de señal tipo serial, y realizar las realimentaciones de intercambios de señal que son requeridos.

Un Arduino Uno posee las siguientes conexiones:

- Seis (6) entradas analógicas para enviar voltaje entre 0 y 5 [V].
- Catorce (14) entradas digitales que se pueden configurar como entrada o salida.

Debido a que se requiere para cada elemento integrado al sistema de control realiza las conexiones siguientes:

- VDF: Requiere entre 0 y 10 [V], es necesario conectar un convertidor que tome un dato del puerto RS-232, y lo convierta a un voltaje. Para ello, los Arduinos pueden entregar entre 0 y 5 [V].
- Válvula de seguridad: Requiere de un convertidor de RS-232 a digital.
- Válvula para el sobredimensionamiento de la bomba: Posee “Voltage Input” y “Feedback Output”, ambas analógicas. Nuevamente, para ello se requiere un convertidor análogo-digital y digital-análogo. Por ende, un Arduino puede hacer todo eso.
- Caudalímetro y Tubo de Pitot: Al poseer los convertidores HART a USB no se requiere modificación de señal, por ende, no se requiere conexión al Arduino ni es necesario conectarse a la tarjeta. Pero debido a querer obtener los parámetros por la tarjeta de adquisición, se transforma de USB a RS232 con un DB-9 para unirlos cada uno a algún puerto de la tarjeta de adquisición de datos, definido por el usuario.
- Torquímetro: Según el manual, el RWT420 trae RS-232, por lo tanto, se conecta de forma directa a la tarjeta a través de un cable serial DB-15 a DB-9, sin pasar por USB.
- Amperímetro y medidor de potencia: Tiene RS-232, así que se utiliza esa conexión usando un puerto DB-9 de la tarjeta de adquisición de datos.
- Servomotor: Requiere una conexión similar a la válvula para el sobredimensionamiento. Para ello, un Arduino puede hacer eso.

Se tiene que al Arduino se le pueden configurar seis (6) de esas catorce (14) entradas digitales, como PWM, siendo para su aplicación salidas analógicas entre 0 y 5 [V]. Esta configuración se realiza a través de la programación del Arduino por medio del programa Arduino IDE.

Realizando tal modificación en la configuración del Arduino, pueden resultar las siguientes conexiones:

- VDF: Conectada a una salida PWM del Arduino y a una tierra GND.
- Válvula de seguridad: Conectada a dos salidas digitales del Arduino.
- Válvula para el sobredimensionamiento de la bomba: Conectada a una segunda salida PWM del Arduino, más una entrada analógica.
- Servomotor: Una salida PWM para la velocidad, una salida digital para fijar dirección (abre o cierra).

Posteriormente, el Arduino se conecta a un puerto de la tarjeta de adquisición de datos mediante un conversor RS-232 a TTL. Ello se realiza conectando los puertos de TX, RX y GND del Arduino con los del conversor.

5. Puesta en marcha de cada experiencia.

Luego de la individualización de cada elemento perteneciente a la microcentral hidráulica, se requiere realizar varias acciones antes del inicio de la operación de la misma, para cada una de las dos experiencias mencionadas.

De estas acciones hay algunas que se realizan para ambas experiencias, estas son las siguientes:

- 1) Realizar todas las conexiones eléctricas y de control de cada elemento de la microcentral hidráulica.
- 2) Instalar las dos conexiones de 68-pines de la tarjeta de adquisición de datos al computador.
- 3) Unir las conexiones de control de los elementos de la microcentral hidráulica a los puertos de la tarjeta de adquisición de datos.
- 4) Conectar los cables de potencia de los elementos de la microcentral, que la requieren de forma externa, a la fuente de poder.
- 5) Encender el módulo convertidor Hart – USB del tubo de Pitot para entregarle potencia, y fijarlo en su modo de funcionamiento. Además, de encender el del caudalímetro para la toma de mediciones.
- 6) Encender computador y pantalla.
- 7) Conectar Arduino Uno a computador por medio de cable USB y por medio de módulo convertidor RS232 a TTL a un puerto de la tarjeta de adquisición de datos.
- 8) Abrir el programa LabVIEW “Turbina Pelton” en el computador y colocar cada elemento de la microcentral hidráulica en su puerto correspondiente.
- 9) Encender el variador de frecuencia mediante la pulsación del botón “Encendido” del tablero eléctrico.
- 10) Encender los ventiladores mediante la pulsación del botón “On” del alargador que se encuentra en el nivel 1 de la repisa.
- 11) Colocar a una estufa por fase en el nivel 1 de su potencia.
- 12) Encender la fuente de poder y situarla en 24 [V].
- 13) Encender controlador del servomotor.
- 14) Instalar la pinza amperimétrica y las puntas para medir voltaje en los cables del generador y en el amperímetro.
- 15) Encender amperímetro.
- 16) Mantener inyector cerrado.
- 17) Mantener la válvula de seguridad abierta con dirección a la microcentral hidráulica.
- 18) Revisar que el programa LabVIEW muestre que cada elemento de la microcentral hidráulica se encuentre con su puerto de la tarjeta de adquisición.

- 19) Revisar el funcionamiento de las válvulas, variador de frecuencia y controlador del servomotor utilizando el computador y el Arduino Uno.
- 20) Establecer el valor de apertura de referencia, en el programa LabVIEW, para dimensionar la bomba con la válvula reguladora de caudal de la bomba.
- 21) Abrir levemente el agujero controlador por el inyector.

Posteriormente, y una vez que cada elemento, en conjunto con sus conexiones y con el computador, se encuentren funcionando correctamente, se pasa a realizar la puesta en marcha de cada experiencia.

- 5.1. Experiencia n°1: Generación distribuida de una microcentral hidráulica con variación de cargas a frecuencia y voltaje constantes.

Las acciones a realizar para iniciar esta experiencia son las siguientes:

- 1) En el programa LabVIEW “Turbina Pelton” del computador colocar en modo automático el control de la microcentral hidráulica.

- 5.2. Experiencia n°2: Caracterización del funcionamiento de una microturbina hidráulica.

Las acciones a realizar para iniciar esta experiencia son las siguientes:

- 1) En el programa LabVIEW “Turbina Pelton” del computador colocar en modo semi - automático el control de la microcentral hidráulica.
- 2) Establecer el valor del parámetro inicial para el variador de frecuencia, en el programa LabVIEW.

6. Operación de cada experiencia.

Una vez realizado las acciones anteriores de puesta en marcha, se puede operar cada experiencia.

- 6.1. Experiencia n°1: Generación distribuida de una microcentral hidráulica con variación de cargas a frecuencia y voltaje constantes.

Para operar esta experiencia se debe realizar los siguiente:

- 1) Iniciar el funcionamiento de la bomba con 40 [m] de fluido y caudal acorde a esta altura en operación.
- 2) Ajustar caudal de la bomba a través de la válvula de sobredimensionamiento de la bomba si es que se requiere. Se realiza acorde a los datos entregados por el caudalímetro.
- 3) Esperar a que el sistema se estabilice en 50 [Hz] y 220 [V] con una estufa conectada en cada fase del generador.

- 4) Variar los niveles de potencia de las estufas, asegurándose de tener la misma potencia requerida en cada fase, y de al menos una estufa en nivel 1 de potencia en cada fase del generador.

6.2. Experiencia n°2: Caracterización del funcionamiento de una microturbina hidráulica.

Las acciones a realizar para iniciar esta experiencia son las siguientes:

- 1) Abrir el paso del caudal a la microturbina hidráulica, por medio del servomotor, acorde a la distancia del servomotor requerida.
- 2) Iniciar el funcionamiento de la bomba en el punto de operación que se requiera. Para ello se establece un parámetro inicial en el variador de frecuencia.
- 3) Variar el caudal que ingresa al circuito hidráulica por medio de la válvula de sobredimensionamiento de la bomba.
- 4) Variar el punto de operación de la bomba, variando su velocidad por medio del variador de frecuencia.
- 5) Modificar el paso del caudal a la microturbina hidráulica, por medio de introducir en el computador un valor para ser enviado al controlador de este.
- 6) Volver a realizar los puntos 3, 4 y 5, hasta obtener todos los puntos de las curvas de potencia, TDH y rendimiento versus el caudal.

Anexo H

Manual de Operaciones de Microcentral hidráulica.

Información se muestra en página siguiente.

Página intencionalmente dejada en blanco.

Manual Operación – Control Electrónico de Microcentral Hidráulica.

El control electrónico de la microcentral hidráulica se basa en controlar a través de un computador los instrumentos de medición, equipos y válvulas para dos experiencias, n°1 y n°2, y su sistema de seguridad antiembalamiento, nombrados en sección 1.10 “Problema a resolver” y en el capítulo 3 “Resultados”.

Para mayor entendimiento, en este manual se van a explicar nuevamente los equipos principales de la microcentral hidráulica, las experiencias n°1 y n°2, y su sistema de seguridad antiembalamiento. Luego se detallarán todos los elementos pertenecientes a la microcentral y al control electrónico, para posteriormente, explicar el detalle de cada uno con sus conexiones, y finalizando con la puesta en marcha y operación de cada experiencia.

1. Equipos principales de la microcentral hidráulica.

Los equipos principales son:

- Microturbina Pelton de 10 [kW] de potencia, 40 [m] de altura neta y 35 [l/s] de caudal nominal.
- Generador síncrono de imanes permanentes de 10 [kW] de potencia, 750 [RPM] de velocidad de rotación nominal, 900 [RPM] de velocidad máxima y 8 polos.
- Inyector donde su eje desplaza a la aguja, moviéndola entre 16 a 44 [mm] requiriendo un torque que fluctúa entre 0,5 a 4 [Nm] , de acuerdo con las pruebas de torque, anexo C, con un factor de seguridad de 3,2 comercialmente.

2. Experiencias y sistema de seguridad.

2.1. Experiencia n°1: Control automático de una microcentral hidráulica a través del control del caudal mediante el movimiento del inyector, a voltaje y frecuencia constante, y cargas eléctricas variables.

En esta experiencia se quiere obtener 220 [V] constantes y una frecuencia de 50 [Hz] con una tolerancia impuesta de 2%, entre 49 y 51 [Hz]. Mientras se varían las cargas eléctricas (resistencias) de la microcentral.

Siendo más específicos, al generador eléctrico de la microcentral hidráulica se le van conectando y desconectando cargas eléctricas, en este caso estufas, para simular el consumo de las conexiones eléctricas de un domicilio. Estas sucesiones de hechos afectan la potencia mecánica que debe suministrar la microturbina hidráulica al generador. La cual debe disminuir al momento de desconectarse estufas o aumentar al momento de conectarlas, con el fin de obtener 220 [V], siempre constantes, y entre 49 y 51 [Hz] en menos de 10 [s].

Por lo tanto, el voltaje se asume constante debido a que la conexión de las estufas es delta, monofásica, y que la altura es fija de 40 [m]. Pero la frecuencia, se debe controlar, realizándose mediante el caudal suministrado a la microturbina, que es controlado por el movimiento del inyector, específicamente su aguja. Este control, se realiza a través de un servomotor y su controlador asociado.

2.2. Experiencia n°2: Caracterización del funcionamiento de una microturbina hidráulica Pelton.

En esta experiencia se quiere obtener los distintos puntos de las curvas de funcionamiento de potencia, rendimiento y altura vs caudal, con el voltaje y la frecuencia del generador eléctrico variables.

Para realizarla se controla la altura y el caudal que se suministra al sistema hidráulico de la microcentral mediante una bomba que se controla por un variador de frecuencia, el cual se entrega parámetros de un computador. Y a su vez, se controla el caudal que ingresa a la microturbina digitando en un computador la posición del servomotor. Siendo un control semi - manual.

Además, el voltaje y frecuencia eléctrica no es importante, dejándose de forma variable para así sólo medir los parámetros de la microturbina hidráulica y no del generador eléctrico.

2.3. Sistema de seguridad: Es un sistema de seguridad antiembalamiento que actúa cuando el conjunto microturbina - generador sobrepasan los 850 [RPM] de velocidad de giro. Es para evitar el embalamiento de ellos y que sobrepasen los 900 [RPM] máximos de velocidad del generador.

Este sistema de seguridad consta de una válvula automática que es controlada mediante un computador el cual entrega un voltaje de 3 – 5 [V] para abrir o cerrar la compuerta de la válvula con el fin de desviar el agua que va a los instrumentos y al conjunto microturbina – generador. Este voltaje se amplía mediante un relé de estado sólido para 24 V para que actúe la válvula.

Por lo tanto, el computador tiene en el programa LabVIEW un comparador de velocidad de giro que indica que al sobrepasar los 850 [RPM] actúe la válvula enviando el agua de vuelta a la piscina de almacenamiento.

3. Elementos pertenecientes a la microcentral hidráulica.

Los elementos pertenecientes a la microcentral hidráulica consta de instrumentos de medición, válvulas, equipos de control como un variador de frecuencia, un servomotor con su controlador asociado, los equipos principales, entre otros. Todos ellos son los siguientes:

- Computador con tarjeta de adquisición de datos para poder almacenar y analizar los datos obtenidos con el fin de ser parte de la automatización para la experiencia n°1 o en la interfaz semi manual para la experiencia n°2.
- Servomotor de potencia máxima de 200 [W] y torque máximo de 12,8 [Nm], con su controlador. Estos valores se obtienen de acuerdo a las pruebas de torque y a la selección de servomotor, anexos C y E, respectivamente.
- Inyector con eje y aguja.
- Acople servomotor – inyector para traspasar movimiento al inyector sin desplazar el servomotor.
- Microturbina hidráulica, con potencia, altura y caudal nominal de 10 [kW], 40 [m.c.a] y 35 [l/s] respectivamente.
- Generador eléctrico trifásico.
- Instrumentos de medición de variables mecánicas mencionados anteriormente como flujómetro, tubo de pitot, torquímetro y tacómetro. Envían mediciones al computador quien a través de la tarjeta de adquisición de datos las obtiene.
- Módulos convertidores de señal Hart a USB para flujómetro y tubo de pitot. Para el flujómetro este módulo sólo convierte la señal para que los datos puedan ser adquiridos por el computador, y para el tubo de Pitot, además de convertir los datos, entrega potencia de 24 [V] con una resistencia de 700 [Ω].
- Fuente de voltaje de 24 [V] para electrificar controlador del servomotor e instrumentos que lo requieran.
- Bomba con motor asociado y variador de frecuencia para modificar la velocidad del motor. El variador modifica la velocidad del motor a través de parámetros entregados por el computador con un control semi – manual.
- Válvula check al inicio de la bomba para evitar contraflujo de agua en la bomba.
- Válvula de seguridad antiembalamamiento, automática que se activa a partir de los 850 [RPM] de velocidad de giro.
- Válvula reguladora de caudal para regular el sobredimensionamiento de la bomba.
- Distintos elementos hidráulicos como Tees, cañerías de 3" y 4" para instrumentación y expansiones de cañerías.

- Instrumentos de medición de variables eléctricas como Amperímetro, voltímetro y frecuencímetro, todo en el equipo analizador de potencia que se observa en anexo F, y pinza amperimétrica en anexo G.
- Interruptor trifásico termomagnético de 16 [A] para protección del generador debido a alzas de voltaje.
- Seis (6) estufas monofásicas con potencia de 2000 [W] cada una, conectadas de pares a cada fase del generador eléctrico y con sus ventiladores conectados a la red.
- Alargador para entregar corriente de la red eléctrica a ventiladores de las estufas.
- Repisa para colocar las estufas y el interruptor trifásico.
- Relé de estado sólido de 3 [V] a 24 [V] para controlar la válvula del sistema de seguridad.
- Arduino Uno y convertidor RS-232 a TTL para poder convertir la señal serial de la tarjeta de adquisición de datos a digital. Es para comunicarse con el variador de frecuencia, las válvulas y el servomotor.

4. Detalle de cada elemento perteneciente a la microcentral hidráulica.

4.1. Computador con tarjeta de adquisición de datos.

La tarjeta de adquisición de datos, de fabricante NI, de modelo PCIe-8430/16 posee señal tipo Serial y 16 puertos de conexión DB-9 machos, los pines se observan en la figura 1, para conectar instrumentos, equipos, entre otros.

Pin	232 DTE	232 DCE	422/485
1	DCD*	DCD	GND
2	RXD	TXD	CTS+ (HSI+)
3	TXD	RXD	RTS+ (HSO+)
4	DTR*	DSR	RXD+
5	GND	GND	RXD-
6	DSR*	DTR	CTS- (HSI-)
7	RTS	CTS	RTS- (HSO-)
8	CTS	RTS	TXD+
9	RI*	RI	TXD-

Figura 1: Tabla de pines de conexión de tarjeta DB-9 macho.

Para estos pines se considera el tipo RS232 DTE, dónde cada pin significa lo siguiente:

- DCD: Detector de transmisión.
- RXD: Recepción de datos.
- TXD: Transmisión de datos.
- DTR: Terminal de datos listo.
- GND: Señal de tierra.
- DSR: Ajuste de datos listo.
- RTS: Solicitud de envío.
- CTS: Listo para enviar.
- RI: Indicador de llamada.

Además, la tarjeta se encuentra colocada al interior del computador, y para conectar los puertos DB-9 machos a éste, se realiza mediante una conexión de 68-pines machos, ver figura 2, estando en el computador instalado los hembras para su unión.

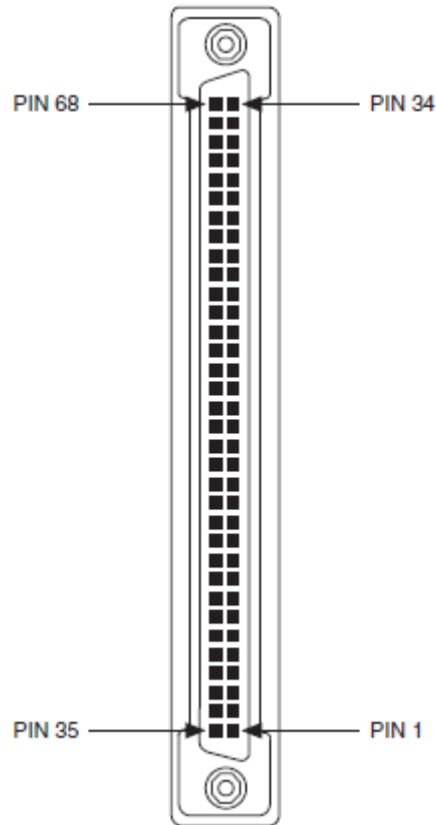


Figura 2: Conector de 68 pines de tarjeta de adquisición de datos para conectarse al computador.

Por otro lado, el computador posee distintos puertos USB para su utilización, como, por ejemplo, conectar los convertidores HART a USB del tubo de Pitot y del Caudalímetro.

Pero lo más importante del computador es que posee el programa LabVIEW, el cual, es el programa que debe abrirse cada vez que se ocupe el computador, ya que, este programa relaciona el computador con la tarjeta de adquisición, generando que se adquieran y almacenen los datos de los instrumentos, y envíen las señales o parámetros a las válvulas, variador de frecuencia y controlador del servomotor.

En específico, este programa genera que el computador obtenga los datos de todos los instrumentos: torquímetro, tacómetro, tubo de Pitot, caudalímetro, amperímetro, voltímetro y frecuencímetro. Al igual que genera que controle las válvulas de seguridad y de sobredimensionamiento, ya que, fue realizado una programación para ello. Todo esto para diferentes puertos, dónde cada instrumento se encuentra en un puerto distinto, excepto voltaje, frecuencia y amperaje que el mismo instrumento lo envía a un puerto del computador.

Cabe destacar que cada puerto es elegido por el usuario de forma física con cada conector DB-9 o USB, según corresponda, y se debe seleccionar en la interfaz del computador usuario del programa LabVIEW la entrada correspondiente antes de iniciar las experiencias.

Además, este programa posee una interfaz con el usuario para colocar los distintos puertos de la tarjeta de adquisición de datos y enlazar cada puerto con cada instrumento, válvula o equipo secundario a controlar.

A su vez, detrás de la interfaz se encuentra el diagrama de control para adquirir y almacenar datos, y enviar parámetros a cada elemento requerido. Este diagrama de control tiene dos opciones, automático o manual, lo cual se observa a través de una botonera en la interfaz con el usuario. Esta separación se realiza para la diferencia de programación al ser automático, experiencia n°1, o manual, experiencia n°2.

Tanto en la programación automática como manual se adquieren los datos de los instrumentos y se controlan las válvulas mediante el envío de señales. Lo que los diferencia es que en la experiencia n°1, modo automático, el computador utiliza a través de LabVIEW un controlador PID con el fin de controlar la frecuencia de la microcentral hidráulica al variar su caudal a través del control del servomotor, además, el variador de frecuencia está fijo para que la bomba entregue 40 [m] de altura y el caudal en ese punto que es regulado por la válvula de sobredimensionamiento manteniéndose fija.

Por otro lado, en la programación manual, el computador no funciona como PID, por ende, se encuentra desconectada esa función del programa, por lo tanto, el servomotor no es controlado automáticamente por el computador si no que se entregan parámetros para establecer un caudal distinto para cada punto de operación que se requiera. A su vez, el variador de frecuencia se encuentra conectado y se varían los parámetros manualmente, a través del computador, para variar la altura de la microcentral hidráulica.

4.2. Servomotor con su controlador asociado.

El servomotor utilizado es el encargado de controlar el caudal de la microcentral hidráulica. Esto se realiza a través de su controlador asociado, modelo BLD-300B procedente de China, ver figura en anexo E de "trabajo de título", al cual se le envía una señal de parte del computador como PID, experiencia n°1, o se entregan parámetros para que se mueva, experiencia n°2.

El servomotor, de fabricación China y modelo Z5BLD200-24GU-30S - 5GU-20KB, se conecta mecánicamente a un acople el cual transmite el movimiento al inyector para que así el servomotor no se desplace ni sufra movimientos ni desgastes poco frecuentes debido a una mala operación.

Por otro lado, el servomotor se conecta eléctricamente a su controlador asociado, para que se le entregue señal y potencia eléctrica. Esta conexión se realiza tomando en cuenta la figura 3 y la tabla 1, de a continuación.

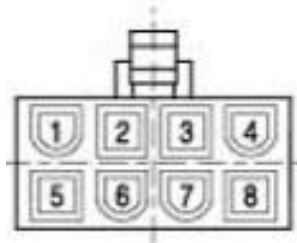


Figura 3: Conector de servomotor con diferenciación de conexión por números.

Tabla 1: Conexión de controlador de servomotor a número de servomotor, según fábrica.

N° Servomotor	1	2	3	4	5	6	7	8
Señal Controlador	U	W	Hv	Hu	V	GND / REF -	Hw	Vcc / REF+

Cabe destacar que el usuario se debe fijar en el conector del servomotor antes de iniciar su conexión para no equivocarse en el orden, y se debe tener el manual del servomotor con su controlador para realizar las conexiones.

Luego de conectar el servomotor en el controlador, se deben realizar las conexiones del controlador.

Las primeras conexiones son entre el mismo controlador, se conecta el puerto COM con EN para que el servomotor se detenga de forma rápida, si no se va a detener lentamente; y se conecta el puerto COM con F/R para que el servomotor gire contra las manecillas del reloj, si no girará para el otro sentido.

Luego, se sigue con las conexiones del controlador con la fuente de poder. Para ello, se conecta en DC+ el cable en el positivo de la fuente de poder (color rojo) y en DC- el cable en el negativo de la fuente de poder (color negro).

Posteriormente, para la unión con el computador se conecta la velocidad (SPEED) a una salida digital configurada como PWM del Arduino Uno y luego se conecta F/R a una salida digital del mismo Arduino, con el fin de establecer dirección del servomotor. El Arduino luego se conecta al convertidor RS-232 – TTL para poder conectarse mediante un DB-9 a un puerto de la tarjeta de adquisición de datos.

Cabe destacar que para la realización de todas las conexiones de control se requieren cables de tipo TAG o en su defecto cables de 18 AWG; y para las conexiones de potencia del controlador, se requieren cables para 24 [V], que serían cables de 1,5 mm². Estos cables actualmente se encuentran conectados con un código de colores, el cual se observa en la tabla 2 y diagrama 1 de a continuación.

Tabla 2: Código de colores de cables de conexiones del servomotor y controlador, según fábrica.

N° Servomotor	1	2	3	4	5	6	7	8	-	-
Señal Controlador	U	W	Hv	Hu	V	GND / REF -	Hw	Vcc / REF+	DC+	DC-
Código de Color	Rojo	Verde	Negro	Blanco	Amarillo	Azul	Rojo - Negro	Amarillo - Rojo	Café	Celeste

Diagrama 1: Código de colores de cables de conexiones del servomotor y controlador en laboratorio.

N° Servomotor	1	2	3	Señal Controlador	U	REF+	Hv	Código de Color	Negro	Azul	Amarillo
	4	5	6			Hu	Hw			Verde	Blanco
	7	8	9		W	V	REF-		Naranja	Café	Rojo

4.3. Válvula de seguridad.

La denominada válvula de seguridad es la encargada de controlar el embalamiento del conjunto microturbina – generador, desviando el agua hacia la piscina de almacenamiento una vez que dicho conjunto sobre pase los 850 [RPM] de velocidad de rotación.

Esta es una válvula de tres vías (3-vías) automatizada de modelo VFD030HB con actuador modelo M9124-AGA-2, ambos pertenecientes a Jhonson Controls. Su dimensión es de 30 pulgadas y resiste una presión de 175 [psi] al momento de su cierre. Su actuador es de tipo eléctrico y su condición de operación es de tipo “On/Off”.

La válvula se encuentra inmediatamente después de la bomba en la línea hidráulica, siendo conectada mecánicamente a ella, la línea hidráulica, por medio de pernos de sujeción.

Por otro lado, eléctricamente, la válvula se conecta con tres (3) cables de potencia para 24 [V] (cables de 1,5 mm²), uno va a negativo, 24 [V] -, a conectarse a la fuente de poder. Mientras que los otros dos positivos, 24 [V] +, se conectan con el relé en estado sólido de 3 [V] - 24[V], que se encuentra al interior de la caseta. Luego el relé se conecta con el Arduino Uno para comunicarse con la tarjeta de adquisición de datos, todo al interior de la caseta, con el fin de controlar la válvula.

La forma de conectar la válvula de seguridad se muestra en la figura 4 siguiente, y se observa al retirar la tapa del actuador.

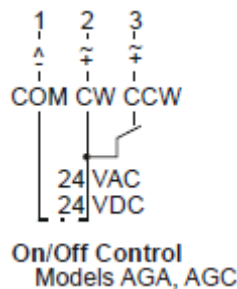


Figura 4: Conexión de cables de la válvula de seguridad.

Este tipo de conexión se realiza producto de que el computador, a través de la tarjeta de adquisición de datos, entrega una señal, esta señal de tipo serial se envía al Arduino Uno para que la traduzca de serial a digital, y así envíe voltaje de 3 a 5 [V] al relé que amplifica el voltaje llevándolo a 24 [V], requerido por la válvula de seguridad.

Cabe destacar que actualmente se encuentra conectada con código de colores mostrados en la tabla 3 siguiente, los cuales se observan a retirar la tapa del actuador.

Tabla 3: Código de colores de cables de conexiones de la válvula de seguridad

Conector Válvula	1: COM (-24[V])	2: CW (+24[V])	3: CCW (+24[V])
Color Cable	Blanco	Rojo	Azul
Código de Color	Blanco: Amarillo/Blanco	Rojo: Amarillo/Blanco	Azul: Amarillo/Blanco

4.4. Válvula reguladora de caudal de la bomba o de sobredimensionamiento.

La denominada válvula reguladora de caudal de la bomba o de sobredimensionamiento es la encargada de controlar que el caudal que se introduce por la línea hidráulica sea el caudal nominal de 35 [l/s], para la experiencia n°1, o sea el caudal de operación de la microturbina hidráulica para caracterizar su operación. Esto se produce debido a que la bomba instalada se encuentra sobredimensionada, ya que, al ser regalada, se busca su utilización dentro de este laboratorio.

Es una válvula tipo mariposa automatizada de modelo VFDN30HB con actuador modelo M9116-GGA-2, ambos pertenecientes a Jhonson Controls. Su dimensión es de 30 pulgadas y resiste una presión de 175 [psi] al momento de su cierre. Su actuador es de tipo eléctrico y su condición de operación es de tipo Modulante, control proporcional entre 0 a 10 [V].

La válvula se encuentra posterior a la válvula de seguridad, en la línea hidráulica, siendo conectada mecánicamente a ella, la línea hidráulica, por medio de pernos de sujeción, igualmente que la válvula descrita anteriormente.

Por otro lado, de forma eléctrica, la válvula posee cuatro (4) conexiones. Dos (2) de ellas son de señal, con voltaje de 0 a 10 [V], "Voltage Input" y "Feedback Output", los cuales requieren un cable para parlante el cual se conecta al Arduino Uno para comunicarse con la tarjeta de adquisición de datos, todo al interior de la caseta, con el fin de controlar la válvula. Y las otras dos (2) conexiones son de potencia, cables de 1,5 mm², por ende, van a la fuente de poder, siendo denominados como rojo positivo y blanco negativo en su conexión.

La forma de realizar la conexión de la válvula de sobredimensionamiento se muestra en la figura 5 siguiente, y se observa al retirar la tapa del actuador.

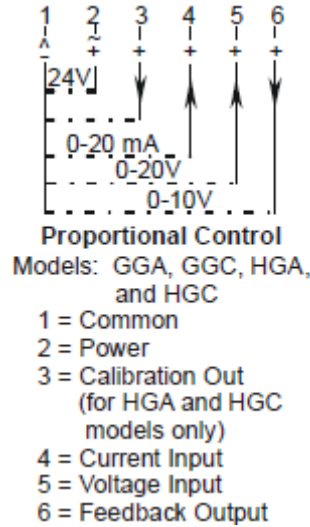


Figura 5: Conexión de cables de la válvula reguladora de caudal de la bomba.

Cabe mencionar que actualmente se encuentra conectada con código de colores mostrados en la tabla 4 siguiente.

Tabla 4: Código de colores de cables de conexiones de la válvula de seguridad

Conector Válvula	1: Common (-24[V])	2: Power (+24[V])	5: Voltage Input	6: Feedback Output
Código de Color	Blanco Amarillo	Rojo Amarillo	Rojo Negro Amarillo	Negro Amarillo

4.5. Caudalímetro.

También llamado flujómetro, es el instrumento que se utiliza para medir el caudal de la microcentral hidráulica.

Este instrumento se separa en dos partes. La parte mecánica, de modelo Optiflux 2000, que se conecta en la línea hidráulica y es la que realiza las mediciones del caudal. Y la parte eléctrica y electrónica, de modelo IFC 300, que es de variante de alojamiento compacto, encargado de mostrar las mediciones realizadas por la parte mecánica del instrumento, para ello lleva una pantalla de visualización, al igual que, de enviar los datos de las mediciones al computador.

Para poder enviar las mediciones, se conecta el cable de señal tipo DS 300 o tipo BTS 300 de forma pasiva, ver manual de IFC 300, de acuerdo con las conexiones de la tabla 5, para luego conectarlo al módulo convertidor de señal Hart a USB en modo normal, el cual se conecta a un módulo USB a DB-9 para poder finalmente unirse al computador por un puerto a la tarjeta de adquisición de datos.

Cabe mencionar que la conexión USB a DB-9 es netamente para que se adquieran los datos a través de la tarjeta de adquisición, ya que, al conectarse directamente por USB al computador es posible captar los datos de las mediciones, sin necesidad de conectarse a la tarjeta de adquisición de datos.

Por otro lado, para entregarle potencia a este instrumento, se requieren dos cables de 24 [V], cables de 1,5 mm², los cuales se conectan en la sección de potencia del flujómetro, de acuerdo con las conexiones de la tabla 5. Posteriormente, estos cables se conectan a la fuente de poder del laboratorio para entregar 24 [V].

Cabe destacar que el módulo convertidor de señal Hart a USB puede alimentar en forma de potencia al flujómetro. Para ello sólo se requiere cable de señal conectado de forma activa y el módulo convertidor Hart a USB en modo 24 [V].

Además, se requiere una conexión de tierra que se realiza tanto de forma interna, ver manual del IFC 300, como externa. Para ello se conecta un cable de alambre de cobre de 1,5 a 2,5 mm² a la tierra del laboratorio de Turbomáquinas hidráulicas y a la tierra del caudalímetro de forma interna, del IFC 300, como la tierra externa, del Optiflux 2000.

Las conexiones del caudalímetro poseen, igual que las válvulas, un código de colores el cual se muestra a continuación.

Tabla 5: Código de colores de cables de conexiones de caudalímetro.

Conector Caudalímetro	L	N	A+	A	A-	Tierra
Tipo de Conector	Potencia + 24 [V]	Potencia - 24 [V]	Señal Activa	Señal Activa o Pasiva	Señal Pasiva	-
Código de Color	Café	Azul	Blanco	Negro	Blanco	Verde

Es de importancia mencionar que la conexión física de los cables del caudalímetro se encuentra al costado de este en su tapa roscada, la cual, sólo se requiere girar.

4.6. Tubo de Pitot.

Es el instrumento que se utiliza para medir la presión de la microcentral hidráulica.

Al igual que el instrumento anterior, se separa en dos partes. Una parte mecánica y otra eléctrica y electrónica, las cuales son de modelo EJX11A, pertenecientes a Yokogawa. Este instrumento alcanza hasta 160 [bar] como presión máxima.

La parte mecánica sólo es para sujetar la parte eléctrica y electrónica y para que pase el agua por su interior, siendo conectada en la tubería hidráulica, según el manual de EJX11A. Mientras que la parte eléctrica y electrónica realiza las mediciones a través de diferencias de presión por medio de tubos que van desde esta sección a la parte mecánica, y se sujeta a una base que posee la parte mecánica del tubo de Pitot.

Además, la parte eléctrica y electrónica posee una pantalla en la cual se pueden observar las mediciones realizadas y en su reverso se encuentran las conexiones eléctricas y de control, tanto para electrificar el instrumento como para poder enviar las mediciones realizadas al computador.

Para las conexiones, se debe conectar dos cables de potencia de 24 [V], cables de 1,5 mm², de los cuales, además, llevan en señal tipo Hart las mediciones realizadas.

Por lo tanto, para este instrumento los cables de potencia son a su vez cables de envío de mediciones, por ello, se utiliza el módulo convertidor de Hart a USB el cual alimenta al tubo de Pitot en su modo 24 [V] y 700 [Ω], y a su vez obtiene las mediciones para luego conectarlo a un módulo USB a DB-9, y así finalmente conectarse al computador por un puerto a la tarjeta de adquisición de datos.

Cabe mencionar que la conexión USB a DB-9 es netamente para que se adquieran los datos a través de la tarjeta de adquisición, ya que, al conectarse directamente por USB al computador es posible captar los datos de las mediciones, sin necesidad de conectarse a la tarjeta de adquisición de datos.

Además, se requiere una conexión de tierra, que se realiza en cualquiera de las dos (2) tierras internas existentes. Para ello se conecta un cable de alambre de cobre de 1,5 a 2,5 mm² a la tierra del laboratorio de Turbomáquinas hidráulicas y a la tierra del tubo de Pitot, de forma interna, ver manual EJX11A.

Igual que en los elementos anteriores, las conexiones del tubo de Pitot poseen un código de colores el cual se muestra a continuación, en la tabla 6.

Tabla 6: Código de colores de cables de conexiones del tubo de Pitot.

Conector Caudalímetro	Positivo +24 [V]	Negativo - 24 [V]	Tierra
Código de Color	Rojo Rojo - Amarillo	Blanco Rojo - Amarillo	Verde

Es de importancia mencionar que la conexión física de los cables del tubo de Pitot se encuentra en la parte posterior de la pantalla y es de tapa roscada, por ende, para su instalación sólo se requiere girar.

4.7. Torquímetro y tacómetro.

El torquímetro es el instrumento para medir el torque en el eje del conjunto microturbina – generador. Mientras que el tacómetro es el instrumento que se mide la velocidad de rotación del conjunto microturbina – generador.

Ambos instrumentos se encuentran en el mismo transductor de modelo RWT420 el cual se conecta directamente con acoples entre el eje de la microturbina hidráulica y el generador, siendo parte de este conjunto. Por ende, cuando gira el conjunto, este transductor mide su torque y su velocidad de rotación.

Eléctricamente, este transductor se conecta a través de un cable DB-15 al computador, para ser electrificado y enviar las mediciones realizadas. Esta conexión puede ser tanto en el modo análogo del transductor como en el digital. En nuestro caso será en el modo digital.

Por lo tanto, para conectar el transductor al computador se utiliza el cable DB-15 nombrado anteriormente, unido a la entrada digital del transductor, y en conjunto con sus cables del modo digital, se conecta por DB-9 a un puerto de la tarjeta de adquisición de datos de forma directa, todo al interior de la caseta.

Cabe destacar que al no poder alcanzar la distancia del transductor a la entrada del puerto de la tarjeta el cable del transductor, se realiza un alargador de hembra DB-15 tanto para la entrada como para la salida. Este alargador posee un código de colores para los 15 cables internos al momento de su construcción. Tal código se muestra como sigue en la tabla 7.

Tabla 7: Código de colores de alargador DB-15 para transductor de torquímetro y tacómetro.

Pin Alargador	1	2	3	4	5	6	7	8
Código de Color	Naranja	Negro	Verde Agua	Café	Rosado	Blanco Negro	Verde Agua Negro	Rojo

Pin Alargador	9	10	11	12	13	14	15
Código de Color	Blanco	Amarillo	Verde Claro	Azúl	Gris	Celeste	Morad

4.8. Amperímetro y componentes.

El amperímetro de modelo PCE-PA 6000 de fabricante PCE Instruments es el instrumento que mide la corriente eléctrica (amperímetro), la frecuencia eléctrica (frecuencímetro) y el voltaje (voltímetro).

De acuerdo a sus especificaciones técnicas, ver hojas de datos, este instrumento posee los siguientes rangos de medición, de importancia:

- 1 [W] a 6000 [W] de potencia, con un error de $\pm 1,5\%$ + 1 digital.
- 10 [A] máximos de forma directa, con un error de $\pm 1\%$ + 1 digital.
- 10 [Hz] a 999 [Hz] de frecuencia, con un error de $\pm 1\%$ + 1 digital.
- 0,1 [V] a 600 [V], con un error de $\pm 1\%$ + 1 digital.

Como la potencia de la microcentral hidráulica es de 10 [kW] nominales y 12 [kW] máximos, se utiliza la pinza amperimétrica de modelo PCE-CA 502, de fabricante PCE Instruments, para poder obtener mayor rango, y obtener los datos de medición. A su vez, a través de esta medición, se logra obtener la medición de la corriente eléctrica producida por la microcentral hidráulica.

Por lo tanto, la pinza amperimétrica es un componente anexo del amperímetro la cual se mantiene conectada a los cables de fase del generador, antes del interruptor. Y por el otro lado, se mantiene conectada su negativo al puerto COM (de potencia) y su positivo al puerto de la potencia, ambos perteneciente al amperímetro.

Por otra parte, se conecta una pinza de multímetro al mismo amperímetro para medir voltaje y frecuencia. Su negativo se conecta al puerto COM (de voltaje) y su positivo al puerto del voltaje. Mientras, por el lado de las pinzas, para obtener las mediciones, se conecta a una fase del generador y al neutro, de forma de distribución tipo paralelo, para así obtener mediciones del voltaje, y al mismo tiempo obtiene mediciones de frecuencia.

Además, luego de las mediciones, todo se observa en la pantalla de interfaz del amperímetro, el cual se conecta, a través de su adaptador de RS – 232, directamente a un puerto de la tarjeta de adquisición de datos, para que el computador obtenga las mediciones realizadas.

Cabe mencionar que los cables utilizados para realizar las mediciones son cables de multímetro, sin requerimiento de medidas, pero por protección se utiliza uno de gran sección transversal.

4.9. Variador de Frecuencia

El variador de frecuencia, también denominado VDF en siglas, es el equipo que varía la velocidad de rotación de la bomba de la microcentral hidráulica. Se requiere que se utilice a través del computador para la experiencia n°2 de caracterización de la microcentral hidráulica, mientras que para la experiencia n°1, no es relevante su uso, por ende, no es necesario que esté conectado, y si lo está, no debe variar ningún parámetro de la bomba, sólo mantenerla en el punto de operación requerido.

El variador de frecuencia es de fabricantes procedentes de China, de modelo HC 800. Es un inversor que puede controlar la velocidad de giro de los motores asíncronos, logrando controlar el motor de la bomba perteneciente a la microcentral hidráulica.

El variador posee dos conexiones, una eléctrica y otra de control. La eléctrica se realiza de forma trifásica directamente de la toma de corriente del variador, ver figura 6, a un enchufe perteneciente al tablero eléctrico que se encuentra en el laboratorio de turbomáquinas, lugar donde se emplaza la microcentral. Sus cables de conexión son trifásicos de alto amperaje, para ello ver manual de variador de frecuencia.

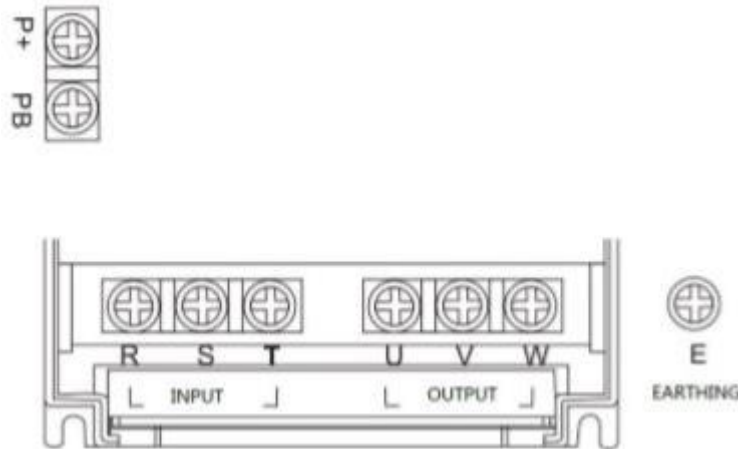


Figura 6: Toma de corriente del variador de frecuencia, de acuerdo a su manual.

Por otro lado, la conexión de control se realiza conectando la entrada AI0, entrada de 10 [V], y la tierra (GND) al computador. Ambos terminales, se encuentran en el circuito de control del variador, ver figura 7.

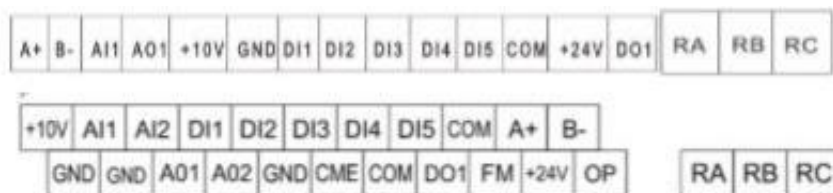


Figura 7: Circuito de control del variador de frecuencia, de acuerdo a su manual.

Para conectar ambos terminales al computador se debe conectar la tierra del variador a la tierra del Arduino Uno (GND) y la entrada AI0 a una entrada PWM del Arduino Uno. Posteriormente, el Arduino Uno se conecta con el conversor RS – 232 a TTL con un puerto de la tarjeta de adquisición de datos, y así se obtiene la unión del control del computador con el del variador de frecuencia. Esta conexión

se realiza con cables para parlante, pues es un cable de señal de bajo voltaje y amperaje, y posee un código de colores la cual se observa en la tabla 8, de a continuación.

Tabla 8: Código de colores de conectores de control del variador de frecuencia para su control por computador.

Conector VDF	A11	GND
Código de Color	Negro Rojo	Rojo Rojo

Cabe destacar que si bien se requiere una señal digital de 0 a 10 [V] para el variador de frecuencia, el Arduino Uno entrega entre 0 a 5 [V] de señal, obteniéndose el fin que se requiere para controlar el VDF del computador.

Tal control nombrado anteriormente, se realiza para al experiencia n°2, en la cual, se entrega un parámetro de velocidad de la bomba al computador, este envía a través de una señal RS – 232 al Arduino Uno tales valores, el Arduino Uno envía a través de su programación una señal, de tipo digital, de voltaje (entre 0 a 5 [V]) al puerto PWM perteneciente al variador de frecuencia, para que luego este voltaje sea interpretado por el variador y cambie la velocidad de rotación de la bomba al parámetro introducido en el computador.

4.10. Estufas y ventiladores.

Son seis (6) estufas monofásicas de 2000 [W] en dos (2) niveles, 1.000 y 2.000 [W], conectadas en pares a cada fase del generador, con cables de 2,5 mm² para el generador y 1,5 mm² para cada monofase de las estufas, teniendo un código de colores pertenecientes a la conexión entre estufas y generador, de acuerdo a la tabla 8.

Tabla 8: Código de colores de cables de conexión entre cables positivos de estufas y fases del generador.

Color Cable Estufa	Negro	Negro Negro	Negro Rojo
Color Cable Generador	Café	Negro Azul	Rojo

Las estufas con sus ventiladores se encuentran sobre una repisa, en la cual, cada una se conecta por medio de entrada macho monofásica a un interruptor, 2 por cada nivel de la repisa. Esta conexión eléctrica se realiza considerando que el color negro (o café) son los positivos y el azul (o celeste) son los neutros. Los neutros se conectan directamente al neutro del generador, mientras que cada par de estufas por medio del enchufe hembra y en disposición de tipo paralelo, se conectan a cada fase del generador, a través de un interruptor.

El interruptor, es de 16 [A] y es un método de protección de las estufas y del generador ante un alza de corriente, al momento de operar la microcentral hidráulica.

Por otro lado, cada estufa posee un (1) ventilador, el cual se encuentra separado eléctricamente de las estufas, pues se conectan directamente a la red para mantener su estabilidad y mantenerlos siempre encendidos y proteger que las estufas se quemen.

Lo anterior se debe, ya que, incluso al momento de que la microcentral hidráulica deje de entregar electricidad requerida para el funcionamiento de las estufas, los ventiladores sigan funcionando para disipar el calor obtenido por las estufas en su operación, y así mantenerlas protegidas.

Por otra parte, para la operación de las estufas y los ventiladores, estos siempre deben estar conectados y encendidos antes de iniciar la operación de la microcentral hidráulica. Mientras que las estufas siempre deben encontrarse al máximo de su potencia, y conectadas al menos una en cada fase con su valor mínimo, 1000 [W].

Posteriormente, se va conectando en cada fase y al mismo tiempo una estufa con el mismo nivel de potencia, ojalá de nivel 1, con el fin de obtener todos los datos y casos posibles, o también aumentar el nivel de potencia al 2 a cada estufa ya conectada, todas al mismo tiempo. Es de gran importancia que se conecten, o aumenten el nivel a cada estufa, de cada fase al mismo tiempo que de las otras fases para no generar vibraciones en el eje, con posibilidades de romperlo o dañarlo operativamente.

La variación de carga se realiza para poder realizar la experiencia n°1, de aumentar o disminuir la carga a un voltaje y frecuencia constante.

4.11. Fuente de Voltaje.

La fuente de voltaje que se requiere para el laboratorio es de 24 [V] y de 15 [A] aproximadamente.

Su función es entregar voltaje al controlador del servomotor, al caudalímetro, a la válvula de sobredimensionamiento, y al negativo de 24 [V] a la válvula de seguridad.

Para el caso del controlador del servomotor, caudalímetro, válvula de sobredimensionamiento, sus cables de potencia se conectan al positivo (rojo) y negativo (negro) de acuerdo al código de colores de cada uno, en tipo de distribución paralelo, para poder entregar a cada elemento el mismo voltaje, 24 [V]. Mientras que la válvula de seguridad, se conecta su negativo al negativo de la fuente para obtener los -24 [V] requeridos.

Todos los cables de potencia conectados a la fuente de voltaje deben ser para 24 [V], siendo utilizados cables de 1,5 mm².

4.12. Arduino Uno y conversor RS-232 a TTL.

Tal como se ha dicho en los detalles anteriores, el Arduino Uno se utiliza para convertir las señales analógicas y digitales de los instrumentos, válvulas y servomotor para poder ser transmitidas a la tarjeta de adquisición de datos de señal tipo serial, y realizar las realimentaciones de intercambios de señal que son requeridos.

Un Arduino Uno posee las siguientes conexiones:

- Seis (6) entradas analógicas para enviar voltaje entre 0 y 5 [V].
- Catorce (14) entradas digitales que se pueden configurar como entrada o salida.

Debido a que se requiere para cada elemento integrado al sistema de control realiza las conexiones siguientes:

- VDF: Requiere entre 0 y 10 [V], es necesario conectar un convertidor que tome un dato del puerto RS-232, y lo convierta a un voltaje. Para ello, los Arduinos pueden entregar entre 0 y 5 [V].
- Válvula de seguridad: Requiere de un convertidor de RS-232 a digital.
- Válvula para el sobredimensionamiento de la bomba: Posee “Voltage Input” y “Feedback Output”, ambas analógicas. Nuevamente, para ello se requiere un convertidor análogo-digital y digital-análogo. Por ende, un Arduino puede hacer todo eso.
- Caudalímetro y Tubo de Pitot: Al poseer los convertidores HART a USB no se requiere modificación de señal, por ende, no se requiere conexión al Arduino ni es necesario conectarse a la tarjeta. Pero debido a querer obtener los parámetros por la tarjeta de adquisición, se transforma de USB a RS232 con un DB-9 para unirlos cada uno a algún puerto de la tarjeta de adquisición de datos, definido por el usuario.
- Torquímetro: Según el manual, el RWT420 trae RS-232, por lo tanto, se conecta de forma directa a la tarjeta a través de un cable serial DB-15 a DB-9, sin pasar por USB.
- Amperímetro y medidor de potencia: Tiene RS-232, así que se utiliza esa conexión usando un puerto DB-9 de la tarjeta de adquisición de datos.
- Servomotor: Requiere una conexión similar a la válvula para el sobredimensionamiento. Para ello, un Arduino puede hacer eso.

Se tiene que al Arduino se le pueden configurar seis (6) de esas catorce (14) entradas digitales, como PWM, siendo para su aplicación salidas analógicas entre 0 y 5 [V]. Esta configuración se realiza a través de la programación del Arduino por medio del programa Arduino IDE.

Realizando tal modificación en la configuración del Arduino, pueden resultar las siguientes conexiones:

- VDF: Conectada a una salida PWM del Arduino y a una tierra GND.
- Válvula de seguridad: Conectada a dos salidas digitales del Arduino.
- Válvula para el sobredimensionamiento de la bomba: Conectada a una segunda salida PWM del Arduino, más una entrada analógica.
- Servomotor: Una salida PWM para la velocidad, una salida digital para fijar dirección (abre o cierra).

Posteriormente, el Arduino se conecta a un puerto de la tarjeta de adquisición de datos mediante un conversor RS-232 a TTL. Ello se realiza conectando los puertos de TX, RX y GND del Arduino con los del conversor.

5. Puesta en marcha de cada experiencia.

Luego de la individualización de cada elemento perteneciente a la microcentral hidráulica, se requiere realizar varias acciones antes del inicio de la operación de la misma, para cada una de las dos experiencias mencionadas.

De estas acciones hay algunas que se realizan para ambas experiencias, estas son las siguientes:

- 1) Realizar todas las conexiones eléctricas y de control de cada elemento de la microcentral hidráulica.
- 2) Instalar las dos conexiones de 68-pines de la tarjeta de adquisición de datos al computador.
- 3) Unir las conexiones de control de los elementos de la microcentral hidráulica a los puertos de la tarjeta de adquisición de datos.
- 4) Conectar los cables de potencia de los elementos de la microcentral, que la requieren de forma externa, a la fuente de poder.
- 5) Encender el módulo convertidor Hart – USB del tubo de Pitot para entregarle potencia, y fijarlo en su modo de funcionamiento. Además, de encender el del caudalímetro para la toma de mediciones.
- 6) Encender computador y pantalla.
- 7) Conectar Arduino Uno a computador por medio de cable USB y por medio de módulo convertidor RS232 a TTL a un puerto de la tarjeta de adquisición de datos.
- 8) Abrir el programa LabVIEW “Turbina Pelton” en el computador y colocar cada elemento de la microcentral hidráulica en su puerto correspondiente.
- 9) Encender el variador de frecuencia mediante la pulsación del botón “Encendido” del tablero eléctrico.
- 10) Encender los ventiladores mediante la pulsación del botón “On” del alargador que se encuentra en el nivel 1 de la repisa.
- 11) Colocar a una estufa por fase en el nivel 1 de su potencia.
- 12) Encender la fuente de poder y situarla en 24 [V].
- 13) Encender controlador del servomotor.
- 14) Instalar la pinza amperimétrica y las puntas para medir voltaje en los cables del generador y en el amperímetro.
- 15) Encender amperímetro.
- 16) Mantener inyector cerrado.
- 17) Mantener la válvula de seguridad abierta con dirección a la microcentral hidráulica.
- 18) Revisar que el programa LabVIEW muestre que cada elemento de la microcentral hidráulica se encuentre con su puerto de la tarjeta de adquisición.

- 19) Revisar el funcionamiento de las válvulas, variador de frecuencia y controlador del servomotor utilizando el computador y el Arduino Uno.
- 20) Establecer el valor de apertura de referencia, en el programa LabVIEW, para dimensionar la bomba con la válvula reguladora de caudal de la bomba.
- 21) Abrir levemente el agujero controlador por el inyector.

Posteriormente, y una vez que cada elemento, en conjunto con sus conexiones y con el computador, se encuentren funcionando correctamente, se pasa a realizar la puesta en marcha de cada experiencia.

- 5.1. Experiencia n°1: Generación distribuida de una microcentral hidráulica con variación de cargas a frecuencia y voltaje constantes.

Las acciones a realizar para iniciar esta experiencia son las siguientes:

- 1) En el programa LabVIEW “Turbina Pelton” del computador colocar en modo automático el control de la microcentral hidráulica.

- 5.2. Experiencia n°2: Caracterización del funcionamiento de una microturbina hidráulica.

Las acciones a realizar para iniciar esta experiencia son las siguientes:

- 1) En el programa LabVIEW “Turbina Pelton” del computador colocar en modo semi - automático el control de la microcentral hidráulica.
- 2) Establecer el valor del parámetro inicial para el variador de frecuencia, en el programa LabVIEW.

6. Operación de cada experiencia.

Una vez realizado las acciones anteriores de puesta en marcha, se puede operar cada experiencia.

- 6.1. Experiencia n°1: Generación distribuida de una microcentral hidráulica con variación de cargas a frecuencia y voltaje constantes.

Para operar esta experiencia se debe realizar los siguiente:

- 1) Iniciar el funcionamiento de la bomba con 40 [m] de fluido y caudal acorde a esta altura en operación.
- 2) Ajustar caudal de la bomba a través de la válvula de sobredimensionamiento de la bomba si es que se requiere. Se realiza acorde a los datos entregados por el caudalímetro.
- 3) Esperar a que el sistema se estabilice en 50 [Hz] y 220 [V] con una estufa conectada en cada fase del generador.

- 4) Variar los niveles de potencia de las estufas, asegurándose de tener la misma potencia requerida en cada fase, y de al menos una estufa en nivel 1 de potencia en cada fase del generador.

6.2. Experiencia n°2: Caracterización del funcionamiento de una microturbina hidráulica.

Las acciones a realizar para iniciar esta experiencia son las siguientes:

- 1) Abrir el paso del caudal a la microturbina hidráulica, por medio del servomotor, acorde a la distancia del servomotor requerida.
- 2) Iniciar el funcionamiento de la bomba en el punto de operación que se requiera. Para ello se establece un parámetro inicial en el variador de frecuencia.
- 3) Variar el caudal que ingresa al circuito hidráulica por medio de la válvula de sobredimensionamiento de la bomba.
- 4) Variar el punto de operación de la bomba, variando su velocidad por medio del variador de frecuencia.
- 5) Modificar el paso del caudal a la microturbina hidráulica, por medio de introducir en el computador un valor para ser enviado al controlador de este.
- 6) Volver a realizar los puntos 3, 4 y 5, hasta obtener todos los puntos de las curvas de potencia, TDH y rendimiento versus el caudal.

Anexo I

Imágenes del Montaje Final.

Información se muestra en página siguiente.

Página intencionalmente dejada en blanco.

Primero se pueden ver tres vistas generales del montaje del laboratorio en las figuras H.1, H.2 y H.3 siguientes.



Figura H.1: Vista general del laboratorio que contiene a la microcentral hidráulica.



Figura H.2: Vista particular del laboratorio que contiene a la microcentral hidráulica, centrado en tablero eléctrico, variador de frecuencia y válvulas requeridas.

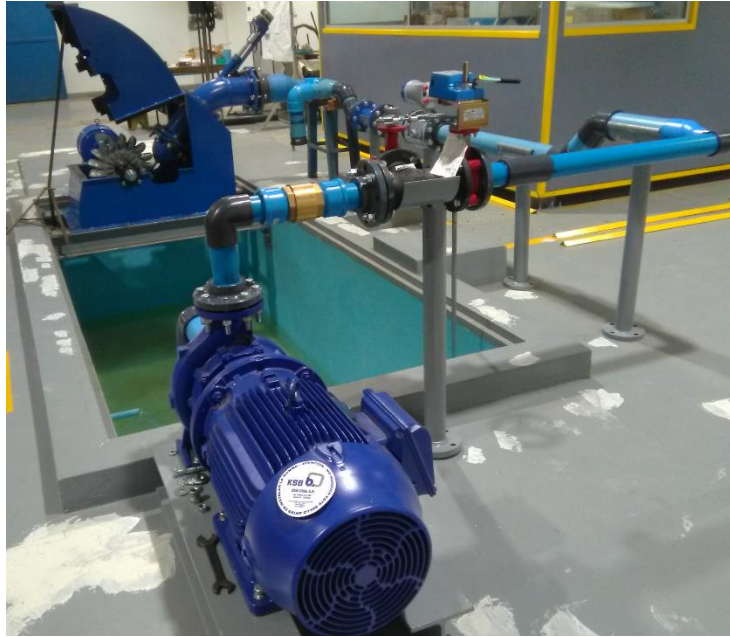


Figura H.3: Vista particular del laboratorio que contiene a la microcentral hidráulica, centrado en bomba, microturbina y generador.

Luego, de forma específica se muestran los equipos y elementos requeridos para la micro-central hidráulica. Para mostrarlos, se inicia desde el sector del variador de frecuencia y la bomba, figuras H.4 y H.5, y H.6, para luego proseguir de acuerdo al sistema hidráulico.



Figura H.4: Interior de variador de frecuencia electrificado y conectado su control.

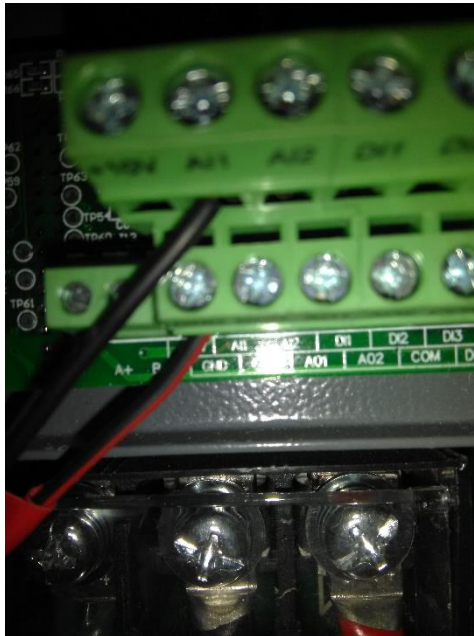


Figura H.5: Imagen de conexión específica del control del variador de frecuencia.



Figura H.6: Bomba regalada para la microcentral hidráulica.

Se continúa con las válvulas, mostrándolas de forma general en la figura H.7, para luego observar de forma específica a la válvula de seguridad con su conexión, en figuras H.8 y H.9, y a la válvula reguladora del sobredimensionamiento de la bomba, en figuras H.10 y H.11.



Figura H.7: Vista general de válvulas.



Figura H.8: Detalle de conexiones de válvula de seguridad con sus conexiones.



Figura H.9: Tapa de válvula de seguridad M9124-AGA-2.



Figura H.10: Detalle de conexiones de válvula reguladora de sobredimensionamiento de la bomba.



Figura H.11: Conexiones y tapa de válvula reguladora de sobredimensionamiento de la bomba M9116-GGA-2.

Posteriormente, se observa en la figura H.12 la línea hidráulica de la microcentral.



Figura H.12: Línea hidráulica de microcentral.

Luego, se destaca el caudalímetro con el detalle de sus conexiones, figuras H.13 y H.14, y del mismo modo, el tubo de pitot, figuras H.15 y H.16.



Figura H.13: Caudalímetro de microcentral hidráulica.

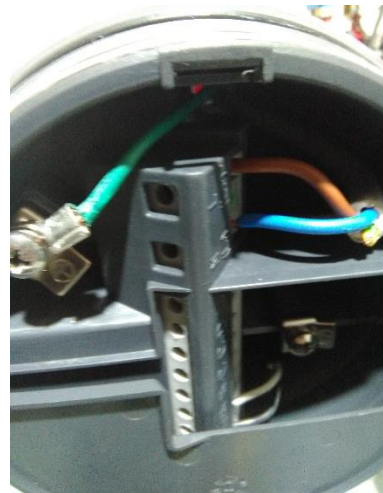


Figura H.14: Conexiones del caudalímetro de microcentral hidráulica.

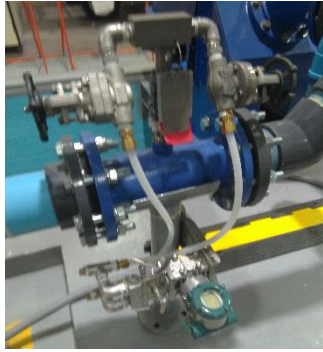


Figura H.15: Tubo de Pitot de microcentral hidráulica.



Figura H.16: Conexión de tubo de pitot de microcentral hidráulica.

Después, viene todo el sistema de sujeción transmisión de movimiento del servomotor al inyector, imagen que se observa en la figura H.17.



Figura H.17: Apoyo de servomotor con acople y eje del inyector.

Posteriormente, sigue la zona de la carcasa, figura H.18, dónde en su interior se observa la microturbina hidráulica instalada con los distintos acoples internos del inyector, figura H.19, además, del detalle de la boquilla o cúpula de apoyo de la aguja del inyector con la microturbina hidráulica, figura H.20, y la aguja del inyector con los álabes (cucharas) de la microturbina hidráulica en detalle, figura H.21.

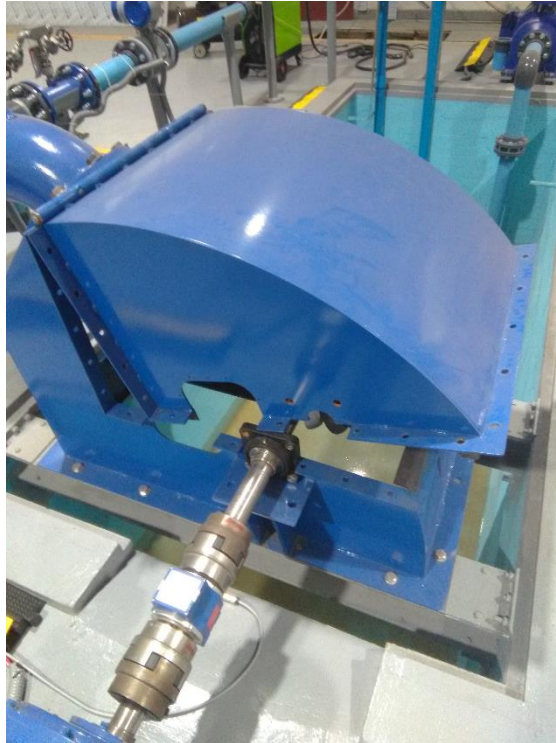


Figura H.18: Carcasa de protección de la microturbina hidráulica.

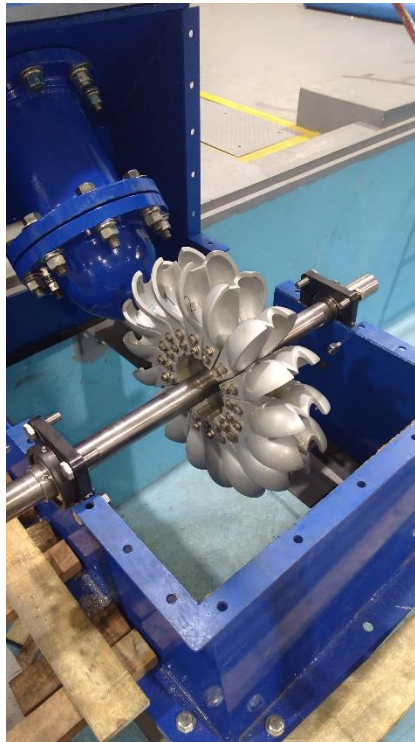


Figura H.19: Vista general de la microturbina hidráulica con los acoples internos del inyector.

Luego, se pasa a mostrar el torquímetro/tacómetro, figuras H.22 y H.23, y el generador, figura H.24 y H.25.

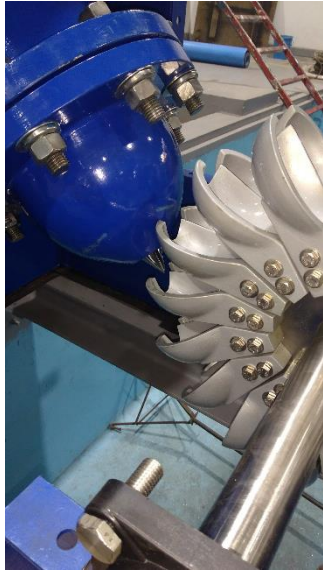


Figura H.20: Detalle de microturbina hidráulica con elementos de acople del inyector.



Figura H.21: Detalle de cucharas de microturbina hidráulica con aguja del inyector.



Figura H.22: Torquímetro/tacómetro con placa de datos.



Figura H.23: Torquímetro/tacómetro conectado.



Figura H.24: Generador de microcentral hidráulica con eje y torquímetro.



Figura H.25: Generador de microcentral hidráulica en solitario.

A continuación, siguen las imágenes de las estufas que se utilizan como resistencias al conectarse y desconectarse del sistema eléctrico, figura H.26, luego, los interruptores monofásicos para conectarlas a cada fase del generador en pares, figura H.27, y el alargador que conecta directo a la red sus ventiladores, figura H.28, para evitar la falla de las resistencias.



Figura H.26: Repisa con 6 estufas utilizadas como resistencias que requieren potencia eléctrica de la microcentral.



Figura H.27: Interruptores monofásicos para conectar las estufas en pares a cada fase del generador.

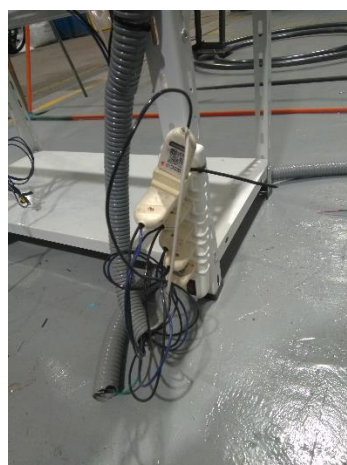


Figura H.28: Alargador de conexión en la red eléctrica para los ventiladores.

Además, como último elemento de la parte exterior de la microcentral hidráulica se muestra la piscina, figura H.29 de a continuación.



Figura H.29: Microcentral hidráulica con su piscina.

Continuando con mostrar los elementos requeridos, se encuentra la caseta, figura H.30 y el servomotor utilizado, figura H.31.

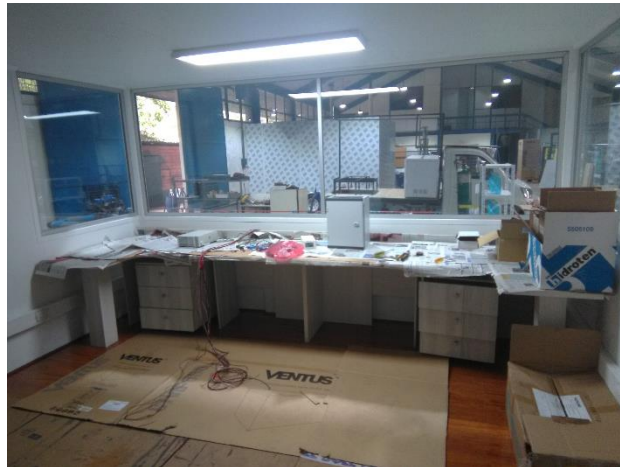


Figura H.30: Caseta de control y toma de datos de la microcentral hidráulica.



Figura H.31: Servomotor de solución propuesta.

Finalmente, en el interior de la caseta se observa el controlador del servomotor, figura H.32, la fuente de poder, figura H.33, el arduino y el convertidor TTL-RS232, figuras H.34 y H.35.

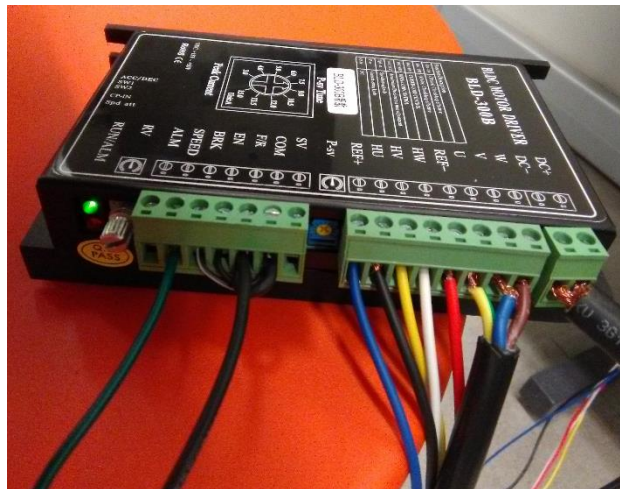


Figura H.32: Controlador del servomotor conectado.



Figura H.33: Fuente de poder para instrumentos, válvulas y controlador del servomotor.



Figura H.34: Arduino encendido y conectado con servomotor para convertir su señal.



Figura H.35: Convertidor TTL-RS232 conectado con puerto de tarjeta de adquisición.