



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**PERFECCIONAMIENTO DE SISTEMA DE CONTROL Y PRUEBAS  
PARA UN PROTOTIPO DE CENTRAL MICRO-HIDRÁULICA  
OPERADA COMO GENERADOR DISTRIBUIDO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

**DIEGO IGNACIO MEDEL CHACÓN**

PROFESOR GUÍA:  
RODRIGO PALMA BEHNKE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ARIEL VALDENEGRO ESPINOZA  
NELSON MORALES OSORIO

SANTIAGO DE CHILE  
ENERO 2010

RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA  
POR: DIEGO IGNACIO MEDEL CHACÓN  
FECHA: ENERO 2010  
PROF. GUÍA: Sr. RODRIGO PALMA BEHNKE

## PERFECCIONAMIENTO DE SISTEMA DE CONTROL Y PRUEBAS PARA UN PROTOTIPO DE CENTRAL MICRO-HIDRÁULICA OPERADA COMO GENERADOR DISTRIBUIDO

La generación de electricidad se ha visto afectada debido a problemas con el abastecimiento de energéticos primarios y el alza de precios, estimulándose de esta forma el desarrollo de nuevas tecnologías con el fin de abastecer la creciente demanda. Además, los altos índices de contaminación mundial y el aumento de la preocupación de parte de la población respecto a este tema han producido que la mayoría de los nuevos desarrollos apunten a disminuir la contaminación. Consecuentemente, las tecnologías de generación eléctrica relacionadas con energías renovables se asoman cada vez con mayor fuerza como medio de obtención de electricidad. Dentro de las energías renovables se encuentra la hidráulica, donde Chile presenta un elevado potencial disponible gracias a su geografía y clima. Por otro lado, la Generación Distribuida (GD) ha visto en alza convirtiéndose en una opción para facilitar el aumento de generación con tecnologías renovables, permitiendo la interconexión de pequeños medios de generación conectados a los sistemas de distribución.

En este contexto en el Departamento de Ingeniería Eléctrica (DIE) de la Universidad de Chile se ha estado desarrollando un prototipo para laboratorio de una Central Micro-Hidráulica (CMH) utilizando una turbina de tipo Pelton.

El objetivo de esta memoria de título apunta al perfeccionamiento del prototipo de CMH, integrando los controles necesarios para la correcta simulación del recurso hidráulico además de la implementación de un sistema de control local, monitoreo y control remoto que permita la operación del prototipo como un generador distribuido modificando sus modos de operación entre conectado o aislado de la red eléctrica.

Durante el desarrollo de este trabajo se realiza una revisión del estado del arte sobre GD y la forma en que se relaciona con las centrales CMH, ahondando en los componentes de esta última y los tipos de control utilizados. Luego se exponen las leyes que rigen el comportamiento de una caída natural de agua y la forma en que ésta puede ser simulada con una bomba centrífuga. A partir de esto se integran los controles correspondientes al prototipo de CMH construido, incluyendo los sistemas de medición y accionamiento para modificar las variables eléctricas dentro de los rangos establecidos de forma manual o automática. Igualmente, se desarrolla un sistema de monitoreo y control remoto mediante una interfaz gráfica desarrollada en la plataforma comercial LabVIEW, que permite la conexión entre un operador local y la CMH de manera que el operador puede verificar su funcionamiento y decidir sobre su operación.

Se obtiene como resultado un prototipo de CMH para laboratorio que permite simular el comportamiento de una central real, con sus respectivos controladores y un sistema de monitoreo y control remoto validado, alimentando cargas locales e inyectando cerca de 2 kW a la red. La reproducción del recurso hidráulico utilizando una bomba centrífuga muestra resultados satisfactorios, comprobándose que la altura equivalente simulada permanece constante gracias a la realimentación de la presión. El caudal del recurso hidráulico puede variar entre 0 a 300 l/min con un rango de alturas disponibles entre 30 a 55 metros. El funcionamiento del control implementado en la CMH presenta resultados satisfactorios en cuanto a su funcionamiento, permitiendo la operación de la CMH en forma aislada o conectada a la red, siendo validado experimentalmente. Sin embargo, al operar aislada de la red, la variación de la tensión y frecuencia, para modificaciones de carga mayores al 40% de la potencia máxima entregada por la CMH, sobrepasan el 10%, por lo que la calidad del suministro no se encuentra dentro de los rangos permitidos por la Norma Chilena.

Se concluye que el perfeccionamiento del prototipo ha sido satisfactorio, convirtiéndose en una herramienta docente efectiva para comprender el funcionamiento de esta tecnología en un laboratorio, además de la escalabilidad del sistema de control y monitoreo implementado. Se propone como trabajo futuro mejorar el funcionamiento del controlador, realizando cambios en su topología y agregando mediciones de variables importantes para el funcionamiento del sistema.

*A ti Cholquita, porque fuiste una luz en mi vida...*

*A mi madre, fuente interminable de amor maternal  
y pilar fundamental en todo lo que he logrado.*

*A mi padre, por su apoyo incondicional  
y por ser un ejemplo de superación y perseverancia.*

*A mi hermana, por aguantarme todo  
y ser más que una hermana, mi mejor amiga.*

# Agradecimientos

Mis primeros agradecimientos son para mis padres, quienes a través de los años me han entregado los valores y consejos que me han permitido llegar a ser la persona que ahora soy. A mi mamá “nanita” y a mi hermana Vale por la paciencia, preocupación y cariño que me entregan día a día, sin ustedes nada de esto habría sido posible. A mi papá Adolfo, gracias por todo lo que me has entregado a pesar de la distancia y por tu apoyo incondicional en todo lo que he hecho.

Quisiera agradecer a toda mi familia, tíos, primos y abuelita, quienes siempre me han apoyado y me han demostrado infinita confianza, gracias por ser una familia genial.

A mi segunda familia (Medel – Arnello) por su apoyo a la distancia e interés mostrado en mí desarrollo personal.

A mi profesor guía Rodrigo Palma, quién siempre se mostró interesado en el desarrollo de mí memoria de título y por todo el apoyo entregado durante los últimos años. Al profesor Nelson Morales, por la ayuda al desarrollo de éste proyecto y buena disposición.

A mi amigo Pablo Jiménez, por compartir toda la etapa universitaria y parte de la escolar en conjunto, gracias por ayudarme a realizar gran parte de mí memoria y estar en los momentos más complicados trabajando codo a codo junto a mí.

A mis amigos eléctricos, quienes me acompañaron durante los últimos años y compartieron conmigo un gusto en común, la ingeniería eléctrica. A todos los de “piso4” y “los piratas” por esos asados, pichangas y conversaciones que sin duda seguirán realizándose en algún lugar, gracias por hacer que todo resultara más fácil. Al grupo del laboratorio, con quienes en el último tiempo pasé la mayor parte del tiempo y aprendí a conocer y a valorar.

A Claudio Vergara, por todos los comentarios, consejos y aportes realizados al momento de efectuar éste proyecto, sin duda que todo habría resultado más complicado sin tu ayuda.

Mención especial a Jorge “Don Villa” Villalobos por toda la ayuda brindada al desarrollo de esta memoria y por siempre sacarnos una risa en los momentos más difíciles.

A todos mis amigos del colegio y “The Falses” quienes forman parte importantísima en mi vida, a lo largo de los años se han transformado en una especie de “familia” para mí. A mis amigos de la “Sección 5-2003”, gracias por todos los buenos momentos que hemos vivido y por hacer los primeros años universitarios inolvidables.

A mi abuelita “Cholgui” por estar permanentemente en mis pensamientos y darme las fuerzas para seguir creciendo como persona. Gracias por todo lo que hiciste por mí.

Y a todos los que me han acompañado a lo largo de estos años y han sido parte de una gran etapa en mi vida.

MUCHAS GRACIAS!!!!

# Índice general

Índice de figuras .....	V
Índice de tablas .....	IX
1. Introducción .....	1
1.1 Motivación .....	1
1.2 Alcance .....	2
1.3 Objetivos .....	2
1.3.1 Objetivos generales.....	2
1.3.2 Objetivos específicos.....	2
1.4 Estructura del trabajo.....	3
2. Generación distribuida.....	4
2.1 Características generales de la GD .....	4
2.2 Control en GD.....	6
2.3 Estándares y normas .....	6
2.3.1 Normas Chilenas.....	7
3. Centrales micro hidráulicas.....	9
3.1 Características de una central micro-hidráulica.....	10
3.2 Clasificación de las centrales hidráulicas .....	11
3.3 Componentes de una central hidráulica .....	12
3.4 Control de centrales micro-hidráulicas .....	13
3.4.1 Aspectos generales.....	13
3.4.2 Equipos de sincronización y protección eléctrica .....	15
3.5 Desarrollos entorno a CMH en el DIE.....	15
4. Generador Síncrono.....	18
4.1 Potencia eléctrica generada .....	20
4.2 Modos de generación de la máquina síncrona.....	21
4.2.1 Generador aislado de la red .....	21
4.2.2 Generador conectado a la red.....	22
4.3 Control del generador síncrono.....	23
5. Reproducción de una caída real de agua .....	24
5.1 Características de una caída natural de agua.....	24
5.2 Comportamiento de una bomba centrífuga .....	27
5.2.1 Curvas características.....	28
5.3 Utilización de bomba centrífuga para simulación de caída de agua.....	30

6.	Prototipo de central micro-hidráulica .....	32
6.1	Simulación del recurso hidráulico .....	32
6.1.1	Modelo hidráulico .....	34
6.2	Generación eléctrica .....	36
6.3	Prototipo obtenido.....	40
6.4	Sistema de control para CMH .....	42
6.4.1	Controlador general .....	43
	Circuito de Mediciones .....	43
	Control remoto .....	45
	Señales de Control .....	45
6.4.2	Control corriente excitación.....	46
6.4.3	Control posición de la válvula .....	47
6.4.4	Sincronización .....	48
7.	Implementación del control en CMH.....	49
7.1	Algoritmo de control .....	49
7.1.1	Medición de variables. ....	49
7.1.2	Acciones de control.....	50
7.2	Monitoreo y control remoto .....	51
7.3	Montaje en laboratorio .....	52
7.3.1	Control bomba centrífuga.....	52
7.3.2	Controlador general .....	56
7.3.3	Control de frecuencia-potencia activa.....	57
7.3.4	Control corriente de campo.....	58
7.4	Puesta en marcha.....	59
7.4.1	Resultados preliminares.....	59
7.4.2	Programa monitoreo y control remoto.....	60
7.4.3	Control frecuencia – tensión .....	63
7.4.4	Comportamiento del prototipo en general.....	69
8.	Conclusiones.....	71
	Referencias.....	75
	Anexo A Datos de placa bomba centrífuga .....	78
	Anexo B Cálculo área de salida y estimación del caudal.....	79
	Anexo C Datos de pruebas al generador y parámetros obtenidos .....	82
	Anexo D Circuitos impresos y diagramas esquemáticos utilizados .....	85
	Anexo E Códigos de Programación .....	91

# Índice de figuras

3.1: Central Itaípu, Brasil.....	10
3.2: Esquema de una central hidroeléctrica.....	13
3.3: Primer prototipo de CMH realizado en el DIE.....	16
3.4: Última versión del prototipo de CMH realizado.....	16
3.5: Interfaz grafica realizada en LabVIEW .....	17
4.1: Primera máquina sincrónica trifásica (1887).....	18
4.2: Esquema simplificado máquina sincrónica bipolar. ....	19
4.3: Variables de control y salida en un generador sincrónico.....	23
5.1: Estanque con orificio de vaciado.....	24
5.2: Derivación de parte del rio hacia una central micro – hidráulica. ....	25
5.3: Componentes de una bomba centrífuga. ....	27
5.4: Alturas relacionadas con una bomba centrífuga. ....	28
5.5: Curva característica bomba centrífuga.....	29
5.6: Curvas características para distintas velocidades de giro.....	30
5.7: Variación de la velocidad de giro y obtención de altura constante.....	31
6.1: Simulación de un recurso hídrico utilizando bomba centrífuga.....	32
6.2: Curva característica nominal bomba centrífuga.....	33
6.3: Potencia hidráulica generada por la bomba centrífuga.....	34
6.4: Generador Bambozzi trifásico de 3[KVA].....	36
6.5: Circuito esquemático del generador.....	37
6.6: Curva de excitación y cortocircuito.....	38
6.7: Respuesta al cortocircuito.....	39
6.8: Prueba de deslizamiento.....	39
6.9: Conexión entre la turbina Pelton y el generador trifásico con sus respectivas variables de control.....	40
6.10: Prototipo de CMH desarrollado.....	40

6.11: Diagrama utilizado en el prototipo de CMH.....	41
6.12: Diagrama del control para CMH.....	42
6.13: Diagrama medición tensión y corriente.....	43
6.14: Diagrama medición frecuencia.....	44
6.15: Diagrama medición desfase ( $\phi$ ).....	44
6.16: Conexión controlador general y control remoto.....	45
6.17: Señales de control hacia actuadores.....	46
6.18: Diagrama control excitación.....	46
6.19: Diagrama control posición.....	47
7.1: Algoritmo de Control.....	50
7.2: Conexión del manómetro a la tubería CMH.....	53
7.3: Variador de frecuencia Altivar 71.....	54
7.4: Curva característica bomba centrífuga alimentada a 50[Hz].....	55
7.5: <i>Altura equivalente obtenida frente a variaciones en el caudal utilizado.....</i>	55
7.6: Circuito impreso controlador general.....	56
7.7: Prototipo de CMH con control implementado.....	57
7.8: Circuito del control del motor stepper.....	57
7.9: Componentes del control frecuencia-potencia activa.....	58
7.10: Componentes físicos del control de corriente de campo.....	58
7.11: Interfaz de monitoreo y control de CMH.....	60
7.12: Variables eléctricas de generación.....	61
7.13: Evolución de tensión y frecuencia en el tiempo.....	61
7.14: Control de excitación.....	61
7.15: Control posición válvula.....	61
7.16: Control modo de operación CMH.....	62
7.17: Setpoint de potencia activa y reactiva.....	62
7.18: Indicadores del estado de conexión e información recibida.....	62
7.19: Botón Realizar mediciones.....	62

7.20: Interfaz secundaria de medición.....	63
7.21: Dialogo para guardar archivo de salida.....	63
7.22: Cargas trifásicas.....	64
7.23: Área de salida en función de la posición de la válvula.....	65
7.24: Respuesta en frecuencia y tensión para toma de carga de 120 [W].....	67
7.25: Respuesta en frecuencia y tensión para toma de carga de 720 [W].....	67
7.26: Respuesta en frecuencia y tensión para rechazo de carga de 420 [W].....	68
7.27: Respuesta en frecuencia y tensión para rechazo de carga de 600 [W].....	68
7.28: Inyección de potencia a la red y la eficiencia respectiva turbina-generator .....	70

# Índice de Tablas

3.1: Clasificación de Centrales Hidráulicas, Fuente CNE.....	10
6.1: Área de salida en función de posición de la válvula.....	34
6.2: Área de salida en función de posición de la válvula.....	35
6.3: Datos de placa generador trifásico Bambozzi.....	36
6.4: Parámetros del generador.....	38
7.1: Referencias numéricas del variador de frecuencia.....	54
7.2: Control con 2 velocidades.....	66
7.3: Control con 4 velocidades.....	66

# Introducción

## 1.1 Motivación

En las últimas décadas la demanda eléctrica mundial se ha incrementado de una manera abrumadora por lo que se han desarrollado proyectos colosales relacionados con centrales eléctricas con el fin de satisfacer esta demanda, proyectos que por lo general corresponden a centrales hidráulicas o térmicas. Estos proyectos significan un gran impacto de una u otra forma en el medio ambiente y en la sociedad, debido a las grandes instalaciones y zonas inundadas que necesitan las centrales hidráulicas y la contaminación relacionada con las centrales térmicas. En adición a lo anterior, la fuerte concientización que se ha desarrollado en las distintas sociedades sobre la contaminación que presenta nuestro planeta, se ha traducido en una búsqueda de nuevas tecnologías que no sean dependientes de los combustibles fósiles a gran escala y que permitan disminuir de alguna manera el problema de la polución existente. Es por esto que en el último tiempo se ha desarrollado el concepto de "Generación distribuida" como una nueva forma o tecnología de proveer electricidad a los consumidores, mediante el uso de energías renovables y convencionales de pequeña escala, ubicándolas cercanas a los consumos, lo que genera ciertos beneficios desde el punto de vista de operación y medio ambiental.

Por otro lado, Chile presenta un potencial hidráulico enorme, lo que se traduce en un fuerte incentivo a realizar centrales hidráulicas con el fin de satisfacer la demanda nacional. Sin embargo, por lo expuesto anteriormente, es cada vez más difícil realizar una central de embalse ya que presentan un fuerte rechazo de parte de la sociedad y los problemas con el suministro de los energéticos primarios utilizados en las centrales térmicas se han visto en aumento desembocando en una dificultad para solventar la demanda energética del país. Es por esto que las centrales hidráulicas de pequeña escala se asoman con fuerza como alternativa de generación para nuestro país, ya no como alternativa de electrificación rural sino operando bajo el modo de GD, en donde las instalaciones requeridas son simples (no necesitan de un embalse o grandes instalaciones eléctricas) y no significan algún peligro para el medio ambiente.

En la siguiente memoria de título se abarca el desarrollo de un prototipo de central micro-hidráulica (CMH) para laboratorio, con sus respectivos controles que permiten la simulación de una

caída natural de agua además del funcionamiento y monitoreo de la CMH en sí, operando como generador distribuido.

## 1.2 Alcance

El trabajo de esta memoria está enfocado en el desarrollo e implementación de un control electrónico para una CMH, conectada en baja tensión de un sistema de distribución. La idea central de este trabajo es desarrollar una plataforma que controle la operación de la central en los distintos modos de operación, además de su respectivo monitoreo y control remoto.

Como trabajos previos se encuentran lo desarrollado por los memoristas del Departamento de Ingeniería Eléctrica (DIE) de la Universidad de Chile Sr. Patricio Mendoza [6] y Sr. Manuel Vargas [29], relacionados con controlar y monitorear una CMH respectivamente. Igualmente se encuentran los trabajos realizados por alumnos del curso Seminario de Diseño correspondientes al primer prototipo de CMH llevado a cabo en el DIE. De estos trabajos se obtienen distintos criterios y trabajos pendientes, los que son aplicables al correcto desarrollo de la presente memoria.

Además, este trabajo busca ser un aporte a la docencia del DIE de la Universidad de Chile, implementando los componentes eléctricos en el Laboratorio de Energía.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivos generales

El objetivo general de este trabajo es contribuir a la investigación de tecnologías de generación renovable que sean aplicables en GD, en especial una CMH, desarrollando un prototipo a escala que sirve de apoyo a la docencia del DIE de la Universidad de Chile.

### 1.3.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos del trabajo son:

- Investigar el estado del arte de las tecnologías relacionadas con centrales micro-hidráulicas y su aplicación en GD.
- Finalizar la construcción del prototipo de CMH con el fin de obtener un funcionamiento hidromecánico lo más cercano a la realidad.
- Desarrollar el control electrónico para el dispositivo a escala antes mencionado, considerando tanto al generador como a la turbina hidráulica. Asimismo, se busca incorporar los elementos de

monitoreo e implementar el controlador desarrollado en la CMH y validar los resultados obtenidos.

- Elaborar los respectivos manuales docentes.

## 1.4 Estructura del trabajo

En el capítulo 2 se realiza una revisión general del estado del arte sobre GD, sus principales características y algunos estándares internacionales relacionados a este tipo de generación. Además, se realiza un pequeño resumen sobre las Normas Chilenas vinculadas con GD.

En el capítulo 3 se desarrolla el tema de las centrales hidráulicas entregando las principales propiedades de esta tecnología y las distintas categorías en las que son clasificadas, ahondando especialmente en las CMH. Se explican los distintos componentes que forman estas centrales y los controles utilizados. Además se realiza un resumen sobre los desarrollos que existen en el DIE relacionados con CMH.

En el capítulo 4 se explica en forma general el funcionamiento del generador sincrónico y se entregan las fórmulas que rigen su comportamiento.

El capítulo 5 muestra como puede ser reproducida una caída natural de agua utilizando una bomba centrífuga, entregando información sobre el comportamiento en la realidad y las curvas características de las bombas centrífugas.

En el capítulo 6 se muestra el desarrollo del prototipo de CMH utilizado y el control electrónico a implementar en él, desarrollando la función que cumple cada componente dentro del sistema general y las distintas variables a considerar para el correcto funcionamiento.

El capítulo 7 muestra los resultados obtenidos en la implementación del control electrónico en la CMH, al igual que el sistema de monitoreo y control remoto desarrollado en LabVIEW.

En el capítulo 8 se exponen las conclusiones sobre el trabajo realizado y se presentan los posibles trabajos futuros asociados.

## Generación distribuida

El término Generación Distribuida (GD) está relacionado con generación de electricidad a pequeña escala, en donde típicamente las centrales poseen capacidades de generación máxima cercanas a los 10 MW ubicadas próximas a los lugares de consumo. Dentro de la GD se incluyen los distintos tipos de conexión de los pequeños generadores eléctricos tales como: conectado a la red de distribución; directamente a un consumo, en donde puede estar o no conectado a la red; o en un sitio aislado de la red eléctrica [1].

Actualmente, debido al desarrollo tecnológico y a los distintos estudios realizados sobre la GD, la visión sobre este tipo de generación se ha expandido a tener grupos de generadores, operando en conjunto y coordinados entre sí, con el fin de aumentar la calidad y cantidad de servicios a entregar a los consumidores y al sistema en general.

El siguiente capítulo busca entregar características generales y beneficios de GD, además de estándares y normas chilenas relacionadas de alguna manera con este tipo de generación.

### 2.1 Características generales de la GD

La GD y el desarrollo tecnológico que la impulsa han permitido que sea viable y atractiva la manera de efectuar la producción de energía eléctrica aprovechando energías renovables (EERR), energías renovables no convencionales (ERNC) y/o fuentes no convencionales de energías (FNCE).

Existen distintas tecnologías utilizadas en GD, tales como CMH, celdas de combustible, turbinas a gas, microturbinas a gas, sistemas fotovoltaicos, co-generación, generadores eólicos de pequeña escala y geotermia, además de algunas otras aplicaciones de menor uso, como la biomasa o la generación oceánica.

De acuerdo al tipo de tecnología utilizada, se puede realizar una categorización de las tecnologías de GD como renovables y no renovables. Dentro de las renovables se encuentran: sistemas fotovoltaicos, eólica, geotérmica y micro-hidráulica. Estos tipos de generación renovable caen generalmente dentro de la categoría de GD porque sus pequeños tamaños hacen que sea conveniente

su conexión en los niveles de menor tensión (distribución) de la red eléctrica [1]. Las tecnologías no renovables incluyen: celdas de combustible, turbinas a gas y microturbinas a gas. Es importante recalcar que el término GD no debe ser confundido con generación renovable. Las tecnologías asociadas a GD pueden ser renovables o no, tal como se dijo anteriormente, de hecho algunas tecnologías relacionadas con GD pueden significar una contribución importante a los problemas de contaminación [2].

La creación de GD en los sistemas eléctricos puede ser evaluada de distintas maneras, ya sea económicamente, relacionada con los beneficios que trae a la comunidad si se utilizan solo ERNC o EERR, o las ventajas obtenidas eléctricamente debido a la conexión de estos dispositivos. A continuación, se comentan algunos beneficios obtenidos de la integración de GD en un sistema eléctrico [3] [4]:

- Debido a que las unidades utilizadas en GD son modulares, se pueden integrar convenientemente dentro de los sistemas de distribución, de tal modo que se evita la necesidad de invertir en los sistemas de transmisión con el fin de ampliarlos y aumentar su capacidad.
- Los GD pueden operar de tal manera que sirven de servicios complementarios, desplazando a los generadores convencionales, tales como control de tensión, operación en isla, plan de recuperación de servicios, ya que se encuentran en las cercanías de los consumos, lo que se traduce en una posición privilegiada respecto al resto.
- Al integrar GD en un sistema existente, se pueden obtener ventajas relacionadas con la reducción de las pérdidas en la línea, aumento del rendimiento energético total, modificación del factor de potencia (Inyección de reactivos) y el recorte de punta de la curva de demanda o peak shaving.
- La confiabilidad del sistema eléctrico mejora debido a la conexión de la GD, ya que el uso de los generadores distribuidos en puntos específicos ayudará a las empresas distribuidoras a sobrellevar la congestión local, disminuyendo la demanda para la transmisión y con esto se aumentan los márgenes de operación en las líneas de transmisión.

Sin embargo, la penetración significativa de GD dentro de los sistemas de distribución existentes no está libre de nuevos problemas. El inconveniente principal de GD está relacionado con la seguridad del sistema, ya que la GD no puede suministrar potencia como regulación primaria, puesto que no opera frente a variaciones de carga. Lo anterior se debe a que la mayoría de las tecnologías de GD operan con fuentes energéticas naturales (sol, caudales de ríos, viento), por lo que no es posible asegurar o controlar estas variables en el 100% del tiempo, teniéndose momentos en los cuales no es viable el tener un margen de reserva de generación. Otra desventaja está relacionada con la calidad de la

energía, ya que algunas de las tecnologías asociadas a GD tiene dentro de su funcionamiento o conexión a la red algún dispositivo de electrónica de potencia, ya sean convertidores AC-AC o DC-AC, los que pueden generar una distorsión armónica considerable en la red eléctrica. Esta distorsión si no es debidamente filtrada, puede ocasionar problemas operacionales a las cargas conectadas a la misma red de distribución.

Debido a la característica radial que generalmente presentan las redes de distribución, a diferencia de los sistemas de transmisión, se pueden obtener condiciones desfavorables para el sistema en general, puesto que si se tiene una cantidad considerable de generadores conectados al mismo sistema de distribución, la salida de una sola línea de este sistema puede limitar la disponibilidad de los generadores. Además, se deben aumentar las sofisticaciones de las protecciones a instalar en la línea, puesto que es necesario proteger, además de las líneas y equipos, a los consumos del sistema [2].

## 2.2 Control en GD

Las distintas tecnologías utilizadas en GD, independiente del tipo y lugar de conexión, deben tener algún sistema de control tal que les permita operar en condiciones aceptables para el sistema. Genéricamente, estos sistemas de control son muy similares, ya que se debe monitorear, controlar y tiene que poseer constantes de ajuste. Por ejemplo, para una CMH, sea de embalse o de pasada, se necesitan tuberías, válvulas, protecciones y una casa de máquinas para su operación, en donde se aloja el generador y el controlador. Como se ve más adelante, existen distintos esquemas a utilizar como controlador del generador, pero independiente de éste debe tener una etapa de monitoreo, y parámetros ajustables, los que influyen de manera significativa en la evolución del sistema.

Luego, dada esta propiedad común, se puede encontrar alguna manera de configurar los sistemas de control para cada unidad distinta, coordinando los sistemas de monitoreo y control remoto, de manera de tener una comunicación entre ellas, tomando acciones en conjunto y ajustes necesarios para operar en forma correcta.

## 2.3 Estándares y normas

Dentro de la GD, se tiene un estándar (IEEE 1547) entregado por la IEEE<sup>1</sup> el cual recibe el nombre de *“Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems”* (Estándar para la interconexión de recursos distribuidos con los sistemas eléctricos de potencia), el que tiene como

---

<sup>1</sup> The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc

propósito proveer una norma uniforme para la conexión de GD con los sistemas eléctricos, estableciendo requerimientos en cuanto al desempeño, operación, pruebas, condiciones de seguridad y mantención de las interconexiones [5].

El estándar IEEE 1547 se complementa además con 6 documentos. El IEEE 1547.1, se encarga de las pruebas a los dispositivos de interconexión con la red (controladores, protecciones, sincronizadores). El IEEE P1547.2 se refiere al estudio y aplicación del estándar IEEE 1547. El IEEE P1547.3 es una guía para monitoreo, control e intercambio de información para los recursos distribuidos. El IEEE P1547.4 aborda los sistemas aislados que funcionan con recursos distribuido, y su interacción con un sistema eléctrico de potencia. El IEEE P1547.5 trabaja con fuentes de más de 10 MVA en su conexión con las redes de transmisión. Finalmente el IEEE P1547.6 aborda las redes secundarias de distribución. [6]

### 2.3.1 Normas Chilenas

En Chile aún no existe una normativa que se aboque en un 100% a la GD. Sin embargo, existen leyes en donde se relacionan distintos elementos que competen desde el punto de vista legal a este tipo de generación. En lo que sigue se presenta un resumen de cada una de estas normativas, nombrando lo más importante relacionado con GD de cada una [27].

- Ley 19.940
  - Esta ley incorpora y modifica el DFL N°1 de 1982, LGSE. Dentro de lo más importante se encuentra la exención total o parcial del pago de peajes para todas las centrales menores a 20 MW, en especial las menores a 9 MW, las que no pagan peajes siempre y cuando la capacidad conjunta no supere el 5% de la capacidad instalada total del SIC.
  - Se obliga a los propietarios de líneas eléctricas a permitir el uso de sus postes, torres y otras instalaciones necesarias para el establecimiento de otras líneas eléctricas.
  - Los concesionarios de servicios de distribución y empresas dueñas de líneas de distribución que utilizan bienes nacionales de uso público deben permitir la conexión de los medios de generación cuyos excedentes de potencia no superen los 9 MW
- Decreto Supremo 244
  - Define los distintos medios de generación, de acuerdo a su potencia, en especial: “Pequeño medio de generación distribuido” (PMGD) con potencias menores a 9 MW y conectados a distribución; y “Medio de generación no convencional” (MGNC), cuya fuente sea no convencional y potencia menor a 20 MW.

- Establece distintas disposiciones respecto a los PMGD, de acuerdo a mantenciones, conexión, intervenciones de las instalaciones, condiciones que deben acatar las empresas, etc.
- Dentro de las disposiciones transitorias se señala que mientras no exista una norma técnica para los PMGD, se regirán por la norma NCh Elec 4/2003
- Norma Técnica NCh Elec. 4/2003
  - Dentro de esta norma no se indaga sobre medios de generación, sin embargo se refiere a las instalaciones de consumo de baja tensión, tales como tableros, conductores y sistemas de canalización, etc.
- Ley 20.527
  - Corresponde a la última modificación a la Ley General de Servicios Eléctricos (LGSE). En ella se definen los medios de generación renovables no convencionales de acuerdo a características especiales de cada una, encontrándose la relacionada con energía hidráulica y cuya potencia máxima sea inferior a 20 MW. También se mencionan la biomasa, geotérmica, solar, eólica, mareomotriz entre otras.
  - Además, se señala que las empresas eléctricas que realicen retiros de energía desde el SIC o SING deberán acreditar que parte de dicha energía (10% del total) corresponde a energía provenientes de medios de generación renovables no convencionales y se establece un plazo para que lo anterior sea cumplido, de lo contrario se impondrán multas estipuladas sobre las empresas.

## Centrales micro hidráulicas

La definición de una central eléctrica abarca a todas las instalaciones que permiten obtener energía eléctrica mediante la conversión de un energético primario y los tipos de centrales eléctricas existentes se diferencian principalmente en la fuente de energía que transforman en electricidad, en donde generalmente se busca obtener energía cinética con el fin de entregársela a un generador eléctrico, el que es encargado de generar la electricidad. Dentro de las centrales generadoras se encuentran las centrales hidroeléctricas, las que son accionadas por agua. La energía hidroeléctrica es una fuente energética muy importante, aportando con aproximadamente el 19% de la producción mundial de electricidad [12].

La energía que se obtiene utilizando este tipo de centrales está relacionada directamente con el caudal y la diferencia de altura del recurso hidráulico utilizado. Los distintos elementos que componen una central hidráulica tienen como fin el convertir la energía cinética y potencial del agua, en energía eléctrica. Se denomina turbina hidráulica al elemento encargado de convertir dicha energía del agua en una capaz de hacer girar un eje (energía mecánica rotatoria), la que es entregada a un dispositivo capaz de convertir la energía mecánica entregada por la turbina en energía eléctrica, el que generalmente corresponde a un generador sincrónico.

Como se comentó anteriormente, la operación de estas centrales y la cantidad de electricidad generada están ligadas al caudal del recurso hidráulico que las alimenta y a la altura que éste posee. La potencia que se puede obtener de estas centrales se relaciona completamente con las variables mencionadas anteriormente de acuerdo a la ecuación 3.1 [7]:

$$P = k \cdot Q \cdot H \cong 8,5 \cdot Q \cdot H [kW] \quad (3.1)$$

Donde:

Q es el caudal en  $m^3/s$ .

H es la altura en m.

P es la potencia eléctrica kW.

El valor de la constante  $k$  presente en la ecuación 3.1 varía dependiendo del tipo de central utilizada. Para centrales con pequeñas unidades la eficiencia se encuentra en torno al 60%.

La cantidad de caudal a utilizar o la altura disponible varían de acuerdo a la situación geográfica de cada país, por ejemplo en Chile se tiene centrales que aprovechan las diferencias de alturas (mayores niveles de altura en comparación con los caudales obtenidos), en cambio en países con grandes ríos, como Brasil, utilizan centrales de caudales importantes como se muestra en la Figura 3.1.

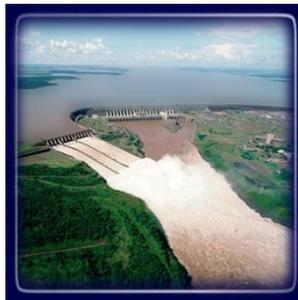


Figura 3.1: Central Itaipu, Brasil

### 3.1 Características de una central micro-hidráulica

Las Centrales hidráulicas se pueden clasificar de acuerdo a la capacidad de generación que poseen y esta depende de cada país o región en donde se encuentre [8]. En Chile dicha clasificación es entregada por la Comisión Nacional de Energía (CNE) en donde se señala lo siguiente:

Grandes centrales	Potencia superior a 5 MW
Pequeñas centrales	Potencia superior a 1 MW e inferior a 5 MW
Mini centrales	Potencia superior a 100 kW e inferior a 1 MW
Micro centrales	Potencia superior a 1.5 kW e inferior a 100 kW
Hidrocargadores	Potencia inferior a 1.5 kW, generación en CC

Tabla 3.1: Clasificación de Centrales Hidráulicas, Fuente CNE [13].

En nuestro país, debido al orden de magnitud de la generación, las mini y micro centrales caen en la denominación de energías renovables no convencionales ya que su implementación en nuestro país es baja y presentan una fuerte ventaja para zonas rurales en las que se desee obtener electricidad.

Existen regiones del país que presentan favorables condiciones geográficas y climáticas que las transforman en un lugar privilegiado para el aprovechamiento de la energía hídrica. Muchos lugares cordilleranos en casi toda la extensión de las zonas central y sur, áreas como Chiloé continental y zonas aisladas desde la VIII Región al sur, son especialmente adecuados para la instalación de múltiples centrales de pequeño tamaño. Según la CNE existen alrededor de 110 instalaciones de este tipo en nuestro país [13].

Una de las principales ventajas que presentan este tipo de instalaciones en comparación con las grandes centrales es que el impacto que generan en el medio ambiente y en la sociedad son mucho

menores, ya que por ejemplo para realizar una central de embalse es necesario inundar vastas zonas y eventualmente desplazar algún poblado existente, lo que encuentra un considerable número de opositores y problemas para llevarse a cabo. En cambio las micro centrales no requieren de grandes represas o la utilización de embalses, ya que la mayoría de este tipo de centrales corresponden a centrales de pasada y por ende solo requieren de pequeñas instalaciones. El inconveniente que presenta este tipo de centrales es cuando se desea abastecer una zona eléctricamente aislada y no existe una cantidad de agua suficiente que permita generar la electricidad durante el periodo solicitado, por lo que habría que diseñar el sistema para que trabaje el mayor tiempo posible, lo que conlleva a una disminución de la potencia instalada. Generalmente lo anterior no es lo económicamente óptimo, lo que se traduce en una pérdida de beneficios.

En conjunto con lo anterior, las instalaciones de centrales micro-hidráulicas pueden proporcionar energía eléctrica a zonas que de otra manera estarían aisladas o alcanzables sólo con obras de mayor impacto medioambiental, permiten realizar una política de distribución sobre el territorio de la producción de energía eléctrica, ayudan a reducir la dependencia energética de los combustibles fósiles y además no producen emisiones de gases de efecto invernadero ni otras sustancias contaminantes[13].

Las centrales hidroeléctricas de pequeño tamaño, bien proporcionadas y escaladas, se convierten en un producto económicamente competitivo frente a las otras fuentes energéticas renovables, además de contribuir activamente al desarrollo sustentable del territorio en que se implantan.

### 3.2 Clasificación de las centrales hidráulicas

Además de la clasificación para las centrales hidráulicas mostrada anteriormente, existe una en la que se ordenan de acuerdo a la forma de obtención del recurso hidráulico y al tipo de operación que tiene la central, las que se pueden agrupar en [7]:

- a. Centrales de pasada : No se puede almacenar el recurso hidráulico. Operan solo con el agua que circula por ellas en el momento.
- b. Centrales de embalse : Se realiza una acumulación de grandes cantidades de agua, lo que posibilita la regulación semanal, mensual o anual dependiendo del tamaño de la central.
- c. Centrales mixtas : Poseen pequeños estanques que se llenan en pocas horas, lo que permite una regulación diaria.
- d. Centrales de bombeo : El agua es bombeada a un estanque superior en horas de precios bajos desde donde caerá nuevamente en horas de máxima demanda.

- e. Centrales mareomotrices : Se aprovecha el desnivel ocasionado por el flujo de agua desde el mar hacia algún estanque o viceversa.
- f. Centrales marinas. : La presión de las olas marinas o fuertes corrientes submarinas son la fuente energética (Experimentales).

Una central micro-hidráulica puede estar en la categoría de “central de pasada” o “central mixta” de acuerdo a la topología de su construcción y a las características geográficas del lugar. El tipo de fuente energética utilizada por este tipo de centrales cae en la denominación de energías renovables ya que se designa de esta manera a todas las energías que luego de efectuada su transformación en otro tipo no se agotan. Dentro de esta categoría se encuentran la energía eólica, solar, geotérmica, mareomotriz y la obtenida de la biomasa.

### 3.3 Componentes de una central hidráulica

Los componentes de una central varían de acuerdo al tipo y complejidad de las obras civiles, ya que una central de pasada no se necesita una serie de elementos que deben conformar de manera obligada parte de una central de embalse. Sin embargo, se puede realizar una clasificación de acuerdo a la función que realiza cada uno de estos elementos. En lo que sigue se dará una breve descripción de los componentes principales de una central hidroeléctrica [9]:

1. Obras de cierre y captación. Permiten almacenar el recurso hidráulico (salvo centrales de pasada) o las obras necesarias para derivar el agua hacia la central.
2. Obras de conducción o derivación. Corresponden a las instalaciones necesarias para transportar el agua desde las obras de captación hacia la turbina, generalmente se utilizan tuberías de presión.
3. Sala de máquinas. En esta estructura se aloja la turbina, generador, controladores, tableros de comando y control, etc.
4. Obras de distribución. Permite el transporte de la energía eléctrica hacia los puntos de conexión con el sistema o los consumos. Se incluyen las líneas de transmisión, transformadores, etc.

En la Figura 3.2 se pueden apreciar los distintos componentes antes mencionados.

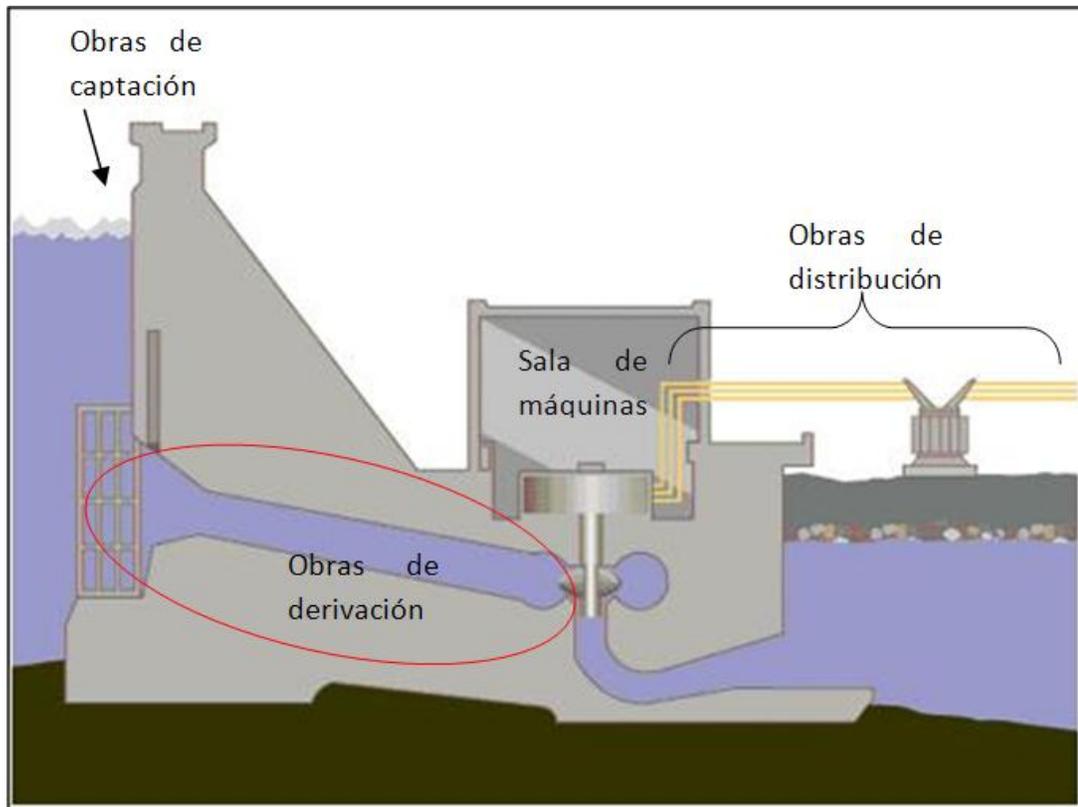


Figura 3.2: Esquema de una central hidroeléctrica.<sup>2</sup>

## 3.4 Control de centrales micro-hidráulicas

### 3.4.1 Aspectos generales

Como se ha detallado anteriormente, este tipo de centrales posee niveles de potencia completamente inferiores respecto a las grandes centrales, lo que se traduce en un control mucho más simple.

Generalmente, en las grandes centrales hidroeléctricas, existe un elevado número de controles, los que se encargan de operar las válvulas de entrada a la turbina, posición de los álabes, presión y caudal en las tuberías, temperatura del generador, etc. Por otro lado, en las centrales micro-hidráulicas que suministran energía a una red aislada, la variable a controlar es la velocidad del rotor, la que está completamente relacionada con la frecuencia. Principalmente, existen 2 maneras de regular la velocidad de la central; la primera corresponde a disipar el exceso de potencia eléctrica y la segunda a variar el caudal de entrada a la turbina. [8]

<sup>2</sup> Fuente: [http://www.monografias.com/trabajos61/maquinas-electricas/maquinas-electricas\\_image002.jpg](http://www.monografias.com/trabajos61/maquinas-electricas/maquinas-electricas_image002.jpg)

Como métodos de disipación de potencia eléctrica, se utilizan bancos de resistencias controlados por medios electrónicos (chopper), permitiendo disipar la diferencia de potencias entre lo generado y consumido, y mantener así fija la frecuencia. Lo anterior se utiliza por lo general en sistemas aislados, en donde la posición de la válvula se fija en una posición de manera de obtener la potencia máxima disponible, disipándose la diferencia entre la potencia generada y consumida por los bancos de resistencias mencionados. El sistema más convencional éste tipo corresponde a resistencias conectadas manualmente por algún operador dependiendo de la frecuencia generada.

En el enfoque más convencional, la regulación de la velocidad (frecuencia) se logra variando el caudal que entra a la turbina. Con el fin de lograr este control, se utiliza un dispositivo denominado regulador de velocidad, el que consta en esencia de un sensor que detecta cualquier desviación de la velocidad con respecto al punto de consigna, en donde se le envía una señal al mecanismo encargado de controlar el paso del agua a la turbina, ya sea un servomotor o un motor paso a paso, y mantener así la velocidad constante y por lo tanto la frecuencia también constante.

Existen distintos tipos de reguladores, los que se diferencian por la precisión o sofisticación necesitada. Estos pueden ser mecánicos, mecano-hidráulicos o electro-hidráulicos. Todos los mecanismos nombrados anteriormente, actúan por acción-reacción, corrigiendo en uno u otro sentido la posición de la válvula, provocando una cierta inestabilidad. Los sistemas más sofisticados corresponden a los electro-hidráulicos, en donde se tiene que la corrección puede ser proporcional, integral o derivativa (PID), obteniéndose un mínimo de variación en el proceso de regulación [8].

Gracias a la facilidad de adquisición de las bombas centrífugas y a su similitud con las turbinas hidráulicas, es que en el último tiempo se han comenzado a utilizar en sentido inverso, es decir se les inyecta agua como a una turbina provocando el giro de su eje el cual es conectado a algún tipo de generador. El control en este tipo de centrales es entregado a un dispositivo rectificador-inversor el que tiene como función generar electricidad a los niveles de tensión y frecuencia deseados. [15] [16]

Para regular la tensión, se utilizan reguladores automáticos de tensión (AVR), los que permiten mantener la tensión dentro de un rango establecido en torno al nominal. Estos controladores realizan una variación en la corriente de excitación del generador, ya sea de forma análoga o digital (mediante modulación PWM<sup>3</sup>), cuando se utilizan generadores que permiten este tipo de control.

---

<sup>3</sup> Del inglés Pulse-Width Modulation, corresponde a la modulación por ancho de pulso en donde el ciclo de trabajo de una señal periódica es modificado

### 3.4.2 Equipos de sincronización y protección eléctrica

Por lo general, en todos los países existen reglamentos para el suministro de electricidad, en donde se obliga a las compañías distribuidoras a mantener la seguridad y calidad de servicio dentro de límites establecidos y muy estrechos. Independiente de si la central está conectada a la red, entre los terminales del generador y la línea de salida se instalan dispositivos, los que permiten medir el funcionamiento del sistema en todo instante, lo protegen y permiten la desconexión o re-conexión del generador con la red en caso de alguna falla. Para monitorear el generador, se utilizan aparatos con algún grado de sofisticación para medir la tensión, corriente y frecuencia en las 3 fases, la energía entregada y su factor de potencia y en algunas ocasiones el nivel de agua en la cámara de carga.

Con el fin de sincronizar el generador con la red, y poder realizar la conexión entre ellos, es necesario un dispositivo capaz de detectar la diferencia de tensión entre el generador y la red, además de la frecuencia, con el fin de que cuando estas diferencias sean nulas, realizar la interconexión entre el generador y la red y evitar problemas en algún componente del generador.

Como elementos de protección, generalmente se necesitan los siguientes equipos, en donde se indican los números utilizados para denominarlos: [7] [8]

- Relé verificador de sincronismo (25)
- Relés de sub-tensión (27) y sobretensión(59)
- Protección de potencia inversa (32)
- Protección de pérdida de campo (40)
- Protección de sobre corriente (51)
- Relés de sobre y bajo frecuencia (81)

Dentro de las protecciones mecánicas, para este tipo de proyecto la más importante corresponde al nivel mínimo en la cámara de carga y temperaturas en el eje.

### 3.5 Desarrollos entorno a CMH en el DIE

El primer prototipo de una CMH desarrollado en el DIE fue realizado durante el año 2005 por alumnos del curso Seminario de Diseño. Este prototipo se llevó a cabo con el fin de encontrar una solución al problema de la central existente en el refugio del Colegio Suizo en Lagunillas, correspondiente al control de frecuencia de ésta central. Durante el año siguiente, en el mismo curso el proyecto fue retomado y se le realizaron modificaciones, obteniéndose un prototipo mostrado en la figura 3.3.

La turbina utilizada en el prototipo de CMH mencionado anteriormente corresponde a una turbina Pelton, donada al DIE por el Colegio Suizo gracias a la gestión del profesor Carlos Gherardelli. El otro componente importante utilizado en esta CMH corresponde a un generador sincrónico monofásico autoexcitado.



*Figura 3.3: Primer prototipo de CMH realizado en el DIE.*

En el año 2007 a través del curso “Trabajo de investigación dirigido” a cargo del profesor Rodrigo Palma, el prototipo obtenido en el curso Seminario de Diseño es modificado, tratando de solucionar los problemas obtenidos en los primeros modelos. La figura 3.4 muestra el resultado de estos trabajos, correspondiendo al estado inicial en el que encontraba el prototipo antes de comenzar a desarrollar la presente memoria de título.



*Figura 3.4: Última versión del prototipo de CMH realizado.*

El 2007 el Sr. Patricio Mendoza [6], alumno memorista del DIE realiza un control electrónico de una CMH operando en GD, correspondiente a una central instalada en la localidad de Teno, Chile. Junto con este trabajo, en el curso Seminario de Diseño se realizan programas en el software LabVIEW tratando de monitorear una CMH, obteniéndose una interfaz gráfica como se ilustra en la figura 3.5.

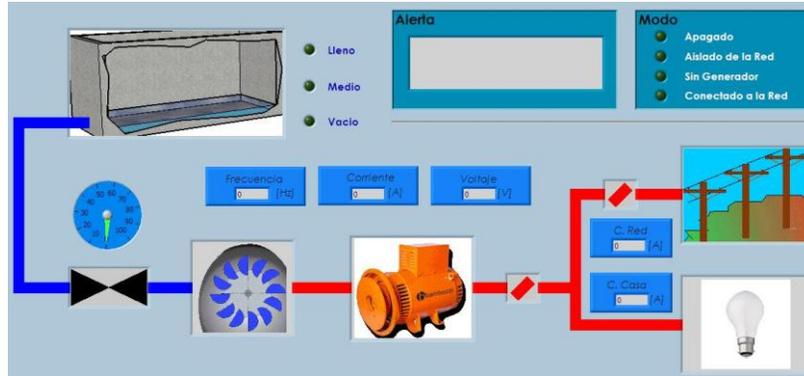
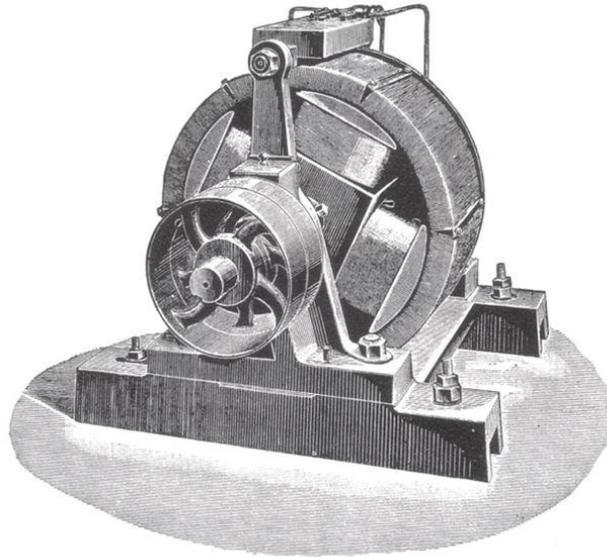


Figura 3.5: Interfaz grafica realizada en LabVIEW

El alumno memorista del DIE, el Sr. Manuel Vargas realizó en el año 2008 un sistema de monitoreo y control remoto para una central micro hidráulica, utilizando el software LabVIEW y MySQL, implementándose en la CMH instalada en Teno [6].

## Generador Sincrónico



Dr. ing. h. c. Friedrich Aug. Haselwanders Drehstrom-Maschine

Figura 4.1: Primera máquina sincrónica trifásica (1887) [10]

Dentro de la generación de electricidad, históricamente el generador sincrónico es la máquina eléctrica más utilizada como medio de generación, ya que posee características especiales que la convierten en una máquina versátil, capaz de operar en distintas condiciones de generación. Es por esto que constituyen el dispositivo fundamental en cualquier central generadora.

Las máquinas sincrónicas están conformadas primordialmente por un devanado móvil, el que gira solidario a un eje denominado devanado de campo o de rotor y un devanado fijo ubicado en el estator, denominado devanado de armadura o estator. El enrollado de campo es alimentado con corriente continua (excitación), desde la excitatriz. Hoy en día el abanico de posibilidades tecnológicas a utilizar como excitatriz es amplia, tales como máquinas de corriente continua acopladas al eje, rectificadores controlados o convertidores de corriente continua. En una máquina sincrónica trifásica, los enrollados del estator se encuentran separados entre sí equidistantes, a  $120^\circ$  entre ellos. La Figura 4.2 muestra un esquema simplificado de una máquina sincrónica de un par de polos [7].

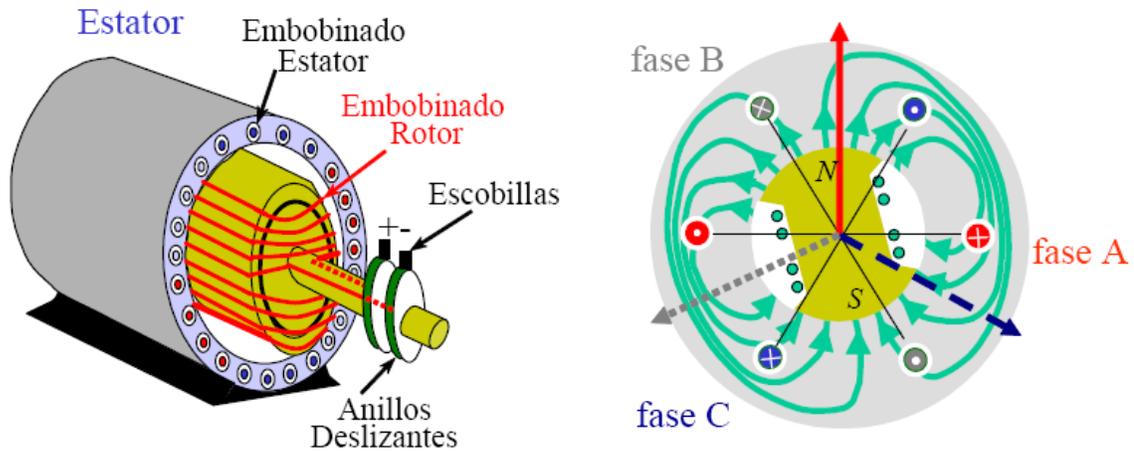


Figura 4.2: Esquema simplificado máquina síncrona bipolar [7].

El principio básico de funcionamiento de esta máquina como generador corresponde a que gracias a la corriente de excitación del campo, se genera un flujo magnético, el cual circula a través del hierro del rotor y luego pasa a través del entrehierro al estator, el que debido al giro del rotor a velocidad  $n$  ( $rev/min$ ), induce en los enrollados de armadura tensiones instantáneas sinusoidales, donde la frecuencia de estas tensiones está relacionada con la velocidad de giro del rotor a través de la ecuación 4.1 [11] :

$$f = \frac{n * p}{120} \quad (4.1)$$

Donde:

- $n$  es la velocidad síncrona en rpm
- $p$  es el número de polos
- $f$  es la frecuencia eléctrica en Hz

Es por esto que si necesita tener una máquina con una velocidad de giro baja, se debe aumentar el número de polos de manera de tener una frecuencia eléctrica constante.

Si se desea utilizar la máquina síncrona como motor, se deben alimentar los enrollados del estator con una fuente polifásica equilibrada (trifásica siguiendo el modelo anterior), de manera que se genere un campo magnético rotatorio, el que tiende a alinear el campo fijo generado en el rotor, provocando un giro del eje.

Dentro de las máquinas síncronas existen 2 grandes grupos, correspondientes a las formas constructivas más comunes de la máquina, las que corresponden a la máquina de polos salientes, y la de rotor cilíndrico. La primera se caracteriza por ser utilizada a velocidades de rotación baja, lo que hace a este tipo de generadores especiales para las centrales hidroeléctricas, las que generalmente operan a velocidades en el rango de 100 a 500 rpm. La máquina de polos salientes tiene la capacidad de girar a velocidades mayores, cercanas a 1000 rpm.

La tarea fundamental de un generador en un sistema de potencia, es el de abastecer la potencia activa requerida por los consumidores. Sin embargo, ésta no es la única función que debe cumplir el generador ya que debe realizar un control primario en los niveles de las tensiones del sistema, además de entregar potencia reactiva a los consumos, acción que está relacionada con la regulación de tensión. Es por lo anterior que las centrales más cercanas a los consumos, como las centrales térmicas, operan con un factor de potencia bajo (80 a 90%), ya que de esta manera pueden entregar más potencia reactiva. En cambio las centrales más lejanas, por lo general las hidráulicas de embalse, se operan con un factor de potencia elevado (90 a 95%), ya que los niveles de potencia reactiva entregados no son muy altos [7].

#### 4.1 Potencia eléctrica generada

Se sabe que la potencia eléctrica a la salida del generador está dada por  $P = V * I_a * \cos(\varphi)$ , donde  $V$  es la tensión en bornes,  $I_a$  es la corriente de línea y  $\varphi$  es el desfase entre la tensión y la corriente. El resultado de esta expresión depende del tipo de generador a utilizar, ya que el de rotor cilíndrico presenta menos parámetros que el de polos salientes, simplificando de gran manera las expresiones obtenidas.

De los fenómenos electromecánicos que determinan el comportamiento del generador de polos salientes y despreciando la resistencia del enrollado de estator, se puede determinar una ecuación que indica la potencia eléctrica capaz de entregar en sus bornes un generador, la que está dada por:

$$P = \frac{EV}{x_d} \text{sen}(\delta) + \frac{V^2(x_d - x_q)}{2x_dx_q} \text{sen}(2\delta) \quad (4.2)$$

$$Q = \frac{EV}{x_d} \cos(\delta) - V^2 \left( \frac{\text{sen}^2(\delta)}{x_q} + \frac{\cos^2(\delta)}{x_d} \right) \quad (4.3)$$

en donde se considera la tensión interna de la máquina ( $E$ ), la tensión en los bornes ( $V$ ), el desfase entre estas dos últimas ( $\delta$  denominado "ángulo de potencia"), la reactancia de eje directo  $x_d$  y la reactancia de eje en cuadratura  $x_q$ .

El valor de  $E$  está determinado por el valor de la corriente de excitación utilizada, y  $V$  depende de la velocidad de giro, por lo que para aumentar el valor de  $P$  es necesario aumentar la corriente de excitación y la velocidad de giro del rotor. Un caso importante ocurre cuando la máquina se encuentra conectada a la red, ya que la tensión en bornes permanece constante al igual que la tensión inducida o dentro de pequeño rango de variación por lo que la potencia entregada por el generador depende solamente del desfase  $\delta$ , el que puede ser modificado variando la velocidad de giro de la máquina.

De la interacción entre el campo creado por la corriente de armadura, relacionada con la potencia entregada por el generador, y con el campo del rotor, se traduce en un torque electromagnético sobre el rotor, el que se contrapone al torque mecánico ejercido por la máquina motriz que lo hace girar. Dicho torque es denominado “torque eléctrico”. La ecuación de este torque es similar para ambos tipos de máquinas, variando el tipo de reactancia a utilizar ( $x_s$  para la de rotor cilíndrico). Para la máquina de rotor de polos salientes se tiene [7]:

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_{mec}} = \frac{EV \text{sen}(\delta)}{2\pi n x_q} \approx \frac{P x_d}{2\pi n x_q} \quad (4.4)$$

Un tema importante a estudiar en una máquina sincrónica es su estabilidad, en donde se utiliza la ecuación de oscilación, proveniente de la interacción entre los torques mecánico y eléctrico [6]:

$$J\ddot{\theta} = T_a = T_m - T_e \quad (4.5)$$

J corresponde a la inercia de las masas acopladas al rotor y  $\theta$  es el ángulo mecánico. Con la ecuación anterior, se puede determinar la estabilidad de una máquina ante perturbaciones, lo que generalmente se realiza utilizando el criterio de las áreas iguales. Lo anterior se puede encontrar con más detalle en [7, Capt.15]

## 4.2 Modos de generación de la máquina sincrónica.

Las máquinas sincrónicas al actuar como generador, tienen 2 opciones de operación. Una de ellas corresponde a alimentar de manera aislada algún consumo, sin tener conexión con otro tipo de generación externo. La segunda opción corresponde a la conexión en paralelo del generador con otros generadores, ya sea unidos a una barra de generación común o separados por alguna impedancia. Estos modos de generación se explican con un poco más de detalle a continuación.

### 4.2.1 Generador aislado de la red.

Dado este modo de conexión, es el generador el único encargado de alimentar a los consumos conectados directamente a él. En este caso las variables eléctricas entregadas por el generador están ligadas entre sí, por lo que resulta complicado realizar un control adecuado de éstas con las variables de entrada al generador (velocidad de giro, corriente de campo) ya que por ejemplo, la tensión a la salida del generador se ve afectada tanto por la velocidad de giro como por la corriente de campo. Generalmente se controla la frecuencia variando la velocidad del eje, y la tensión inducida con la corriente de campo, a pesar de que no existe un desacople con el giro del rotor.

#### 4.2.2 Generador conectado a la red.

Este modo de operación corresponde al más utilizado para este tipo de máquinas. Realizada la conexión entre el generador y la red, se imponen ciertas restricciones sobre las variables de salida del generador, las que son impuestas por la red, siempre y cuando lo aportado por el generador no sea comparable con lo existente en la red. Estas restricciones son:

- La frecuencia de la red es constante en todo momento y no puede ser modificada.
- La tensión en los bornes del generador será siempre la misma, la que es impuesta por la red en el punto de conexión.

Con estas restricciones y de acuerdo a las ecuaciones 4.2 y 4.3, la potencia eléctrica entregada por el generador queda dependiendo exclusivamente de la potencia en el eje. Debido a la restricción de frecuencia impuesta por la red, la velocidad de giro del eje no cambia nunca, por lo que la potencia en el eje varía sin cambiar su velocidad de giro. Es importante notar que si la potencia mecánica en el eje dejara de ser entregada por alguna razón, la máquina sincrónica operaría como motor, consumiendo potencia de la red. La potencia reactiva entregada a la red queda controlada por la corriente de campo del generador sincrónico.

Se observa que la principal diferencia con el modo de operación aislada es el desacople entre la tensión y frecuencia de salida del generador, lo que permite facilitar el control del generador.

### 4.3 Control del generador sincrónico.

Debido a lo expuesto en la sección anterior, el tipo de control a utilizar varía dependiendo del modo de conexión del generador, ya sea conectado o aislado de la red. Sin embargo, las variables a controlar generalmente corresponden a la velocidad de giro y la corriente de excitación.

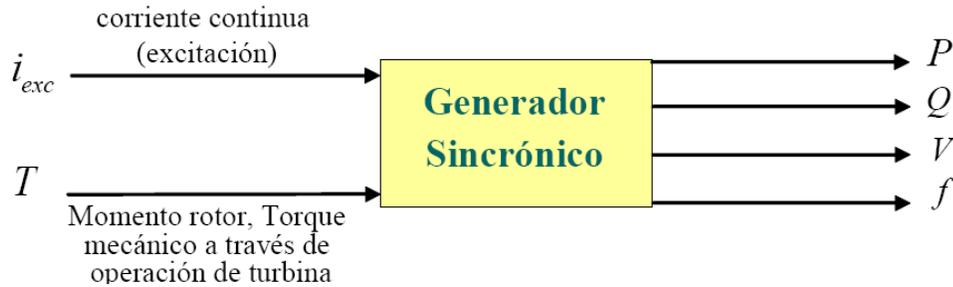


Figura 4.3: Variables de control y salida en un generador sincrónico [7]

En la actualidad existen varios controladores para los generadores sincrónicos, los que se basan en distintas características de éstos. Dentro de los más comunes, para la máquina conectada a la red, están el control automático de generación (AGC) y el control de reactivos (AQC), los que se basan en el desacople entre la potencia activa y reactiva entregada por el generador.

Debido al papel fundamental en la estabilidad del sistema que juegan las variables de control (corriente de campo y válvula de accionamiento de la potencia mecánica), es importante considerar el tipo de controlador a utilizar en cada una de ellas. A pesar de las diferencias en la operación del modo conectado y aislado de la red, las distintas funciones que puede realizar el generador corresponden a regulador de tensión en bornes, compensador de reactivos, regulador del factor de potencia. Debido a que se tienen distintos ámbitos de operación para estos controladores, el desempeño de uno u otro es diferente. Comúnmente se obtienen mejores resultados utilizando el control de campo por regulación de tensión.

En el último tiempo, en los reguladores de tensión automáticos (AVR) se han implementado controles PID discretos, o difusos, los que para pequeños generadores han respondido de manera satisfactoria para conexión y desconexión de carga.

Con el fin de estabilizar el sistema, debido a las posibles oscilaciones ocasionadas por los generadores vecinos, se utiliza un estabilizador del sistema de potencia (PSS).

## Reproducción de una caída real de agua

Por lo comentado en el Capítulo 3, se sabe que las centrales hidroeléctricas utilizan la energía del agua dependiendo del caudal y diferencia de altura de esta. En el siguiente capítulo se dará una noción del comportamiento que se tiene en una caída natural de agua y la forma en que puede ser emulada utilizando una bomba centrífuga.

### 5.1 Características de una caída natural de agua

Si entre dos puntos existe una diferencia de altura, el agua fluirá entre ellos por acción de la gravedad y en cada uno de ellos se tiene una energía potencial y cinética características diferentes entre sí. En una primera aproximación, se puede ver el comportamiento del agua al vaciarse un estanque como se tiene en la Figura 5.1.

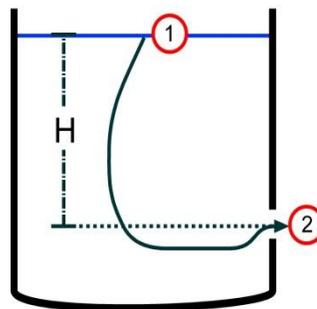


Figura 5.1: Estanque con orificio de vaciado.

En el diagrama anterior, el agua al salir por el orificio (punto 2) lo hace con velocidad unidireccional y se supone que corresponde a un líquido incompresible y que no existe roce, por lo que se puede aplicar la ecuación de Bernoulli, la que dice que en una línea de corriente, la energía que posee un fluido permanece constante a lo largo de su recorrido.

$$P + \rho gh + \frac{1}{2}\rho V^2 = cte \quad \text{Ecc. De Bernoulli} \quad (5.1)$$

De la ecuación anterior se distinguen 3 términos,  $P$  es la presión,  $\rho gh$  la energía potencial y  $\frac{1}{2}\rho V^2$  la energía cinética del fluido, donde  $\rho$  la densidad del agua,  $g$  la aceleración de gravedad,  $h$  la altura y  $V$  la velocidad del agua.

Luego aplicando la ecuación anterior en la línea de corriente señalada en la Figura 5.1, se tiene la siguiente relación:

$$P_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = P_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 \quad (5.2)$$

Suponiendo que el diámetro del estanque (punto 1) es mucho mayor al área del punto 2, entonces se puede decir que la altura del punto 1 permanece constante, lo que implica que su velocidad es nula ( $V_1 = 0$ ), además la presión en ambos puntos corresponde a la presión atmosférica. Aplicando lo anterior en la ecuación 5.2 se obtiene:

$$H = h_1 - h_2 = \frac{V_2^2}{2g} \Rightarrow V_2 = \sqrt{2gH} \quad (5.3)$$

De la ecuación 5.3 se desprende que si las dimensiones del orificio son despreciables comparadas con el diámetro del estanque, la velocidad de salida del agua es la misma que tiene una partícula en caída libre desde una altura igual a la profundidad del orificio. Ahora se puede aproximar el comportamiento que tiene el agua cuando es canalizada por una tubería con el fin de llevarla a la turbina de una central. La siguiente figura muestra lo anterior.

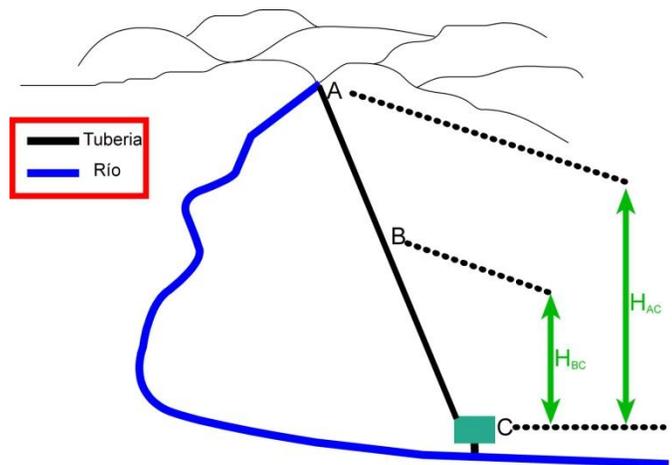


Figura 5.2: Derivación de parte del río hacia una central micro – hidráulica.

El comportamiento que tiene en el estanque es muy similar al mostrado en la Figura 5.2, ya que la altura del agua a la entrada de la tubería permanece constante. Sin embargo debido a que ya no es un caso ideal existe una pérdida de carga en la tubería, significando una pérdida o disminución de la altura real que observa el punto C con respecto a los puntos “aguas arriba” en la cañería, por lo que es necesario agregar un término a la ecuación 5.2, obteniéndose:

$$P_A + \rho gH_{AC} + \frac{1}{2}\rho V_A^2 = P_{ATM} + \frac{1}{2}\rho V_C^2 + \xi_{BC} \quad (5.4)$$

En donde  $\xi_{BC}$  corresponde a las pérdidas de carga asociadas al tramo AC, las que se dividen en pérdidas de carga por rozamiento, que se obtienen por la fricción entre el agua y las paredes de la tubería, y pérdidas en singularidades de las tuberías tales como cambios de dirección, codos, juntas, etc. Las siguientes expresiones caracterizan las pérdidas antes nombradas [17].

$$J = 10.674 * \left( \frac{Q^{1.852}}{C^{1.852} * D^{4.871}} \right) * L \quad \begin{array}{l} \text{Pérdida de carga por} \\ \text{fricción (Hazen Williams)} \end{array} \quad (5.5)$$

$$\lambda_s = K \left( \frac{V^2}{2g} \right) \quad \begin{array}{l} \text{Pérdidas de carga en} \\ \text{singularidades} \end{array} \quad (5.6)$$

En donde:

$J$ : pérdida de carga o de energía (m)

$Q$ : Caudal ( $m^3/s$ )

$C$ : Coeficiente de rugosidad

$D$ : Diámetro interno de la tubería (m)

$L$ : Longitud de la tubería (m)

$\lambda_s$ : pérdida de carga o de energía (m)

$K$ : Coeficiente empírico

$V$ : Velocidad media del flujo (m/s)

$g$ : Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

Sin embargo, si se considera una tubería de PVC de 6,7 cm de diámetro para transportar un caudal que varía entre 0 y 300 [L/min] entre 2 puntos con una diferencia de altura de 50 metros, la pérdida de carga obtenida es aproximadamente de 1.5 a 2 metros por lo que se puede suponer que la altura neta ( $H_{AC}$ ) permanece constante. Luego, esto se traduce en que al tomar un punto cualquiera entre los extremos de la tubería, por ejemplo el punto B de la Figura 5.2, la presión permanecerá constante, ya que al aplicar la ecuación de Bernoulli entre ambos puntos considerando que la presión en el punto B es medida con respecto a la presión atmosférica, luego de un reordenamiento algebraico se obtiene:

$$P_B = \rho g H_{AB} + \frac{1}{2} \rho (V_A^2 - V_B^2) \quad (5.7)$$

Además de la ecuación de Bernoulli, para estudiar el caso antes mencionado se debe agregar la ecuación de continuidad o conservación de la masa de un fluido, la que dice que en un ducto o tubería de secciones distintas ( $A_1, A_2$ ) la masa del fluido que entra es igual a la masa que sale, traduciéndose en la siguiente ecuación:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (5.8)$$

Con  $V_1$  y  $V_2$  las velocidades en cada punto. Aplicando esto entre los puntos A,B y asumiendo que la tubería es regular en toda su extensión, es decir  $A_A = A_B = cte$ , se tiene que  $V_A = V_B$  y de la ecuación 5.7 al ser la diferencia de altura constante, la presión en cualquier punto de la cañería también lo será.

## 5.2 Comportamiento de una bomba centrífuga.

Las bombas centrífugas a diferencia de las turbinas hidráulicas, son máquinas que transforman un trabajo mecánico en otro de tipo hidráulico ya que mueven un cierto volumen de líquido entre dos niveles con diferencia de altura.

Por lo general, las bombas centrífugas están conformadas por una tubería de aspiración, el impulsor o rodete, la voluta y la tubería de impulsión. El impulsor o rodete es el encargado de someter a las partículas del líquido a un movimiento de rotación muy rápido, generando una fuerza centrífuga que las impulsa hacia el exterior, creando una altura dinámica de forma que abandonan el rodete hacia la voluta a gran velocidad, obteniéndose la elevación del líquido por la reacción entre el eje y el rodete sometido al movimiento de rotación. La voluta es el encargado de recoger el líquido que abandona el rodete a gran velocidad, darle una nueva dirección y guiarlo hacia la brida de impulsión. La siguiente figura muestra los componentes antes mencionados [18].

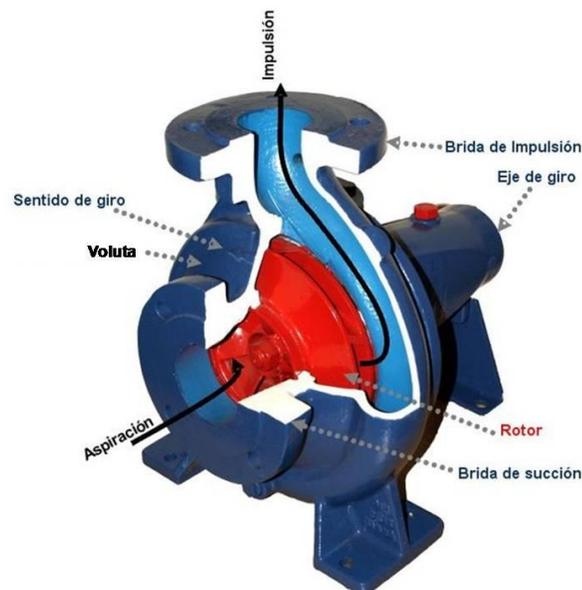


Figura 5.3: Componentes de una bomba centrífuga.<sup>4</sup>

Las características de las bombas centrífugas están relacionadas con la altura a la cual pueden elevar un líquido respecto a un nivel de referencia cuando impulsan cierto caudal. El desnivel o altura geométrica existente entre los niveles mínimo y máximo del líquido ( $H$ ) se divide en 2 alturas, la altura de aspiración  $H_a$ ; y la altura de impulsión  $H_i$  (ver Figura5.4) , por lo que se tiene:

$$H = H_a + H_i \quad (5.9)$$

<sup>4</sup> Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Bomba\\_centrifuga.jpg](http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Bomba_centrifuga.jpg)

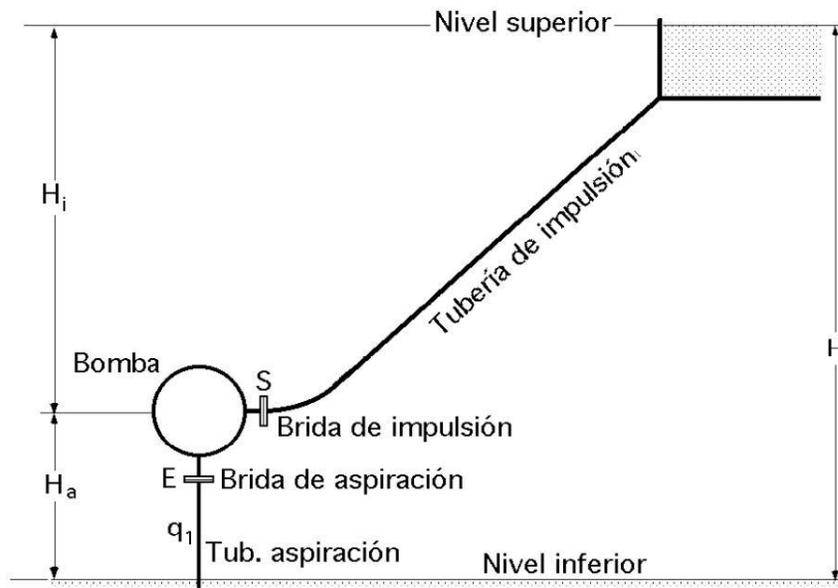


Figura 5.4: Alturas relacionadas con una bomba centrífuga [18].

Luego, al existir pérdidas de carga internas de la bomba ( $\Delta_i$ ) y en las tuberías de aspiración e impulsión ( $\Delta_e$ ), se deben considerar 2 alturas en adición a las anteriores, correspondientes a la altura total creada por la bomba  $H_t$  y a la altura manométrica de la bomba  $H_m$ , por lo que:

$$H_t = \Delta_i + \Delta_e + H \quad (5.10)$$

$$H_m = H_t - \Delta_i = H + \Delta_e \quad (5.11)$$

Lo anterior se debe a que la bomba debe ser capaz de generar la altura total, con el fin de obtener la elevación deseada del líquido, venciendo las pérdidas de carga correspondientes. El diseño y tamaño tanto del rodete como de la voluta permiten obtener diferentes elevaciones del líquido a utilizar.

### 5.2.1 Curvas características.

Además de la altura a la que se desea elevar un líquido, es importante saber el caudal que va a circular por el sistema hidráulico. Existen ecuaciones que relacionan el caudal con la altura manométrica las que se traducen en la curva característica de una bomba centrífuga.

Tal como se mencionó en la sección precedente, existen pérdidas de carga internas de la bomba, las que se dividen en 2 tipos: las ocasionadas por el rozamiento del líquido; y las debidas a las componentes de choque. Las primeras son proporcionales al caudal circulante y las segundas se producen cuando el caudal que circula es diferente al caudal de diseño.

$$\Delta_{roz} = kq^2 \quad (5.12)$$

$$\Delta_{choque} = \dot{k} * (q - q_t)^2 \quad (5.13)$$

$$\Rightarrow \Delta_i = \Delta_{roz} + \Delta_{choque} = kq^2 + \dot{k} * (q - q_t)^2 \quad (5.14)$$

donde  $k, \dot{k}$  son constantes que dependen de las dimensiones de la voluta, rodete, etc.;  $q$  es el caudal circulante y  $q_t$  corresponde al caudal de diseño de la bomba. Además, se tiene que la altura total puede ser representada en forma general por  $H_t = A - Bq$ , por lo que la ecuación 5.11 se puede reescribir como:

$$H_m = H_t - \Delta_i = A - Bq - kq^2 - \dot{k} * (q - q_t)^2 = A - Bq - Cq^2 \quad (5.15)$$

Lo anterior corresponde a la relación existente entre la altura manométrica y el caudal impulsado por una bomba centrífuga, lo que es conocido como “curva característica” de una bomba. La siguiente figura muestra gráficamente dicha relación.

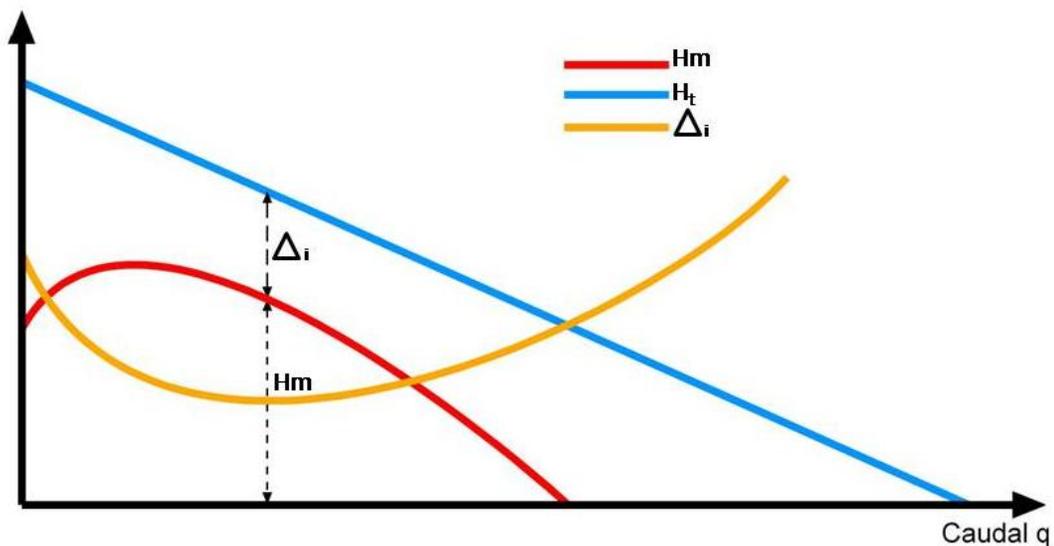


Figura 5.5: Curva característica bomba centrífuga.

Las relaciones anteriores se obtienen al considerar que el eje de la bomba centrífuga gira a una velocidad constante, razón por la cual es importante considerar qué máquina es la que está entregando la potencia mecánica a la bomba. Por lo general al adquirir una bomba centrífuga, el motor encargado de hacer girar el eje corresponde a un motor de inducción dada la gran facilidad de obtención, bajo costo y alto stock de repuestos. Es por esto que las curvas antes mostradas se ven modificadas dadas las características de dichos motores.

### 5.3 Utilización de bomba centrífuga para simulación de caída de agua

En las bombas centrífugas la altura manométrica y el caudal impulsado además de estar relacionadas por la ecuación de la curva característica, varían de acuerdo a la velocidad de rotación dependiendo de las leyes de semejanza, tal como se indica en las siguientes ecuaciones [18]:

$$\frac{q}{q'} = \frac{n}{n'} \quad (5.16)$$

$$\frac{H_m}{H'_m} = \frac{n^2}{n'^2} \quad (5.17)$$

Por lo mostrado en las ecuaciones 5.16 y 5.17, para una misma bomba se pueden tener distintas curvas características, al variar la velocidad de giro del eje.

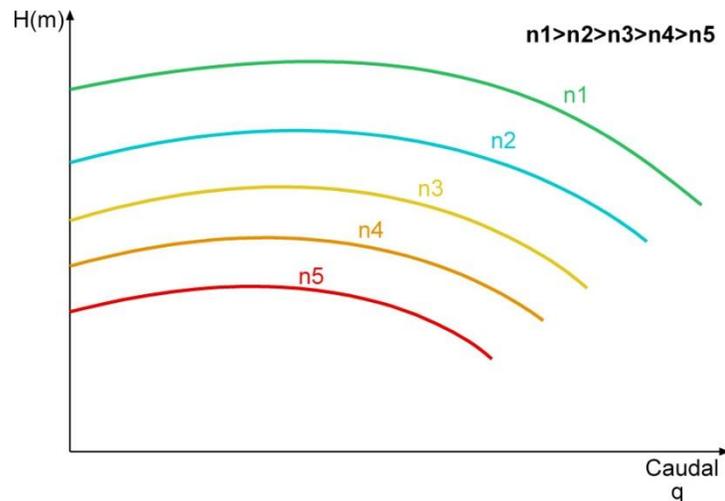


Figura 5.6: Curvas características para distintas velocidades de giro

Luego, si se desea emular una caída de agua utilizando una bomba centrífuga se debe tener en consideración la curva característica de ésta, de donde se desprende que en una primera instancia no permite simular el comportamiento real de una caída natural de agua, ya que al aumentar el caudal la altura disminuye con él y por lo visto en la sección 5.1 esto no concuerda con lo esperado. Sin embargo, al observar la Figura 5.6 se verifica que se puede lograr lo requerido.

Se supone que la bomba está en un cierto punto de operación inicial ( $H, q_i$ ) y el caudal impulsado por la bomba es aumentado ( $q_2$ ), en donde si la velocidad de giro ( $n_3$ ) de la bomba centrífuga permanece constante, la altura manométrica disminuye de acuerdo a la curva característica. En cambio si en conjunto con el aumento del caudal, la velocidad de giro también se aumenta ( $n_2$ ), se obtiene un nuevo punto de operación que entrega el caudal deseado y mantiene la altura constante de acuerdo a las ecuaciones 5.16 y 5.17. Por otro lado, si el caudal es llevado a un valor menor que el inicial ( $q_1$ ), la altura manométrica debería aumentar de acuerdo a la curva característica, pero al igual que en el caso

anterior, si la velocidad de giro disminuye ( $n_4$ ) de acuerdo a la variación del caudal el resultado es una disminución del caudal y la altura manométrica obtenida permanece constante. Esto se puede apreciar de forma gráfica en la Figura 5.7.

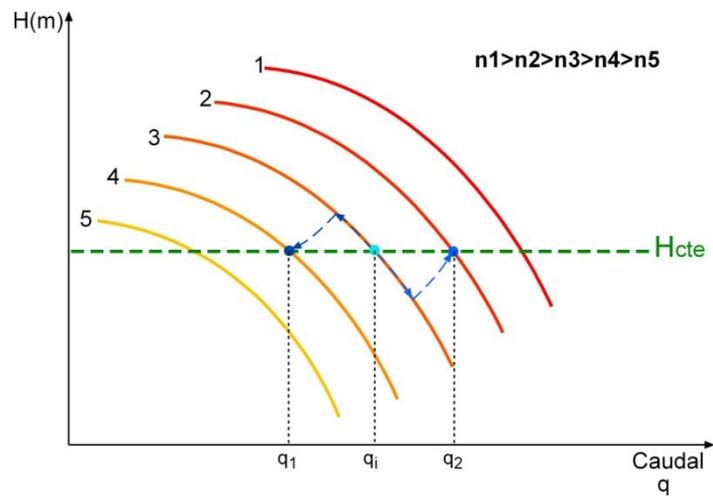


Figura 5.7: Variación de la velocidad de giro y obtención de altura constante.

Finalmente, mediante el control de la velocidad de giro de una bomba centrífuga, es posible reproducir el comportamiento de una caída de agua. Este control se debe implementar sobre la fuente que entrega la potencia mecánica a la bomba centrífuga, realimentando la presión dentro de la tubería en algún punto de ésta. La forma más fácil de lograr la variación de la velocidad de giro de la bomba centrífuga es conectar el motor utilizado como fuente mecánica a un variador de frecuencia, el que permite adecuar la velocidad a los valores deseados.

## Prototipo de central micro-hidráulica

El inicio de los trabajos para desarrollar un prototipo de una CMH en el DIE se remonta al año 2005 cuando el Colegio Suizo, gracias a la gestión del profesor Carlos Gherardelli, dona una pequeña turbina pelton al departamento y alumnos del curso SD20A-Seminario de diseño, bajo la tutela del profesor Rodrigo Palma, arman el primer prototipo del sistema utilizado en este trabajo. En lo que sigue se mostrará el desarrollo del prototipo final.

### 6.1 Simulación del recurso hidráulico

Con el fin de reproducir el comportamiento de un recurso hídrico de la manera más cercana a la realidad, se utiliza una bomba centrífuga alimentada a través de un variador de frecuencia con la finalidad de obtener resultados similares a los señalados en el capítulo anterior. El siguiente diagrama muestra los elementos necesarios y sus conexiones para llevar esto a cabo.

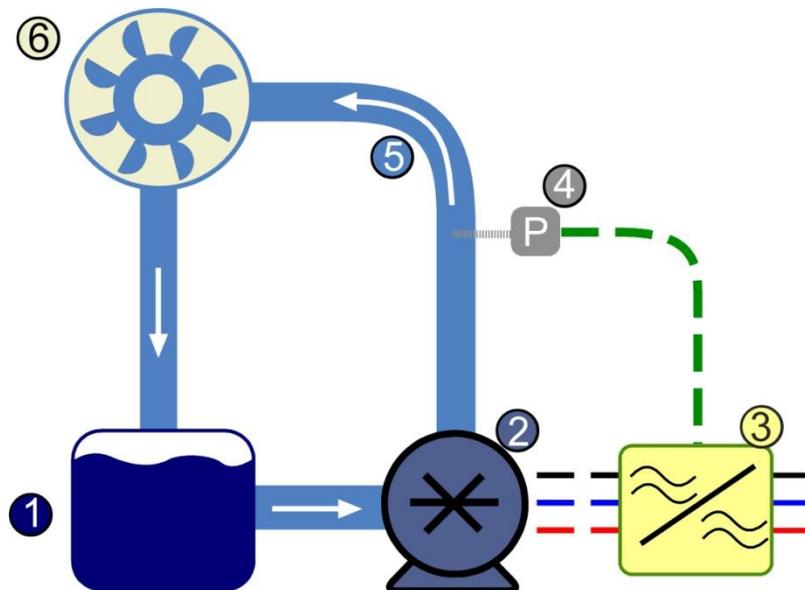


Figura 6.1: Simulación de un recurso hídrico utilizando bomba centrífuga.

La función que cumple cada uno de los elementos que se encuentran en la Figura 6.1 corresponde a:

1. **Estanque de agua:** Permite almacenar el agua utilizada en el sistema. La capacidad máxima de almacenamiento es cercana a los 95 litros
2. **Bomba Centrífuga:** Es el elemento encargado de hacer circular el agua en el sistema, entregando una altura y caudal dados por su curva característica. La bomba centrífuga utilizada es una bomba Calpeda modelo DZA 50-32-200/5.5 conectada a un motor Imateza de 7,5 HP. (Anexo A)
3. **Variador de frecuencia:** Realiza el control de velocidad de la bomba centrífuga mediante la variación de la frecuencia de alimentación de ésta. La señal de referencia o control la recibe desde el sensor de presión con el fin de mantener la presión dentro de la tubería constante. Este elemento corresponde a un variador Schneider - Altivar 71 de 11kW [19].
4. **Sensor de presión (manómetro):** Obtiene la medición de la presión dentro de la tubería y genera una tensión continua proporcional a ella. Dicha señal sirve como referencia para el variador de frecuencia. El elemento utilizado corresponde a un transductor Gems (RS) serie 2200 [25][26].
5. **Tubería de PVC:** Permite la conexión hidráulica entre los distintos componentes del sistema.
6. **Turbina Pelton:** Elemento mecánico que permite transformar la energía potencial del agua en energía cinética capaz de hacer girar un eje.

La operación del sistema se obtiene al accionar la bomba centrífuga. Este elemento succiona agua desde el estanque inyectándola a través de la tubería a la turbina Pelton, haciendo circular un caudal dado por la abertura de la válvula de entrada de la turbina y la característica de la bomba centrífuga. El agua luego de accionar la turbina es devuelta al estanque de manera inmediata.

El funcionamiento de la bomba centrífuga genera una presión dentro de la tubería que es equivalente a tener una caída de agua con una altura proporcional a dicha presión. La bomba utilizada presenta la siguiente curva característica teórica alimentada a 50 Hz.

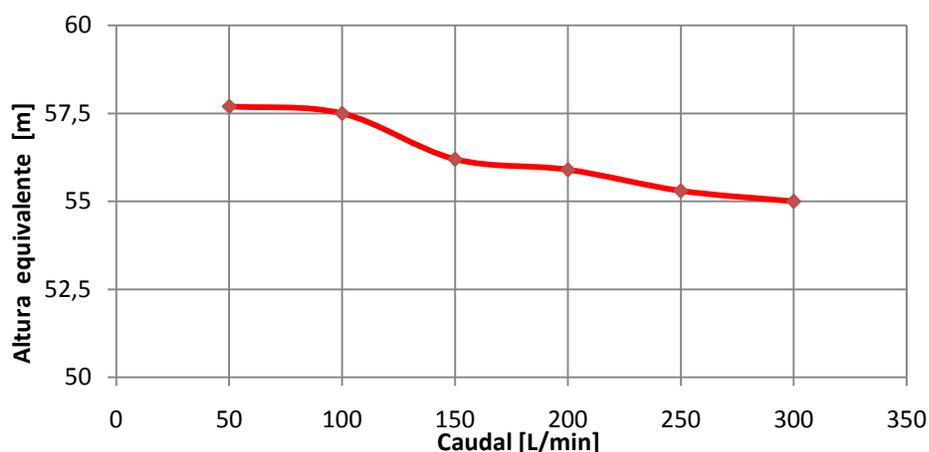


Figura 6.2: Curva característica nominal bomba centrífuga

Dadas las características de la tubería utilizada y el caudal máximo disponible en el sistema, las pérdidas de cargas asociadas a dicha conexión según las ecuaciones 5.5 y 5.6 corresponden aproximadamente a 1 metro, razón por la cual se considera que la presión en la tubería es constante. Por lo anterior se puede estimar el valor de la potencia hidráulica disponible a la entrada de la turbina, utilizando una expresión similar a la señalada en la ecuación 3.1, donde:

$$P[W] = \rho[Kg/m^3] * g[m/s^2] * Q[m^3/s] * H[m] \quad (6.1)$$

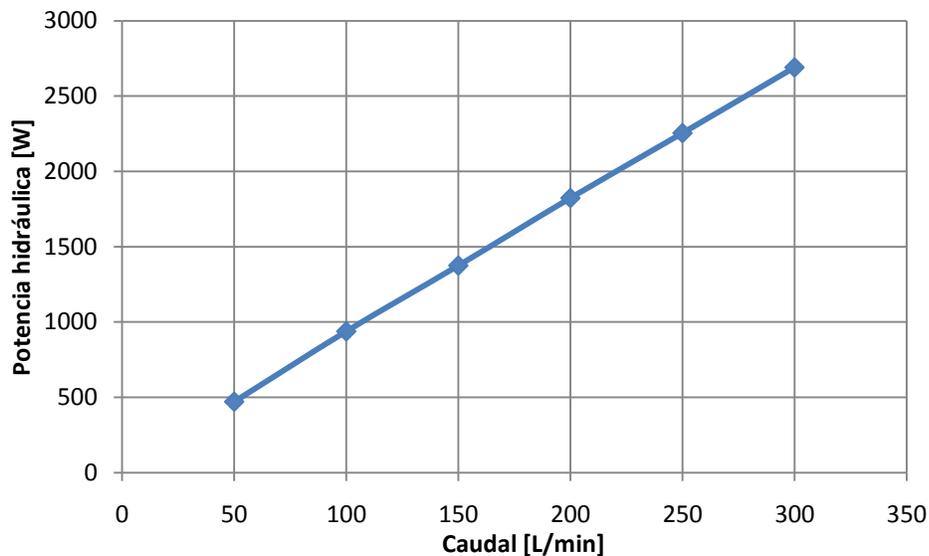


Figura 6.3: Potencia hidráulica generada por la bomba centrífuga

### 6.1.1 Modelo hidráulico

La regulación de la cantidad de agua que entra a la turbina está dada por una válvula de aguja, por lo que su posición determinará el caudal de agua utilizado. Dado que el sistema no cuenta con un medidor directo de caudal, se utiliza la medida de presión dentro de la tubería y la posición de la válvula, por ende el área de salida, para estimar el caudal utilizado y con esto verificar el correcto funcionamiento del sistema.

El área por donde ingresa el agua a la turbina es directamente proporcional con la posición de la válvula (Anexo B), tal como se muestra en la siguiente tabla:

	Posición Válvula [cm]	Área [cm <sup>2</sup> ]
Completamente cerrada	0	0
	0,5	1,4
	1	2,6
	1,5	3,6
	2	4,2
Completamente abierta	2,42	4,5

Tabla 6.1: Área de salida en función de posición de la válvula

Luego, es posible obtener la medida del caudal aplicando la ecuación de Bernoulli y la de continuidad entre el punto donde se encuentra ubicado el manómetro y justo a la salida de la válvula, con lo que se tiene:

$$P_{man} + \rho g \Delta h + \frac{1}{2} \rho V_{man}^2 = P_{ATM} + \frac{1}{2} \rho V_{val}^2 \quad (6.2)$$

$$V_{man} A_{man} = V_{val} A_{val} \quad (6.3)$$

$$\Rightarrow V_{man} = \frac{A_{val}}{A_{man}} V_{val} \quad (6.4)$$

$$V_{val}^2 = \frac{P_{man} - P_{ATM} + \rho g \Delta h}{\frac{1}{2} \rho \left( 1 - \left( \frac{A_{val}}{A_{man}} \right)^2 \right)} \quad (6.5)$$

Dada la definición de caudal, que corresponde a  $Q = A * V$ , más las ecuaciones anteriores y los valores de presión dados por el manómetro, se obtiene una estimación del caudal gracias a la relación existente entre el área de salida y la posición de la válvula. En el anexo B se explica con mayor detalle esta relación.

Es importante hacer notar que la señal entregada por el manómetro corresponde a un voltaje continuo que varía entre 0 y 5 Vcc, el que es proporcional a la presión medida que varía entre 0 y 6 bar. La siguiente tabla muestra la relación existente entre el voltaje obtenido y la altura correspondiente simulada.

Salida [Vcc]	Presión [bar]	Altura equivalente [m]
0	0	0
1	1,2	12
2	2,4	24
3	3,6	36
4	4,8	48
5	6	60

Tabla 6.2: Área de salida en función de posición de la válvula

Dentro de las distintas unidades en que puede ser medida la presión, existe una denominada “metros columna de agua” [m.c.a.], correspondiente a la presión ejercida por una columna de agua pura de un metro de altura. Además una presión de 1 [bar] corresponde a 10 [m.c.a.], de aquí se obtiene la altura equivalente calculada en la tabla anterior.

## 6.2 Generación eléctrica

El eje de la turbina hidráulica Pelton está acoplado a un generador sincrónico trifásico, con el cual es posible generar electricidad utilizando la energía del recurso hidráulico emulado. El componente utilizado para esta función corresponde a un generador trifásico Bambozzi modelo 47270/02 y sus datos de placa corresponden a los siguientes:

Parámetro	Valor
Potencia aparente nominal	3 kVA
Frecuencia nominal	50 Hz
Velocidad nominal	1500 rpm
Factor de potencia	0.8 inductivo
Número de polos	4
Número de fases	Trifásico de 6 terminales
Clase de aislación	B(130°)
Regulación	±7% de Vn
Ciclo de trabajo	Continuo
Tensión nominal generada (entre fases)	
Estator conexión estrella	380 V
Corriente nominal	9.1 A
Estator conexión delta	220 V
Corriente nominal	15.8 A

Tabla 6.3: Datos de placa generador trifásico Bambozzi.



Figura 6.4: Generador Bambozzi trifásico de 3[KVA]

Este generador cuenta con un sistema de autoexcitación el que permite la regulación de la tensión generada. Este sistema de autoexcitación está conformado por un segundo bobinado en el estator, transformadores de corriente y un rectificador de 6 pulsos. El funcionamiento de este regulador se basa en el efecto que ocurre al variar la carga eléctrica del generador. Cuando está en vacío se obtiene una corriente de excitación tal que la tensión generada es la nominal, luego al conectarse alguna carga la tensión disminuye y la corriente aumenta, por lo que los transformadores de corriente producen un aumento de la tensión en sus secundarios y el correspondiente aumento de la corriente de excitación y

por ende de la tensión generada. En caso de desconectarse la carga ocurre el efecto contrario, baja la tensión en el secundario del transformador de corriente y la corriente de excitación. La Figura 6.5 muestra el esquemático del generador y el circuito del sistema de autoexcitación.

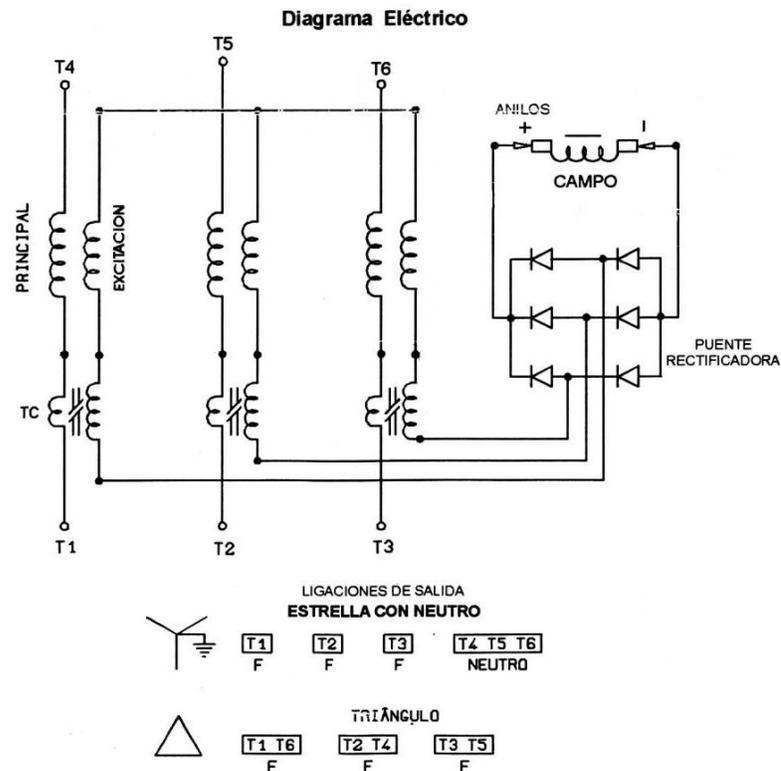


Figura 6.5: Circuito esquemático del generador

Debido a que el sistema de autoexcitación del generador solo sirve para el modo de generación en isla, es necesario intervenirlo y generar una excitación independiente, de manera de poder controlar el nivel de reactivos al estar operando conectado a la red, además de poder realizar los ajustes necesarios del sistema para su correcta sincronización con la red eléctrica.

Con la finalidad de poder caracterizar el generador utilizado, a través de pruebas en el laboratorio se determinaron los parámetros eléctricos de éste, de acuerdo a la norma técnica entregada por la IEEE para estos fines [30]. En la tabla 6.4 se muestra un resumen de los parámetros obtenidos y las figuras 6.6, 6.7 y 6.8 muestran las curvas de excitación y cortocircuito, respuesta al cortocircuito y prueba de deslizamiento respectivamente. En el anexo C se detallan los cálculos realizados.

Parámetro	[ $\Omega$ ]	[p.u.]
Reactancia sincrónica [ $X_S$ ]	59,09	1,22
Reactancia de eje directo [ $X_d$ ]	108,16	2,24
Reactancia de eje en cuadratura [ $X_q$ ]	56,80	1,18
Reactancia transiente de eje directo [ $X'_d$ ]	13,63	0,28
Reactancia sub-transiente de eje directo [ $X''_d$ ]	6,62	0,14

Tabla 6.4: Parámetros del generador.

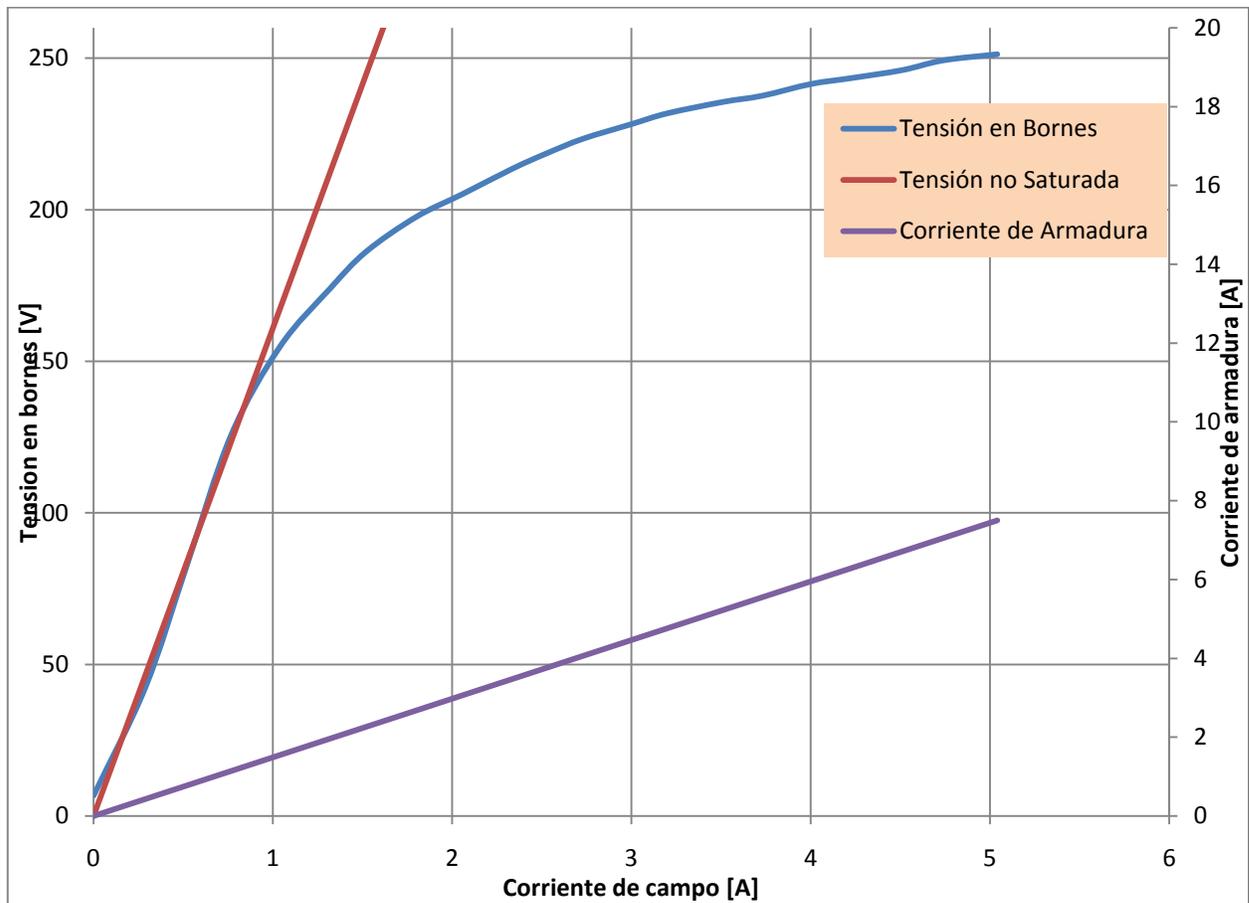


Figura 6.6: Curva de excitación y cortocircuito.

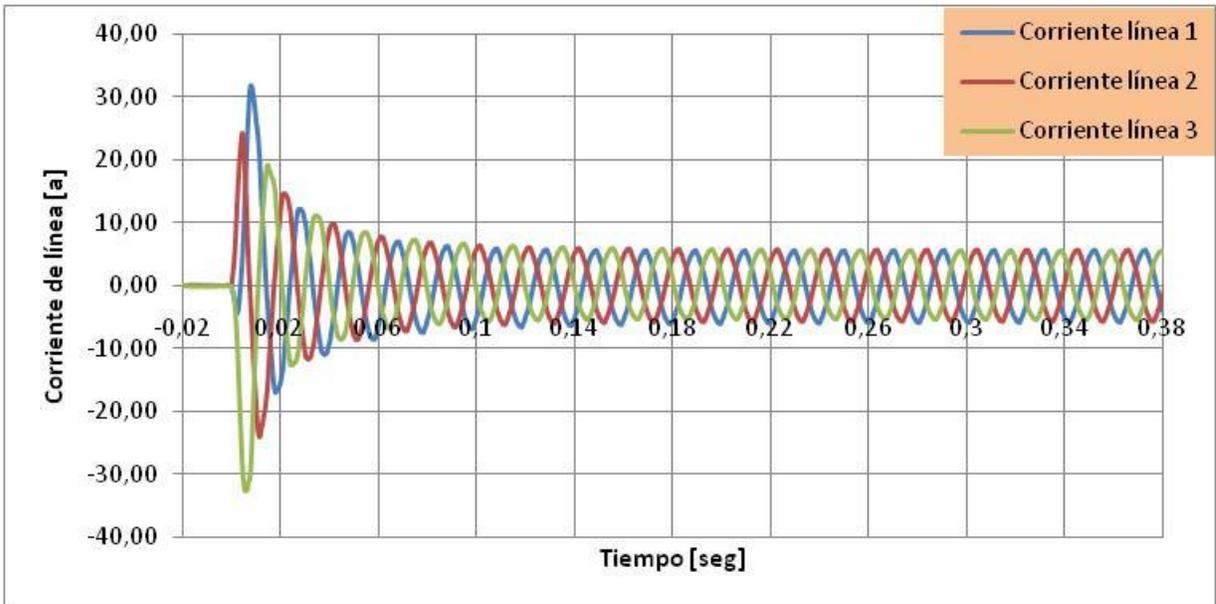


Figura 6.7: Respuesta al cortocircuito.

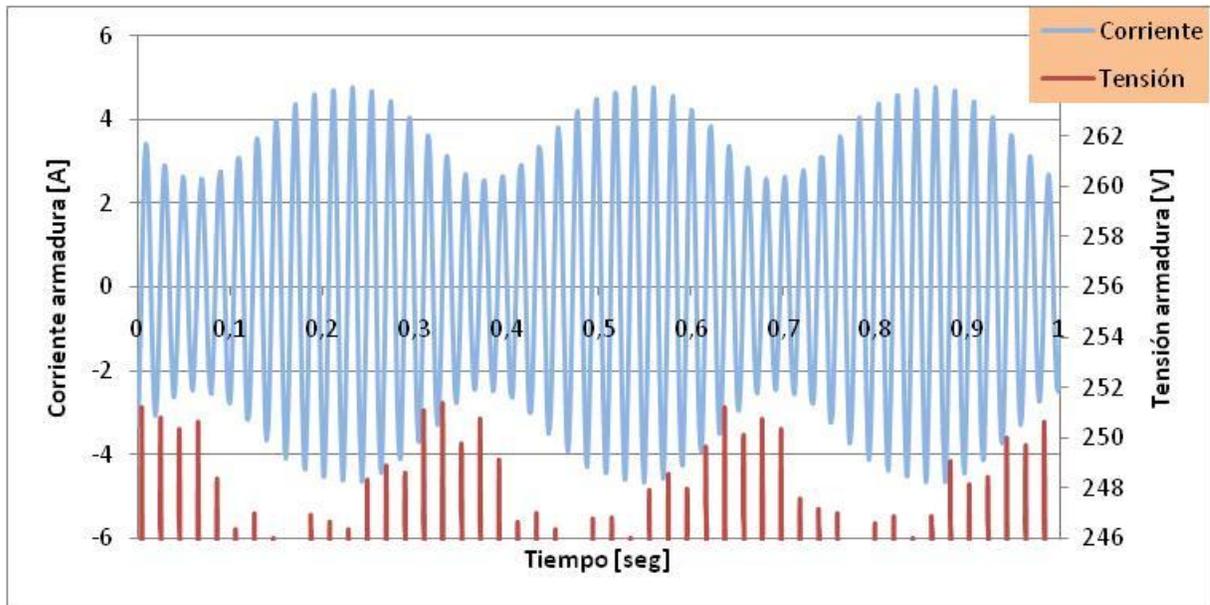


Figura 6.8: Prueba de deslizamiento.

En el prototipo desarrollado, el generador antes descrito es conectado mecánicamente a la turbina hidráulica pelton, la que como se mencionó anteriormente es la encargada de entregar la potencia mecánica al generador y con ello obtener la generación de electricidad. La Figura 6.9 muestra la conexión de estos elementos y las 2 variables que se pueden controlar en el proceso.

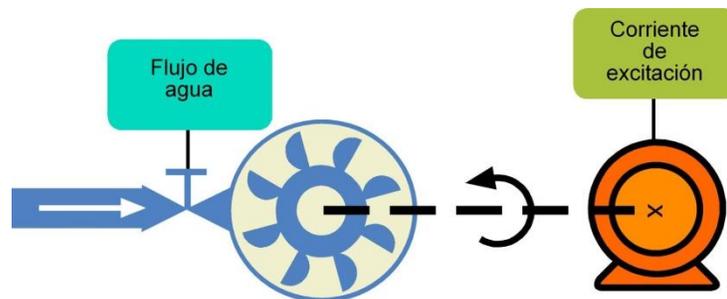


Figura 6.9: Conexión entre la turbina pelton y el generador trifásico con sus respectivas variables de control

La forma en que se controla el flujo del agua y la corriente de excitación se explican en mayor detalle en la sección 6.4.

### 6.3 Prototipo obtenido

Teniendo la simulación de una caída de agua y el sistema de generación eléctrica conectados se obtiene el prototipo de una CMH final a utilizar, el que está compuesto por todos los elementos mencionados anteriormente. La disposición física de estos elementos se puede apreciar en la Figura 6.10.

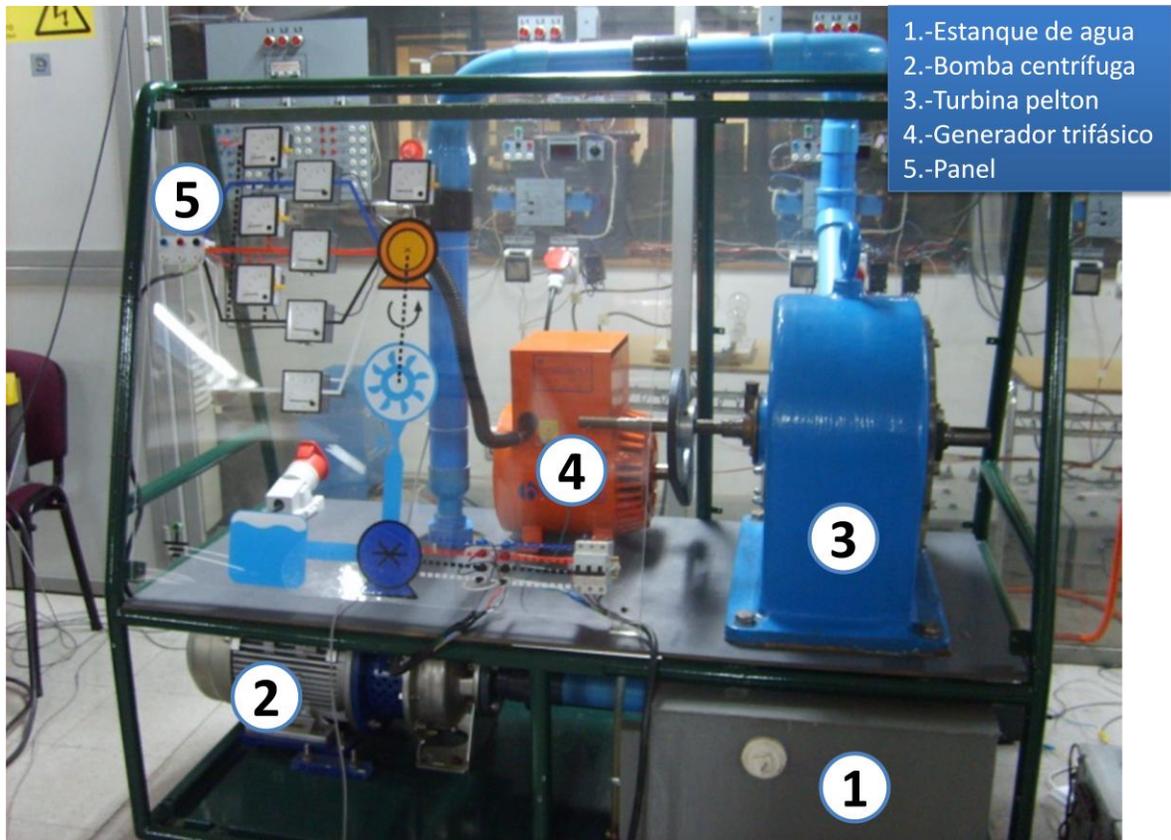


Figura 6.10: Prototipo de CMH desarrollado.

En la figura anterior se verifica la existencia de un panel en el cual se tienen indicadores análogos para los valores de tensión entre fases y corriente de línea generada, además de la frecuencia de éstos. La energía eléctrica generada por la central se puede extraer por 2 conexiones, la primera corresponde a conectores de tipo “banana” ubicados a la izquierda del panel (Ver Figura 6.8) y la segunda es una toma hembra trifásica.

La Figura 6.11 muestra el diagrama del panel utilizado en el prototipo y las mediciones mostradas en el acrílico de la central, correspondientes a medidores análogos señalados por cuadrados negros en el diagrama.

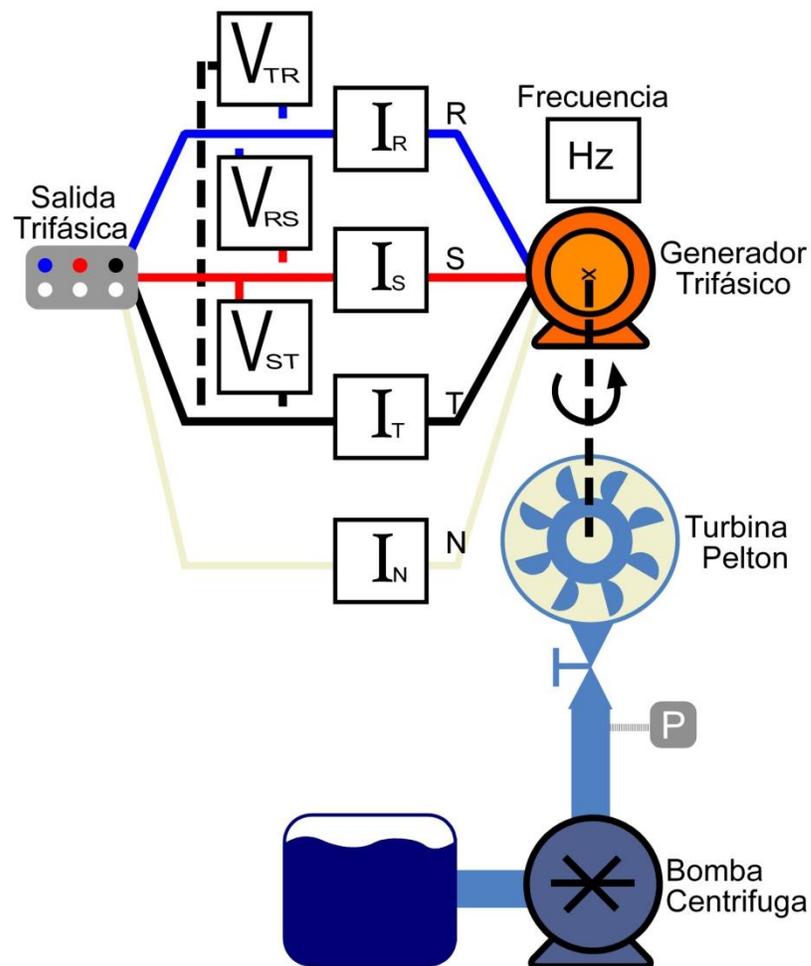


Figura 6.11: Diagrama utilizado en el prototipo de CMH.

## 6.4 Sistema de control para CMH

El trabajo de esta memoria se encuentra relacionado con lo desarrollado por la Iniciativa GEVI perteneciente al Centro de Energía del DIE, formando parte de la modelación de un alimentador rural en el cual se conectan unidades de generación operando como generadores distribuidos. Bajo este esquema de operación resulta beneficioso desarrollar un controlador modular, el que siendo modificado en componentes específicos, pueda ser utilizado en distintas tecnologías de generación. Es por esto que el ingeniero Claudio Vergara, a cargo de la Iniciativa GEVI, ha desarrollado el hardware de un control genérico que es implementado en el prototipo de CMH. La siguiente figura muestra un esquema del control propuesto, las mediciones y conexión de los actuadores.

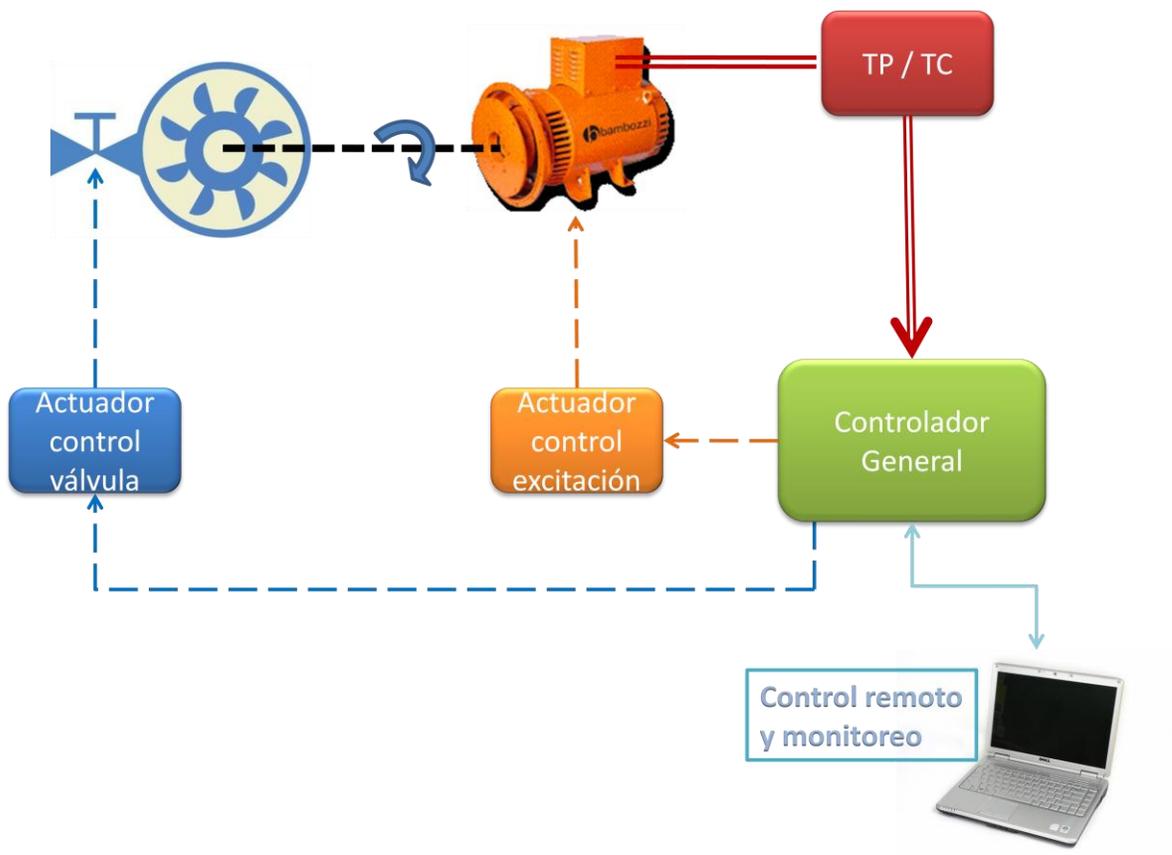


Figura 6.12: Diagrama del control para CMH.

## 6.4.1 Controlador general

Este dispositivo contiene los circuitos eléctricos de medición y control de la CMH. La principal función de este dispositivo es verificar la operación del sistema y enviar las señales de control respectivas en caso de que los valores obtenidos no sean los nominales de operación. Además posee un módulo de comunicación que permite la conexión inalámbrica de un computador, encargado de entregar los modos de operación del sistema, ya sea conectado a la red, en isla o si el control de excitación se realiza de manera manual o en forma automática. También permite el monitoreo de la CMH mediante el uso de la herramienta computacional LabVIEW. El funcionamiento de cada uno de los sub-bloques del controlador general se explica a continuación.

### Circuito de Mediciones

Como se observa en la Figura 6.12 existe un transformador de potencial (conectado entre una fase y neutro) y un transformador de corriente (conectado en serie a una fase), encargados de adecuar los niveles de tensión y corriente respectivamente para que a través de circuitos integrados se puedan llevar a valores digitales y con esto sean analizados por el micro controlador.

La forma en que se mide el valor RMS de la corriente y tensión es similar, tal como lo muestra la siguiente figura.

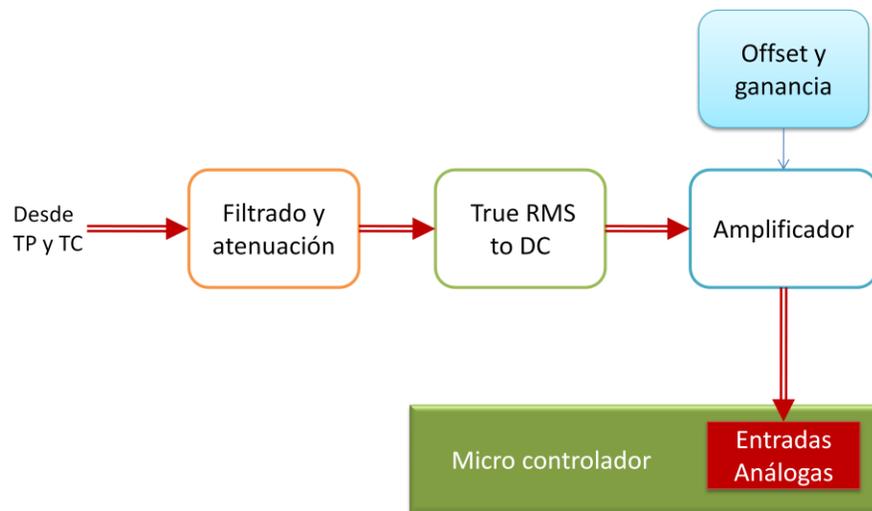


Figura 6.13: Diagrama medición tensión y corriente.

Como se puede apreciar, las señales provenientes de los transformadores, son filtradas y atenuadas mediante la configuración de OP-AMP<sup>5</sup>. La señal alterna obtenida es convertida a una señal continua mediante un convertidor “RMS to DC” el que como su nombre lo indica genera un voltaje continuo proporcional al valor RMS de la señal alterna de entrada (AD736 [22]). Este voltaje continuo es

<sup>5</sup> OP-AMP del inglés operational amplifier

amplificado para luego ser leído por las entradas análogas del micro controlador. La etapa de amplificación cuenta con 2 potenciómetros que permiten ajustar el rango de tensión y corriente a amplificar.

La frecuencia de la tensión generada es medida utilizando un “detector de cruces por cero” (LM311 [28]) circuito que genera una onda cuadrada de 5 Vcc de frecuencia igual a la señal de entrada. Luego esta onda cuadrada es leída por el micro controlador a través de una entrada configurada como interrupción obteniéndose una referencia en el micro controlador de la frecuencia generada. La Figura 6.14 muestra un esquema de lo antes mencionado.

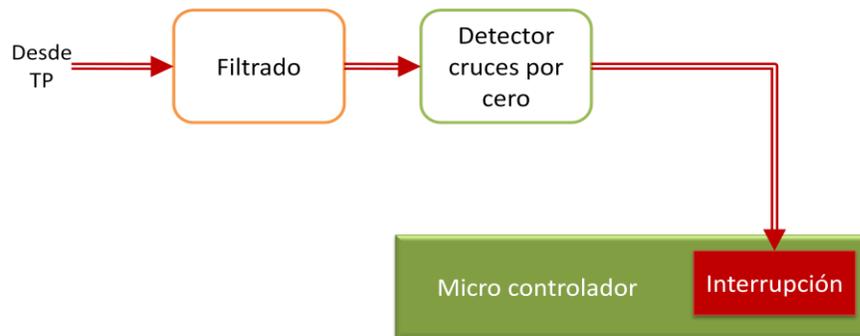


Figura 6.14: Diagrama medición frecuencia.

Otra variable importante a medir es el desfase existente entre la tensión y la corriente, es decir  $\Phi$  ya que permite calcular la cantidad de potencia activa y reactiva entregada al momento de operar la CMH conectada a la red y realizar el control respectivo. La forma de realizar esta medición es la siguiente: mediante el detector de cruces por cero se obtienen 2 ondas cuadradas correspondientes a la tensión y corriente, las que tienen el mismo desfase que las señales originales. Luego se comparan ambas ondas cuadradas y se obtiene una onda cuadrada de ancho equivalente al desfase, la que es transformada a un voltaje continuo para ser leído por una entrada análoga del micro controlador. La Figura 6.15 muestra el diagrama de esta medición.

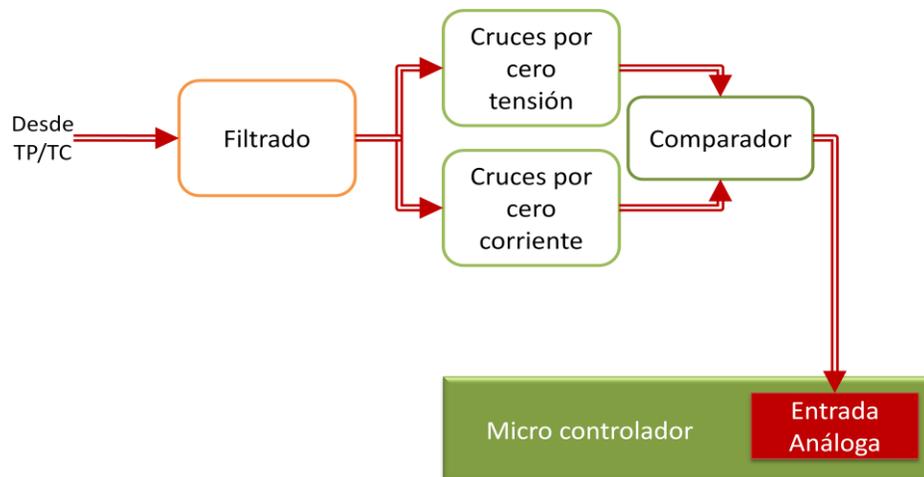


Figura 6.15: Diagrama medición desfase ( $\phi$ ).

## Control remoto

El micro controlador utilizado corresponde a un PIC18F2480 [20] el cual permite transmitir y recibir datos utilizando el puerto serial RS232. Con la finalidad de establecer una comunicación con un control remoto se utiliza un módulo de radio frecuencia que permite la transferencia de información de forma inalámbrica entre el controlador general y otro dispositivo, por ejemplo un computador. Esta conexión permite que el agente externo pueda monitorear el funcionamiento de la CMH así como también el envío de información al controlador general para modificar su operación. El módulo de radio frecuencia utilizado es un *ZigBee* desarrollado por MaxStream [23] y es el encargado de modificar la información que entrega el micro controlador a través del puerto RS232 para ser enviada al control remoto, el que también posee un modulo ZigBee. La siguiente figura muestra un diagrama de esta conexión.

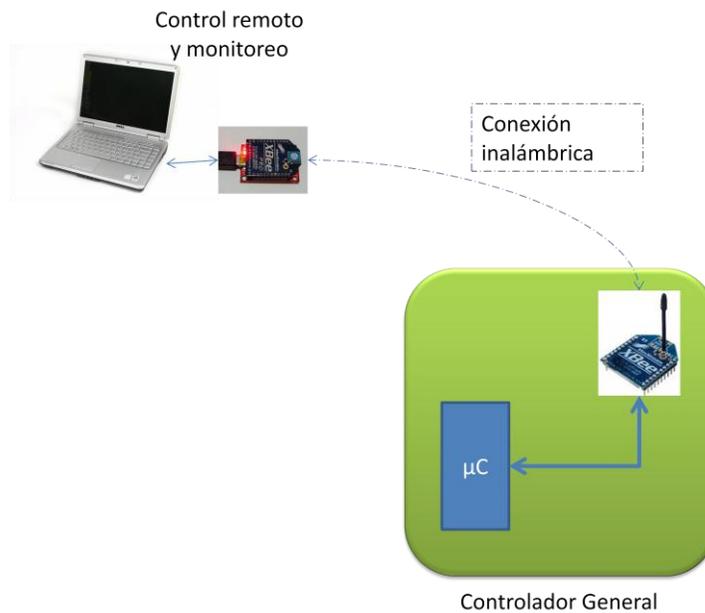


Figura 6.16: Conexión controlador general y control remoto.

## Señales de Control

Como se ha mencionado anteriormente, la CMH tiene 2 variables importantes a controlar correspondientes a la corriente de excitación y el caudal de entrada a la turbina. Es por esto que el controlador general basa su funcionamiento en crear señales dirigidas a los actuadores que permiten modificar las variables a controlar y con ello obtener el funcionamiento requerido de la CMH. Ambas señales de control corresponden a PWM

La señal para controlar el caudal de entrada a la turbina tiene como finalidad modificar la posición de la válvula logrando una variación en la frecuencia de la tensión generada, si la CMH está aislada de la red, o en la potencia activa generada si se encuentra conectada a la red.

El PWM generado para controlar la corriente de excitación tiene como finalidad variar el nivel de tensión generado si la CMH se encuentra operando aislada de la red o modificar la inyección de reactivos al sistema en el otro caso. Esta señal es generada utilizando el módulo PWM disponible en el micro controlador. En cambio el PWM dirigido hacia el control de la válvula es programado mediante funciones internas del micro controlador, pero se obtiene un funcionamiento equivalente.

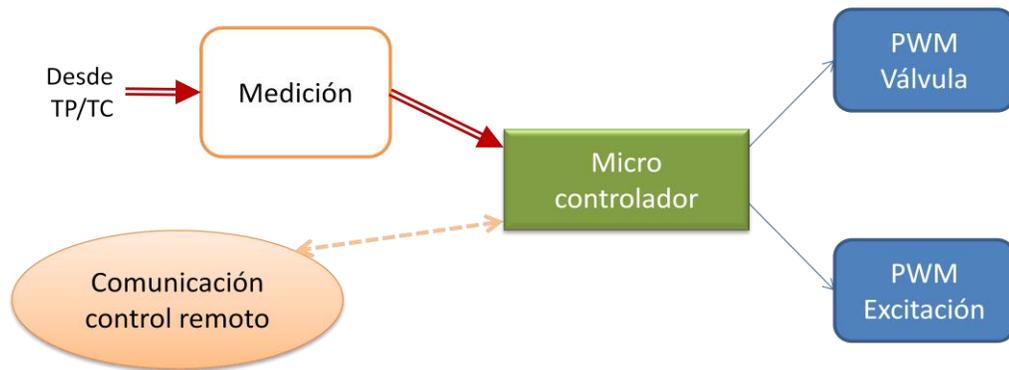


Figura 6.17: Señales de control hacia actuadores.

#### 6.4.2 Control corriente excitación

Como se menciona en la sección 6.3 el generador utilizado posee un segundo bobinado en el estator, el que es conectado a un rectificador y entrega la corriente continua al enrollado del rotor con el fin de crear el campo magnético. Ésta configuración no permite un control sobre la corriente de excitación, por lo que el circuito es intervenido y el bobinado de campo es alimentado de manera externa utilizando un conversor DC-DC tipo “Chopper”. El chopper es alimentado mediante un banco de 4 baterías de plomo ácido de 12 Vcc cada una, ya que es necesario alcanzar una tensión a la entrada del chopper como mínimo cercana a los 45 Vcc. El funcionamiento de este dispositivo se basa en la modulación por ancho de pulso, recibiendo el PWM creado por el controlador general y entregando la corriente de excitación correspondiente al ancho del pulso de entrada. La siguiente figura muestra la conexión realizada.

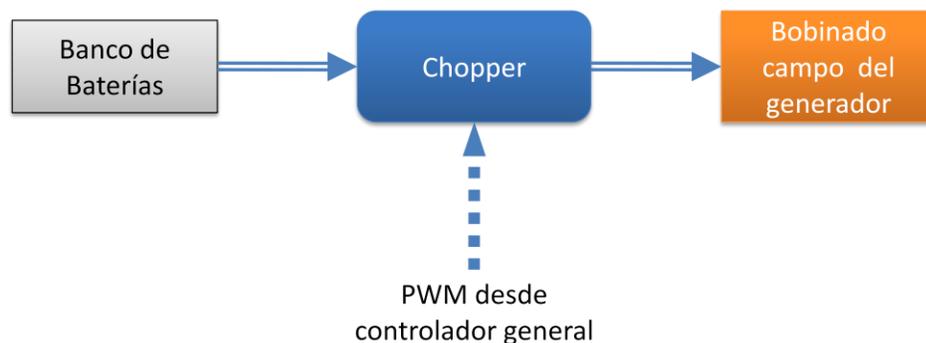


Figura 6.18: Diagrama control excitación

### 6.4.3 Control posición de la válvula

La importancia en éste control radica en la modificación de la cantidad de agua que es utilizada por la turbina y con esto la potencia mecánica que se entrega al eje del generador. Si la CMH está operando en isla, con la modificación de la posición de la válvula se obtiene una variación en la velocidad de giro de la turbina y por ende del rotor del generador, con lo que de acuerdo a la ecuación 4.1 se obtiene una alteración en la frecuencia de las variables eléctricas generadas. En el otro caso, cuando la CMH se encuentra conectada a la red, la velocidad de giro de la turbina modifica la cantidad de potencia inyectada a la red, dado que la frecuencia y tensión no se pueden modificar. Es por esto que resulta de gran relevancia generar un control sobre la posición de la válvula.

Con el fin de modificar la posición de la válvula se utiliza un actuador encargado de recibir la señal PWM entregada por el controlador general, medir su ancho de pulso y dependiendo de este valor se generan pulsos para controlar un motor stepper encargado de mover la válvula. Las acciones de medir el ancho del pulso y generar las señales hacia el stepper son realizadas por un micro controlador PIC16F628A [21]. La Figura 6.19 muestra un diagrama de este control.

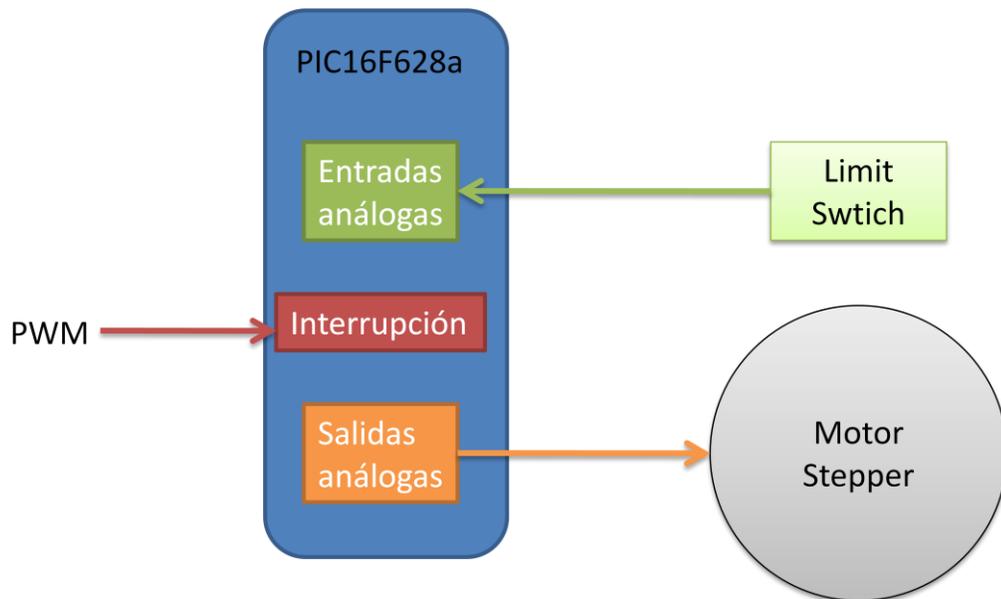


Figura 6.19: Diagrama control posición

En la figura anterior se aprecia un bloque denominado “Limit Switch” el que es el encargado de asegurar que la válvula no sobrepase límites mecánicos de funcionamiento, tanto de apertura máxima como de cerrado máximo.

#### 6.4.4 Sincronización

El cambio de operación de la CMH entre los estados *operación en isla* y *conectado a la red* son establecidos por el control remoto mediante el envío de estos parámetros, en donde se le especifica al controlador general las variables a controlar, es decir frecuencia-tensión cuando esta desconectado de la red o potencia activa-reactiva en el caso contrario. Sin embargo la operación “física” de conectar la CMH a la red la realiza un circuito capaz de medir la tensión y frecuencia a ambos lados, compararlas y determinar el momento preciso para realizar la conexión con la red. La base de este dispositivo fue desarrollado inicialmente por el ingeniero Patricio Mendoza como parte de su proyecto de memoria de título [6], el cual fue modificado agregándole un módulo de comunicación por radio frecuencia ZigBee con el fin de poder realizar la comunicación inalámbrica con el control remoto.

# Implementación del control en CMH

## 7.1 Algoritmo de control

La programación del micro controlador PIC18F2480 se realizó en lenguaje C el cual permite efectuar distintas funciones dentro del código de programación de manera sencilla. El algoritmo de control posee una estructuración cíclica, verificando el estado de operación, obteniendo los valores de las mediciones y generando las señales de control. A pesar de que se observan 3 agrupaciones o etapas del control, éstas se pueden agrupar en 2 sub-etapas: obtención de mediciones y acciones de control.

### 7.1.1 Medición de variables.

Corresponde a la etapa en la cual se realiza la transformación de las señales análogas provenientes de los circuitos de medición a valores digitales para ser procesador por el algoritmo de control. Estas mediciones se dividen a su vez en 2 grupos: medición de entradas análogas y medición por interrupciones.

La tensión, corriente y desfase son transformadas a valores digitales mediante la lectura de entradas análogas del micro controlador. La función que permite realizar esta lectura corresponde a **read\_adc()**. Los rangos de adquisición para la tensión y corriente son ajustable por los potenciómetros mencionados en la sección 6.4.1, por lo que el rango de lectura para la tensión va desde 180 a 260 V y para la corriente se tiene un rango de 0 a 3,5 A. EL rango nominal de lectura de las entradas análogas es de 0 a 5 Vcc y el comando read\_adc() entrega datos en un rango de 0 a 10 bits correspondientes al rango de entrada. Es por esto que si se ajustan los potenciómetros de tal manera que para 220 V a la entrada del micro controlador se tenga una tensión continua de 2,5 Vcc el comando read\_adc() entregara un valor digital correspondiente a 512.

La frecuencia es medida utilizando la función de interrupciones que tiene el micro controlador. Por lo explicado en 6.4.1, al pin de interrupciones del micro controlador llega una señal cuadrada de frecuencia equivalente a la obtenida en el generador y se detectan los cambios de valores de esta señal (0 y 1 digitales). Lo que realiza el micro controlador es contar el tiempo transcurrido entre 2 activaciones

consecutivas de la interrupción obteniendo un valor digital proporcional al período de la señal. El incremento de tiempo utilizado para contar el tiempo corresponde a  $6,4 \mu\text{s}$ , por lo tanto para 50 Hz, que equivalen a 20 ms, se tiene un valor digital de 1562,5.

Por lo anterior explicado, el algoritmo de control tiene valores digitales proporcionales a las mediciones reales y con el fin de simplificar el código, las medidas y acciones de control se realizan sobre éstas referencias digitales. Sin embargo para el control de potencia activa y reactiva es necesario calcular los valores reales (físicos), lo que se realiza multiplicando los valores digitales por alguna constante.

### 7.1.2 Acciones de control

Este sub grupo de funciones dentro del algoritmo tiene como finalidad establecer la comunicación entre el control general y remoto para poder determinar el estado de operación del sistema y generar las señales PWM de los actuadores con el fin de llevar a la CMH al punto de operación deseado. Además, desde el control remoto se obtienen datos de operación del sistema, tales como si el control de excitación está en modo manual o automático. La Figura 7.1 muestra un esquema del algoritmo de control utilizado.

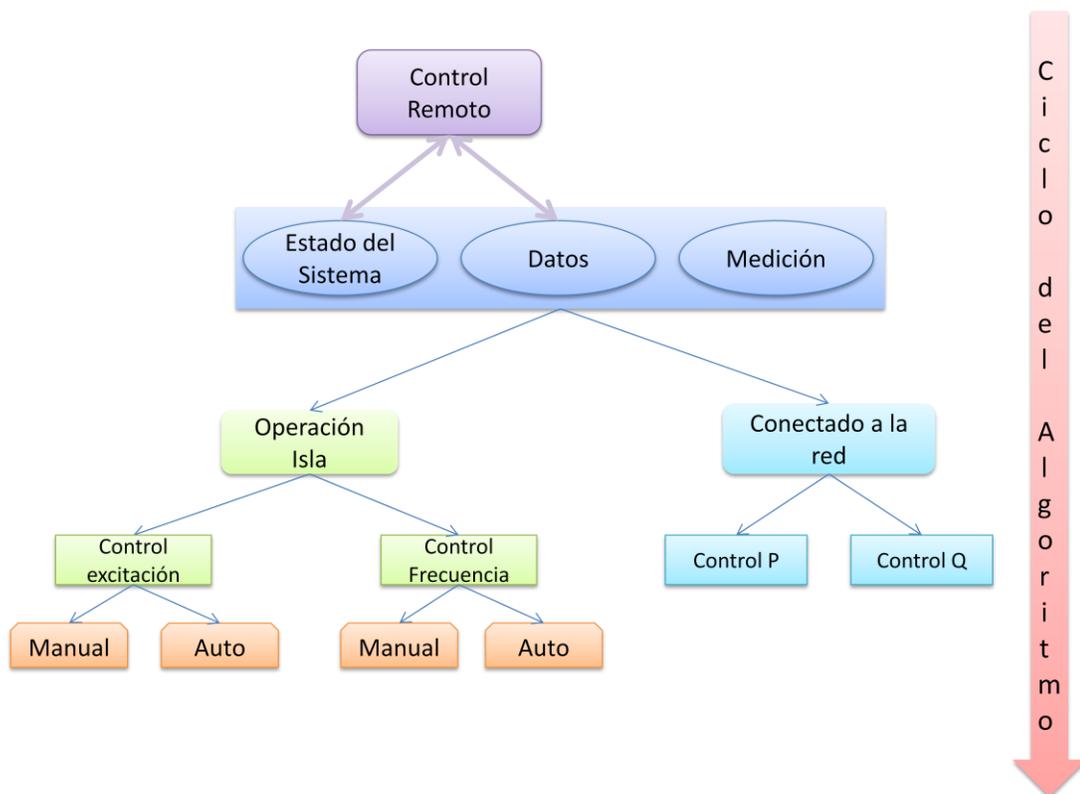


Figura 7.1: Algoritmo de Control

Este ciclo se puede ejemplificar como:

1. Comunicación con el control remoto. Se obtiene estado de operación del sistema (isla o conectado a la red) y datos relevantes para el funcionamiento de la CMH tales como: control manual/automático corriente excitación, control manual/automático posición válvula, Setpoint potencia activa y reactiva. Al control remoto se le envía datos de operación del sistema (tensión, corriente, etc)
2. Realiza la lectura de las señales de medición, guardando sus valores correspondientes en variables internas del controlador. (frecuencia, tensión, corriente y desfase entre estas últimas).
3. Actúa dependiendo del estado indicado por el control remoto.
  - *Operación en isla:* Realiza control de frecuencia y excitación, dependiendo si es manual o automático. El control automático de frecuencia se realiza mediante distintas velocidades dependiendo del valor del error existente. Esto se debe a que la variación del área de salida de la válvula no es lineal con la posición [Ver anexo B]. El control automático de excitación aumenta o reduce la corriente de campo dependiendo si la tensión esta bajo o sobre el nivel nominal respectivamente.
  - *Conectado a la red:* El control se realiza sobre la potencia activa, abriendo o cerrando la válvula dependiendo si la potencia activa se encuentra bajo o sobre la referencia configurada. Lo mismo ocurre para el control de potencia activa al cambiar la corriente de excitación.

## 7.2 Monitoreo y control remoto

EL sistema de monitoreo y control remoto se desarrolló a través de la plataforma computacional LabVIEW [24] la cual permite realizar una “programación visual” de manera sencilla a través de diagramas de bloques en lugar de códigos. Debido a la alta compatibilidad que posee éste software con otros programas e instrumentos, utilizando el puerto USB se puede realizar la comunicación a un dispositivo ZigBee mediante el protocolo del puerto RS232, obteniéndose la conexión inalámbrica entre el control remoto (LabVIEW), el sincronizador y el control general (CMH).

Una característica que poseen los módulos ZigBee es la capacidad de conexión entre varios dispositivos cambiando ciertos parámetros, es decir la antena conectada al control remoto, puede comunicarse con el control general y con el sincronizador sin tener que cambiar de interfaz en el sistema de monitoreo y control, realizando los ajustes de manera interna para lograr esta configuración.

Las características que posee el programa son:

- Visualización de variables eléctricas de la CMH en medidores e indicadores numéricos. Las variables incluidas son: tensión fase neutro, corriente de línea, frecuencia eléctrica, potencia activa, potencia reactiva, factor de potencia.
- Variación temporal de la frecuencia y tensión visualizada a través de gráficos independientes.
- Control sobre el estado de operación de la CMH, mediante un interruptor se controla la conexión u operación en isla de la central.
- Se puede decidir si el control de excitación y de posición de la válvula es automático o manual. En caso de ser manual se tiene la capacidad de modificar sus valores de forma independiente.
- Al operar en modo conectado a la red, existe un display donde se ingresan las referencias para el nivel de potencia activa y reactiva que debe entregar la CMH.
- Con el fin de poder documentar el comportamiento de la CMH cuando el usuario lo requiera, existe un botón denominado “Realizar mediciones” que al ser presionado activa un segundo programa capaz de almacenar los datos enviados por el control general para luego ser guardados en un archivo de Excel.
- Finalmente existe un botón que termina el ciclo de monitoreo y control, denominado “Finalizar programa”.

### **7.3 Montaje en laboratorio.**

Los distintos módulos de control son implementados en el prototipo construido (Figura 6.7) ubicado en el Laboratorio de Energía del edificio de Electro tecnologías con el fin de completar el prototipo acercándose lo más posible al funcionamiento normal de una central hidráulica. La disposición de cada parte se explica a continuación.

#### **7.3.1 Control bomba centrífuga.**

Como es comentado en el Capítulo 5, es necesario contar con un control sobre la velocidad de giro de la bomba centrífuga con el fin de obtener un comportamiento más cercano al real. Es por esto que al tener una bomba centrífuga conectada a un motor de inducción, la manera más fácil de regular su velocidad es utilizando un variador de frecuencia conectado entre la red eléctrica y el motor de inducción. El componente eléctrico utilizado para este fin corresponde a un variador de frecuencia Telemecanique modelo Altivar 71 de 11 kW / 380 V, el cual permite realizar un control de la frecuencia

de salida mediante la programación interna de un controlador PID. Dentro de su interfaz, permite configurar este tipo de control, realimentando una señal y configurando la referencia que ésta debiese seguir, además de las constantes propias del controlador (constante de proporcionalidad, tiempo de integración, etc.).

Por otro lado, lo que se busca al realizar este control de frecuencia es mantener la presión dentro de la tubería constante, por lo tanto la señal realimentada corresponde al voltaje entregado por el manómetro. En la Figura 7.2 se observa la disposición física del manómetro en la tubería de la CMH y en la Figura 7.3 se observa la conexión del variador de frecuencia utilizado.



Figura 7.2: Conexión del manómetro a la tubería CMH.

La conexión eléctrica del manómetro necesita de un cable con 4 conectores los que se deben utilizar para:

- Rojo: Alimentación del manómetro. Puede ser alimentado con tensión continua entre 6.5 y 35 Vcc
- Negro: Común negativo entre la alimentación y la salida.
- Blanco: Salida del manómetro. Corresponde a una tensión entre 0-5 Vcc proporcionales a 0-6 bar.
- Verde: Tierra.



Figura 7.3: Variador de frecuencia Altivar 71.

El variador de frecuencia trae incorporado varias funciones que permiten modificar las señales de entrada, ya sea filtrándolas o amplificándolas. EL valor de la referencia determina la altura que se requiere simular, por lo que resulta importante al momento de operar la CMH. La siguiente tabla muestra los valores que se deben ingresar como referencia en el variador de frecuencia para obtener una altura equivalente determinada.

Altura equivalente [m]	Referencia numérica
30	2500
35	2900
40	3200
45	3750
50	4100

Tabla 7.1: Referencias numéricas del variador de frecuencia.

El comportamiento de la bomba centrífuga sin utilizar un variador de frecuencia se muestra en la Figura 7.4, en donde se observa el decaimiento de la altura al momento de aumentar el caudal.

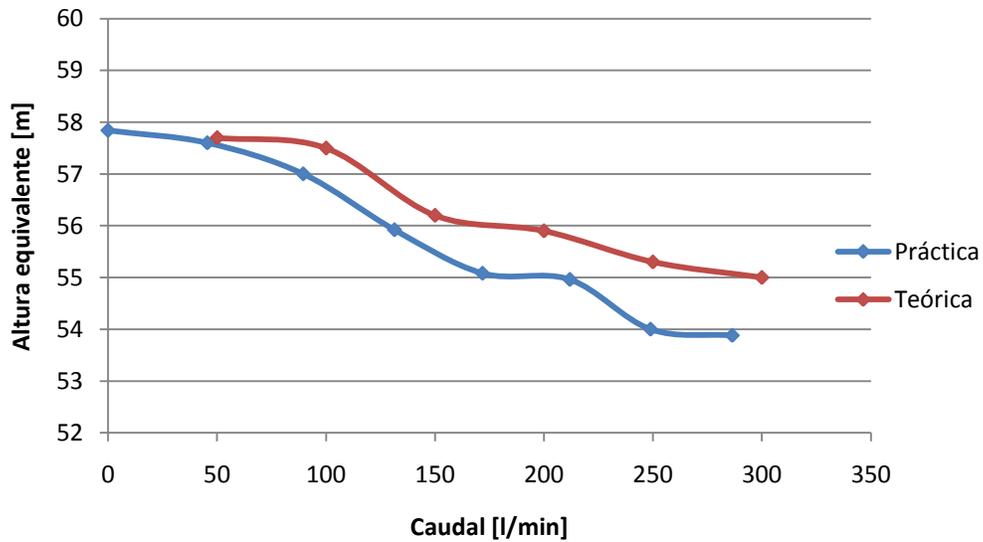


Figura 7.4: Curva característica bomba centrífuga alimentada a 50 Hz.

De la figura anterior se puede apreciar el correcto comportamiento de la bomba centrífuga al ser alimentada con frecuencia eléctrica constante. Es importante señalar que la diferencia entre la curva teórica (datos nominales de la bomba) y la obtenida en el laboratorio aumenta proporcional con el caudal, ya que junto con éste último aumenta el deslizamiento en la máquina de inducción, ocasionando una menor velocidad en el eje de la turbina de la bomba. La curva teórica se obtiene manteniendo constante la velocidad de giro de la turbina.

En la Figura 7.5 se muestra el comportamiento que tiene la altura equivalente entregada por la bomba centrífuga ante una variación en el caudal. Se pueden apreciar 2 curvas: en una el control del variador de frecuencia se encuentra activado, utilizando como señal de control la presión en la tubería, y en la otra situación éste control se encuentra desactivado.

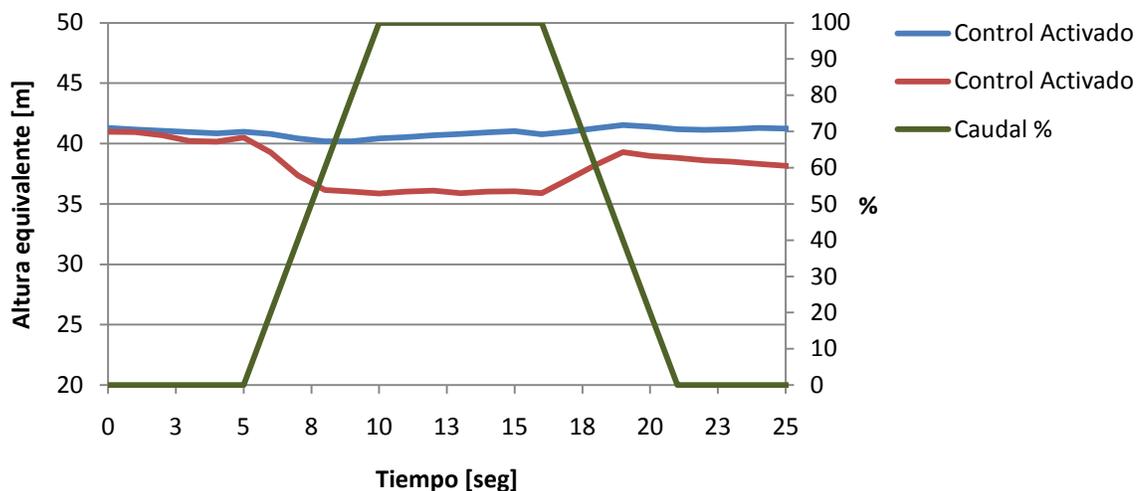


Figura 7.5: Altura equivalente obtenida frente a variaciones en el caudal utilizado.

Las respuestas mostradas en la figura 7.5 son obtenidas al variar el caudal utilizado por la bomba centrífuga desde un 0% a un 100%. Se puede apreciar que al aumentar el caudal, en el caso sin control la altura equivalente varía considerablemente (disminuye aproximadamente 5 metros), al igual que cuando el caudal utilizado es reducido (la altura aumenta). Por el contrario, cuando el control de presión se encuentra activado la presión se puede asumir prácticamente constante, obteniéndose un comportamiento similar al real.

### 7.3.2 Controlador general

El circuito correspondiente al control general necesita alimentación alterna de 220 V para poder alimentar los distintos elementos del circuito de control. La Figura 7.6 muestra el circuito impreso utilizado y los distintos bloques que lo conforman.

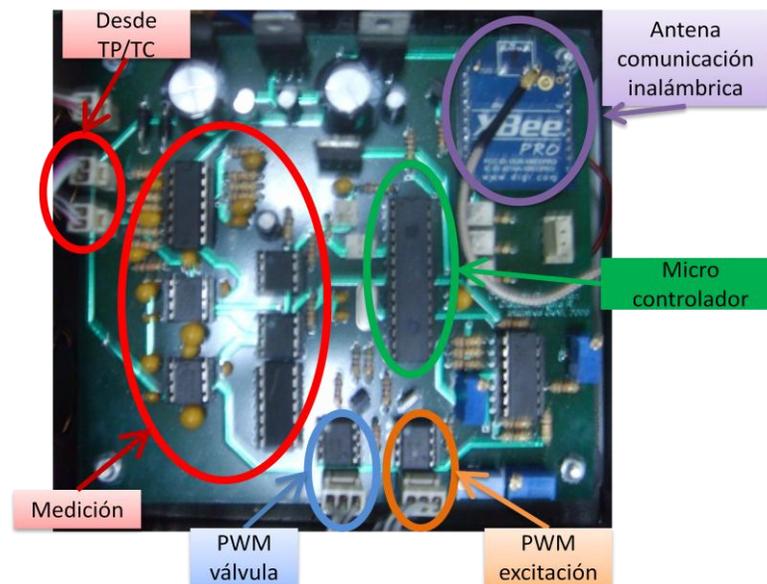


Figura 7.6: Circuito impreso controlador general

Es importante señalar que para el correcto funcionamiento del sistema, este componente debe ser el primero en activarse ya que de otra manera, los actuadores al no recibir señal de control pueden operar de maneras inesperadas. La conexión y ubicación del control en el prototipo se puede observar en figura 7.7.

La comunicación entre el controlador general y los demás componentes del sistema (actuadores, TP, TC) es realizada por el mismo tipo de conectores, buscando una configuración modular de manera que si se produce algún desperfecto en alguno de ellos, pueda ser intercambiado rápidamente

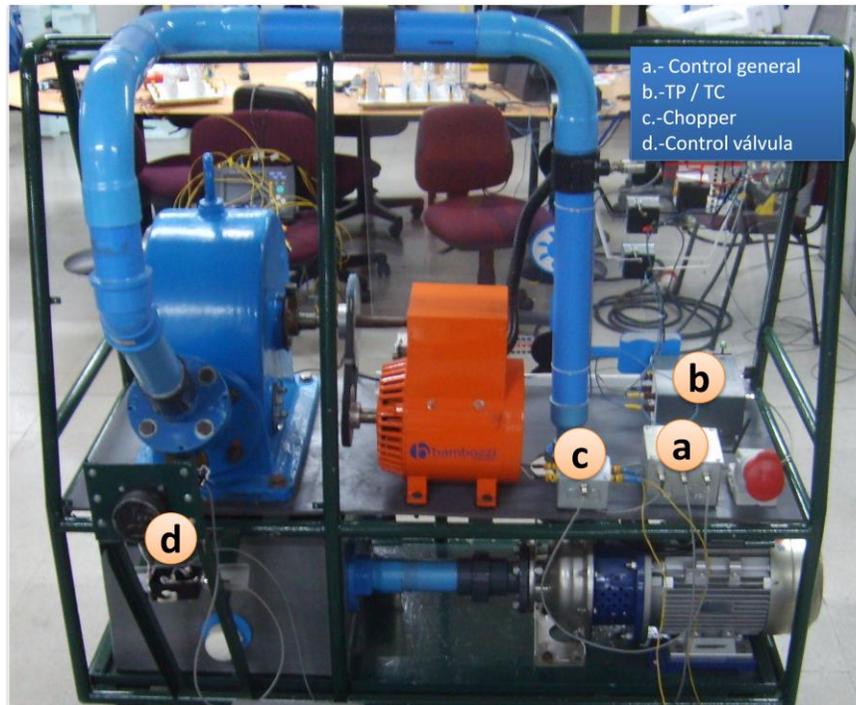


Figura 7.7: Prototipo de CMH con control implementado.

### 7.3.3 Control de frecuencia-potencia activa.

La siguiente figura muestra el circuito impreso del actuador que permite el control sobre el motor stepper, encargado de mover la válvula de inyección de agua.

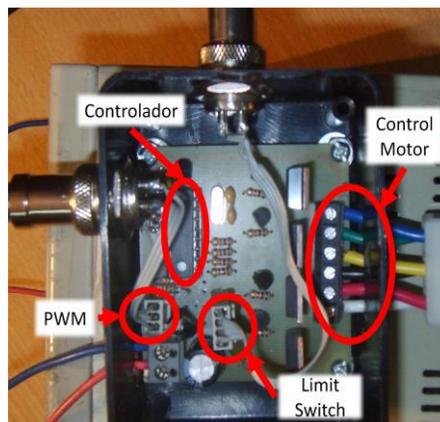


Figura 7.8: Circuito del control del motor stepper.

Al tratarse de un motor stepper, el correcto orden de activación de las bobinas determina el sentido de giro y el torque ejercido por el motor. Existen distintas combinaciones que permiten accionarlo, dentro de las cuales existe una que permite al motor girar rápido y con un torque aceptable capaz de mover la válvula. Esta combinación corresponde a la activación de 2 bobinas a la vez, ejerciendo mayor fuerza sobre el rotor. El ancho de la señal PWM enviada por el controlador general y recibida por este actuador es medida de manera similar al programado para medir la frecuencia de la

red (Ver 6.4.1). La figura 7.9 muestra la conexión física entre el actuador, motor stepper y válvula hidráulica.

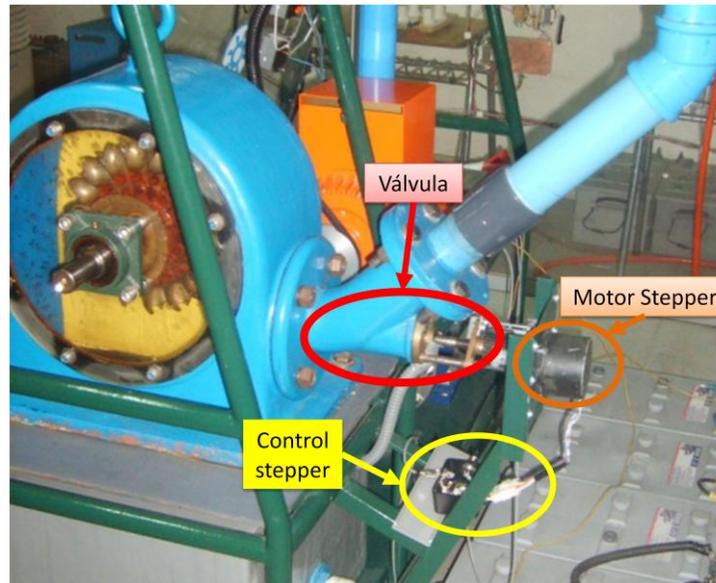


Figura 7.9: Componentes del control frecuencia-potencia activa.

#### 7.3.4 Control corriente de campo.

Tal como se comentó anteriormente, el control de la corriente de campo está a cargo de un chopper que recibe un PWM desde el control general. Para el correcto funcionamiento de este dispositivo y la alimentación de sus componentes es necesario alimentar el circuito con voltaje continuo de 11 Vcc y -11 Vcc (voltajes necesarios para encender y apagar el transistor). Es importante señalar que la falta de estos voltajes inhibe el funcionamiento de control del chopper, dejando pasar la máxima corriente de la fuente por el transistor, pudiendo quemarlo en pocos segundos.

La Figura 7.10 muestra el aspecto físico del chopper y en la Figura 7.7 se observa la conexión y ubicación de éste en el prototipo.

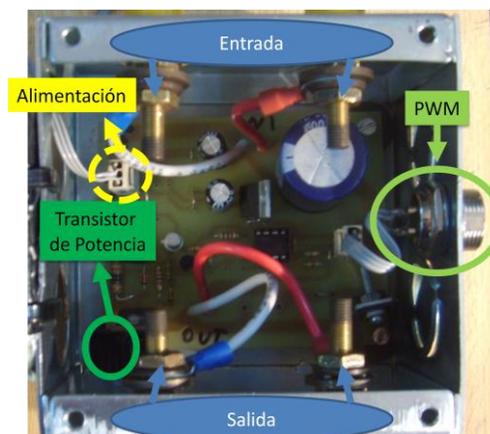


Figura 7.10: Componentes físicos del control de corriente de campo.

## 7.4 Puesta en marcha

Los distintos componentes de la CMH, ya sean relacionados con la reproducción del recurso hidráulico o con el control electrónico de ésta, fueron incorporados en distintos períodos de tiempo por lo que las pruebas realizadas al prototipo se realizaron de acuerdo con los elementos disponibles. En lo que sigue se muestran los distintos resultados obtenidos en las etapas de desarrollo del prototipo de la CMH.

### 7.4.1 Resultados preliminares

Las primeras pruebas realizadas corresponden al correcto funcionamiento de las conexiones hidráulicas del sistema, las que tienen como finalidad verificar la inexistencia de fugas o posibles filtraciones de agua además del correcto funcionamiento de la bomba centrífuga.

En un comienzo el prototipo contaba con una bomba centrífuga marca Jacuzzi modelo C3 DM 1<sup>1/2</sup>, con la cual se reproducía un recurso hidráulico que no era capaz de generar la potencia hidráulica en la turbina suficiente para el funcionamiento de la CMH. Por esta razón se adquirió la bomba Calpeda mencionada en los capítulos anteriores. Debido a este cambio de bomba centrífuga, fue necesario rediseñar las conexiones hidráulicas las que presentaron un óptimo resultado al ser completamente formadas por uniones de PVC, al contrario de las tenidas anteriormente que eran una mezcla entre mangueras de alta presión y tuberías de PVC.

Al operar la bomba centrífuga con las nuevas conexiones se verificó que es importante mantener el valor del caudal cercano al valor máximo entregado por su fabricante, ya que para valores mayores a este al interior de la bomba ocurre el fenómeno de la cavitación deteriorando su eje poniendo en riesgo su funcionamiento. Gracias al modelo hidráulico del sistema y a la lectura del manómetro es posible determinar la apertura máxima de la válvula para mantener a la bomba dentro de su rango de operación.

Obtenida la reproducción del recurso hidráulico, se realizaron las pruebas de funcionamiento al generador trifásico relacionadas con el funcionamiento de éste en condiciones nominales, tales como velocidad de giro, tensión y frecuencia generada nominal con carga y en vacío. De estas pruebas fue posible obtener 2 importantes fenómenos a considerar en la operación del generador:

- Cuando la bobina del campo del generador es alimentada en forma externa, operando desconectado de la red, y se varía el valor de la corriente de excitación, se observa que la máquina se acelera o frena dependiendo si el valor de la corriente se aumenta o disminuye

respectivamente, modificando el valor de la frecuencia. Esto se debe a que las ranuras donde está alojado el enrollado del estator no son despreciables en comparación al tamaño del rotor, razón por la cual el campo magnético del rotor se cierra a través de los espacios entre las ranuras del estator obteniéndose un efecto similar al de un motor stepper a pequeña escala generando una fuerza entre el rotor y estator.

- La tensión inducida en bornes del generador presenta un alto contenido armónico, pudiendo ocasionar errores en las mediciones del controlador general. Esta deformación en la forma sinusoidal de la tensión puede estar relacionada con el fenómeno antes mencionado.

#### 7.4.2 Programa monitoreo y control remoto

El programa desarrollado para monitorear y realizar el control remoto de la CMH fue implementado en base al software LabVIEW tratando de considerar las variables más importantes al momento de operar el sistema y verificar su correcto funcionamiento. En lo que sigue se mostrará el resultado final del programa desarrollado explicando la funcionalidad de cada componente y el tipo de interacción que se logra con el controlador general ubicado en la CMH.

La pantalla principal del programa en cuestión se observa en la Figura 7.11, el que se puede dividir en 2 sub-secciones: monitoreo y control.

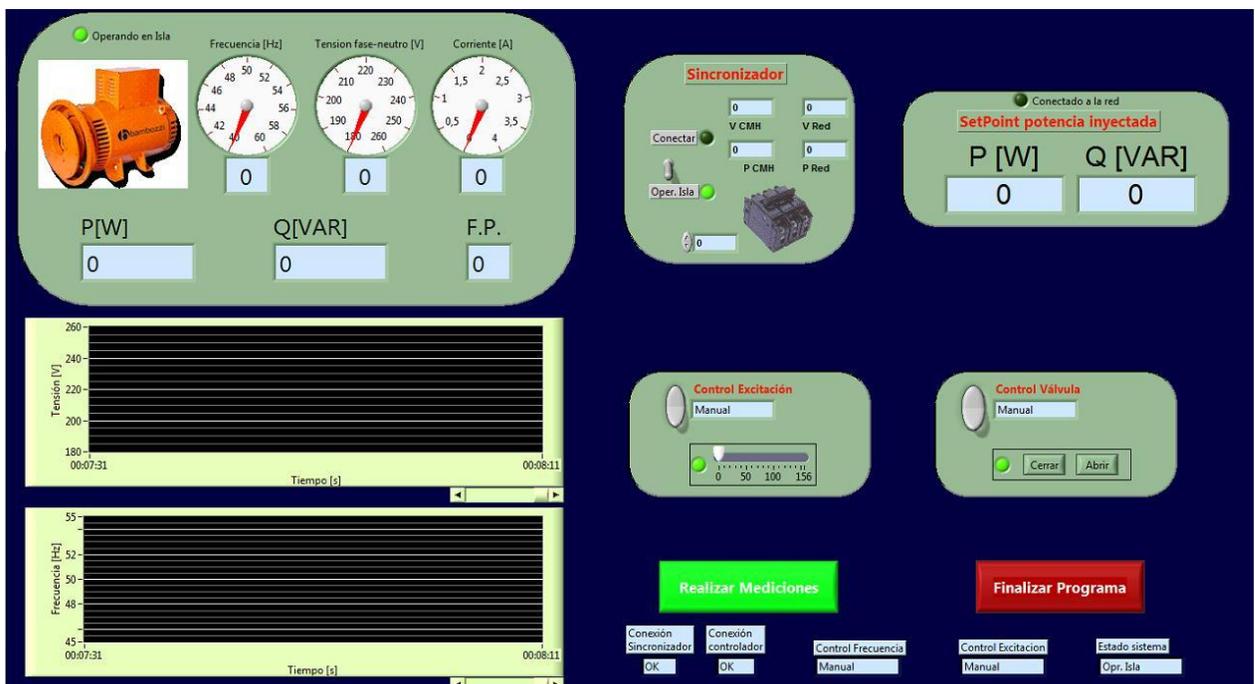


Figura 7.11: Interfaz de monitoreo y control de CMH.

**Monitoreo CMH:** Permiten observar los valores de las variables eléctricas en bornes del generador, correspondientes a la frecuencia, tensión fase-neutro, corriente de línea, potencia activa y reactiva y factor de potencia. Además se cuenta con 2 pantallas gráficas que permiten ver la evolución temporal de la tensión y frecuencia.

Un indicador sobre la figura del generador indica si está operando en modo aislado.

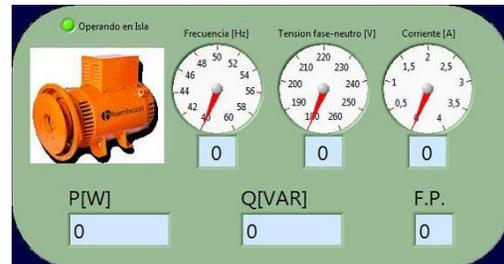


Figura 7.12: Variables eléctricas de generación

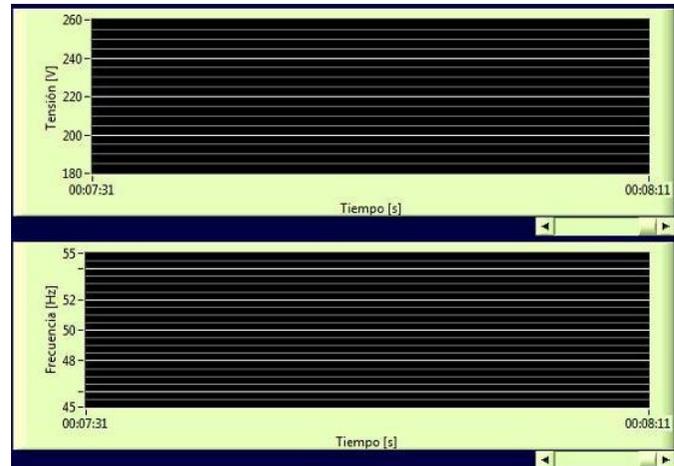


Figura 7.13: Evolución de tensión y frecuencia en el tiempo.

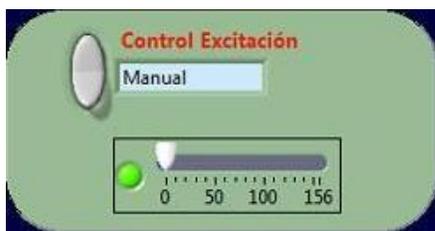


Figura 7.14: Control de excitación



Figura 7.15: Control posición válvula

**Control de excitación y posición de la válvula:** Permite decidir el comportamiento del controlador en relación al tipo de control sobre la excitación y posición de la válvula. Mediante un interruptor ubicado en ambos casos en la esquina superior izquierda se decide si el control es manual o automático. En caso de ser manual se enciende una luz verde indicando que se puede modificar desde el panel de control la variable.

En la Figura 7.14 se muestra el control de excitación y la barra de control manual para indicar la corriente de excitación.

En la Figura 7.15 se observan los botones que permiten modificar la posición de la válvula en el modo de control manual.

Para ambos casos, en el modo de control automático es el controlador general el encargado de llevar la frecuencia y tensión a valores nominales.

**Sincronizador:** Tal como su nombre lo indica, envía las señales para que la CMH se conecte a la red. En la Figura 7.16 se observan indicadores de la tensión a ambos lados del sincronizador (red y CMH) además del período. Además de enviar la señal de sincronización, se le indica al controlador general de la CMH que ahora debe controlar la potencia activa y reactiva, operando en modo conectado a la red.



Figura 7.16: Control modo de operación CMH

En la Figura 7.17 se observa el diagrama que permite configurar la referencia de potencia activa y reactiva que debe seguir la operación de la CMH operando conectado a la red. La activación del indicador verde en la parte superior de este bloque indica la activación de estas referencias.

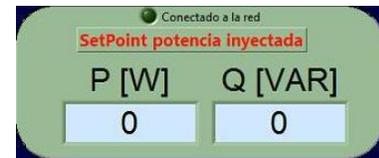


Figura 7.17: Setpoint de potencia activa y reactiva.

El valor máximo de potencia activa capaz de suministrar la CMH es cercana a los 2 kW cuando el recurso hidráulico simulado tiene una altura de 50 m.

**Indicadores de conexión:** Permiten verificar que la conexión entre el control remoto, el control general y el sincronizador fue llevada a cabo, además el control general envía señales de retorno con las indicaciones de control que recibió, permitiendo verificar la correcta comunicación (Figura 7.18).

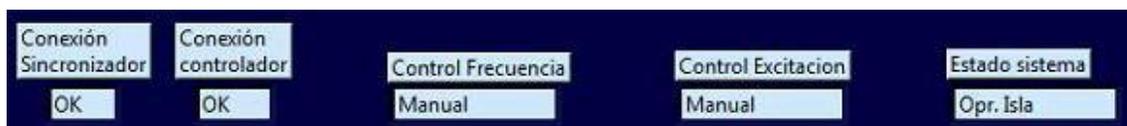


Figura 7.18: Indicadores del estado de conexión e información recibida.

**Recopilación mediciones:** Con el fin de poder obtener un registro del funcionamiento de la CMH, existe un botón que permite comenzar a registrar los valores obtenidos desde el controlador general, lo que permite tener datos de la operación del sistema frente a algún cambio de operación, cambio en la carga eléctrica, etc.



Figura 7.19: Botón Realizar mediciones

Al accionar el botón “Realizar mediciones”, se abre una interfaz secundaria que contiene los valores recibidos, mostrada en la Figura 7.20, además del botón que finaliza el registro de datos.

Es importante señalar que esta interfaz no realiza control alguno sobre la CMH, siendo tan solo una interfaz de recepción de datos.



Figura 7.20: Interfaz secundaria de medición

Al presionar el botón “Finalizar prueba” se abre un diálogo que permite escoger el lugar donde guardamos el archivo con los datos recopilados. El nombre elegido debe ser similar a “NOMBRE\_ARCHIVO.xls” con la finalidad de que al acceder a él sea EXCEL quien lo abra.

Las variables guardadas corresponden a la tensión, frecuencia, corriente, potencia activa, potencia reactiva y factor de potencia.

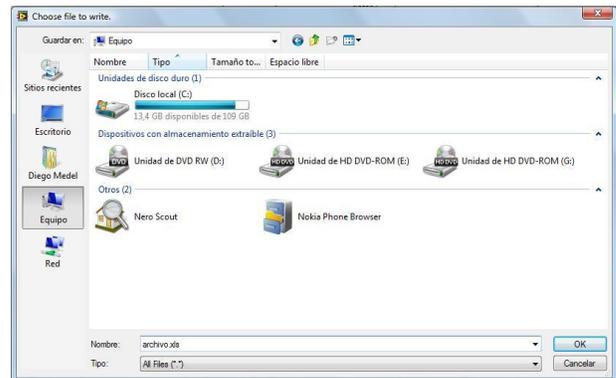


Figura 7.21: Diálogo para guardar archivo de salida.

### 7.4.3 Control frecuencia – tensión

En una primera instancia con tal de verificar el correcto funcionamiento del controlador, la señal proveniente desde el TP hacia el controlador general fue cambiada por un generador de señales, lo que permite alimentar al controlador con tensiones y frecuencias variables en torno al punto de operación nominal (220 V, 50 Hz).

Luego, mediante la activación del prototipo completo, se llevó en forma manual a la CMH a los valores nominales de generación y utilizando un arreglo de cargas resistivas, se procedió a la conexión y desconexión de éstas con el fin de observar el comportamiento del prototipo operando en modo aislado. La Figura 7.22 muestra el arreglo de cargas utilizado y el interruptor que permite la conexión o desconexión de carga.



*Figura 7.22: Cargas trifásicas*

Con el fin de regular la frecuencia se implementaron 4 algoritmos de comunicación distintos. El primero de ellos consiste en que la posición de la válvula es proporcional al ancho del pulso de la señal entregada por el control general, es decir si la señal PWM puede variar su ciclo de trabajo entre 500 y 2500  $\mu\text{s}$  y el valor recibido por el actuador corresponde a 1500  $\mu\text{s}$  entonces la válvula debe ser ubicada en la mitad de su recorrido. En otro caso en que la señal tenga un ancho de pulso de 500  $\mu\text{s}$  la válvula debe ser cerrada completamente. Bajo este sistema de comunicación entre el actuador y el control general, el algoritmo se basa en un control por histéresis, donde compara la frecuencia obtenida con la referencia y dependiendo de esto, incrementa o disminuye en un valor específico el ancho del pulso de salida. Uno de los principales problemas al utilizar este método fue la inestabilidad del pulso PWM ya que para posiciones continuas de la válvula, el ancho del pulso generado tenía valores traslapados lo que ocasionaba una oscilación de la posición y por consiguiente una inestabilidad del sistema.

El segundo método de comunicación implementado se basa en solo 3 valores de la señal PWM, en donde se le entrega el mayor ancho del pulso si es que es necesario abrir la válvula, en el caso contrario se genera el mínimo ancho del pulso y si la frecuencia es la nominal se genera una señal de pulso que se encuentra entre los valores límites. El algoritmo de control está igualmente basado en control por histéresis. Los resultados obtenidos con este esquema de control son satisfactorios cuando el sistema se encuentra alimentando cargas mayores a los 600 [W], pero comienza a mostrar resultados desfavorables si la carga disminuye o se encuentra en vacío. Lo anterior se debe a la variación del área de salida de la válvula en función de la posición, lo que se puede observar en la Figura 7.23.

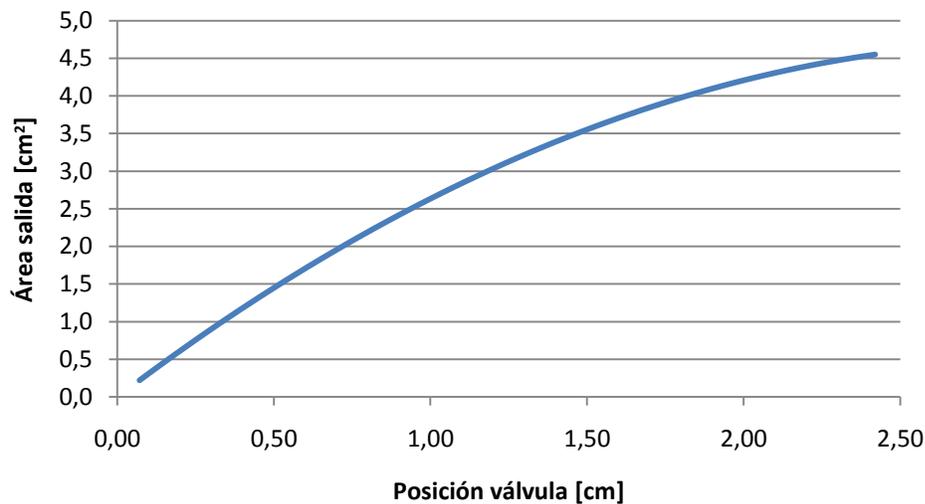


Figura 7.23: Área de salida en función de la posición de la válvula.

De la figura anterior se puede apreciar que la variación del área de salida de la válvula decrece en forma aproximadamente cuadrática con la posición de la válvula lo que se traduce que cuando el generador alimenta cargas pequeñas o se encuentra operando en vacío, la válvula se encuentra cercana a la posición cerrada o 0, por lo que pequeñas variaciones de la posición generan modificaciones considerables en el área de salida y por ende modificaciones grandes en la frecuencia generada. Con lo anterior la operación del sistema se vuelve inestable y sale de los rangos de operación aceptables dados por la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio para Sistemas Medianos cuando se opera sin carga.

Luego, se trató de implementar un control en donde la velocidad de apertura de la válvula dependa de la posición, con el fin de contrarrestar el efecto mostrado en la Figura 7.23. Lo buscado por este control era que cuando la posición de la válvula estuviese cercana a la mínima apertura, la velocidad fuese más lenta que cuando la válvula se encuentra más abierta. Sin embargo, el problema presentado al utilizar la velocidad proporcional a la posición es que cuando se encuentra en la zona cercana a la mínima apertura y el cambio de carga es muy grande (se conecta una carga considerable) la variación de frecuencia sale de la banda permitida por la norma técnica y muy prolongada, debido a la lentitud de la variación de la posición de la válvula para valores cercanos a la mínima apertura.

Finalmente se busca implementar un control por histéresis que trate de comportarse como un control PI, en donde la velocidad de movimiento de la válvula es proporcional al error de frecuencia encontrado, existiendo una banda muerta en la cual el control no opera o considera que se está en condiciones nominales de operación. Con el fin de realizar lo anterior primeramente se fijan 2 niveles o escalones de error de frecuencia permitidos, tal como se muestra en la Tabla 7.2.

Frecuencia generada [Hz]	Velocidad
$f \geq 52$	1
$52 > f \geq 50.8$	2
$49.2 \geq f > 48$	2
$48 \geq f$	1

Tabla 7.2: Control con 2 velocidades

Luego el orden en magnitud de las velocidades es 1 y 2 en orden descendente, es decir  $V_1 > V_2$ . Al observar que los resultados obtenidos no son los esperados, debido a inestabilidad en algunos puntos antes mencionados, se agregan mas velocidades utilizando el mismo algoritmo antes mencionado, tal como se muestra en la tabla 7.3.

Frecuencia generada [Hz]	Velocidad
$f \geq 52$	1
$52 > f \geq 51.5$	2
$51.5 > f \geq 51$	3
$51 > f \geq 50.5$	4
$49.5 \geq f > 49$	4
$49 \geq f > 48.5$	3
$48.5 \geq f > 48$	2
$48 \geq f$	1

Tabla 7.3: Control con 4 velocidades

Finalmente el control de frecuencia obtenido se comporta de manera aproximada a lo indicado por la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio para Sistemas Medianos en el artículo 3.6.

El algoritmo del control de tensión también se basa en un control por histéresis, pero debido a que los tiempos de variación de la tensión con la corriente de excitación son distintos comparados con los tiempos para la frecuencia y dado que la variación de la corriente de campo influye en la variación de la frecuencia, es que el control de tensión se realiza luego de cierta cantidad de ciclos para el cual la frecuencia se encuentre estable. Vale decir primero el controlador se asegura que la frecuencia se encuentra dentro del rango de operación una cantidad mínima de ciclos seguidos y después modifica la corriente de excitación, ya que de otra manera en algunos puntos el sistema se vuelve inestable. Al igual que la frecuencia, el control de tensión considera una banda muerta de  $\pm 10$  V.

Las figuras 7.24 y 7.25 muestran la respuesta en tensión y frecuencia para la toma de carga del último control implementado en la CMH. En estas figuras se puede apreciar la diferencia de la respuesta dependiendo de la variación de carga.

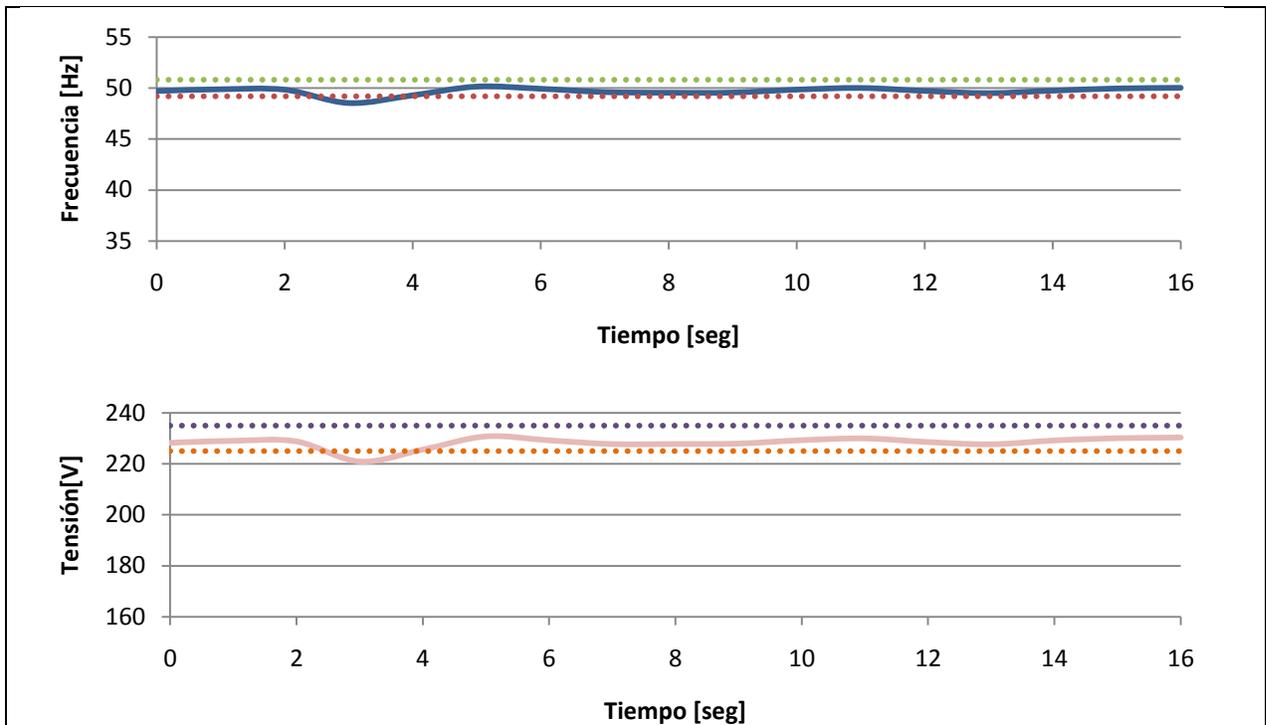


Figura 7.24: Respuesta en frecuencia y tensión para toma de carga de 120 [W]

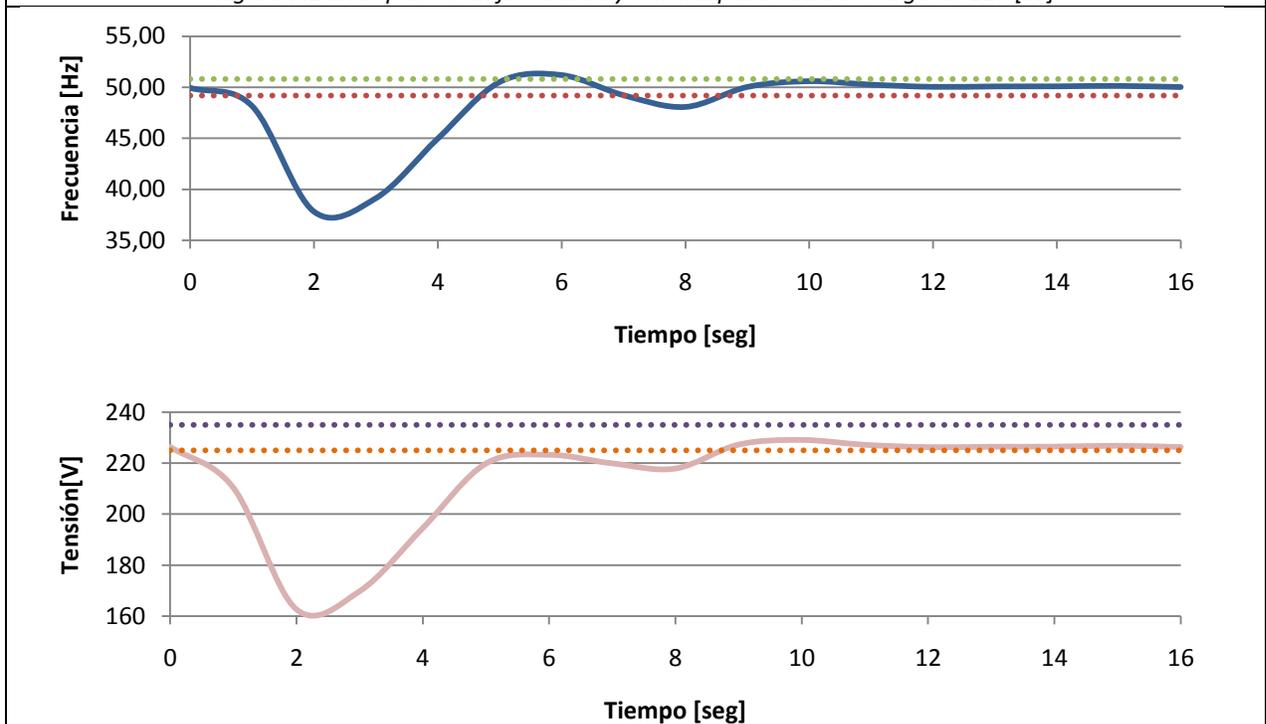


Figura 7.25: Respuesta en frecuencia y tensión para toma de carga de 720 [W]

Las figuras 7.26 y 7.27 muestran la respuesta en tensión y frecuencia para el rechazo de carga de la CMH. Al igual que en para la respuesta de la toma de carga, la variación de la frecuencia y tensión depende del tamaño de la carga que se desprende.

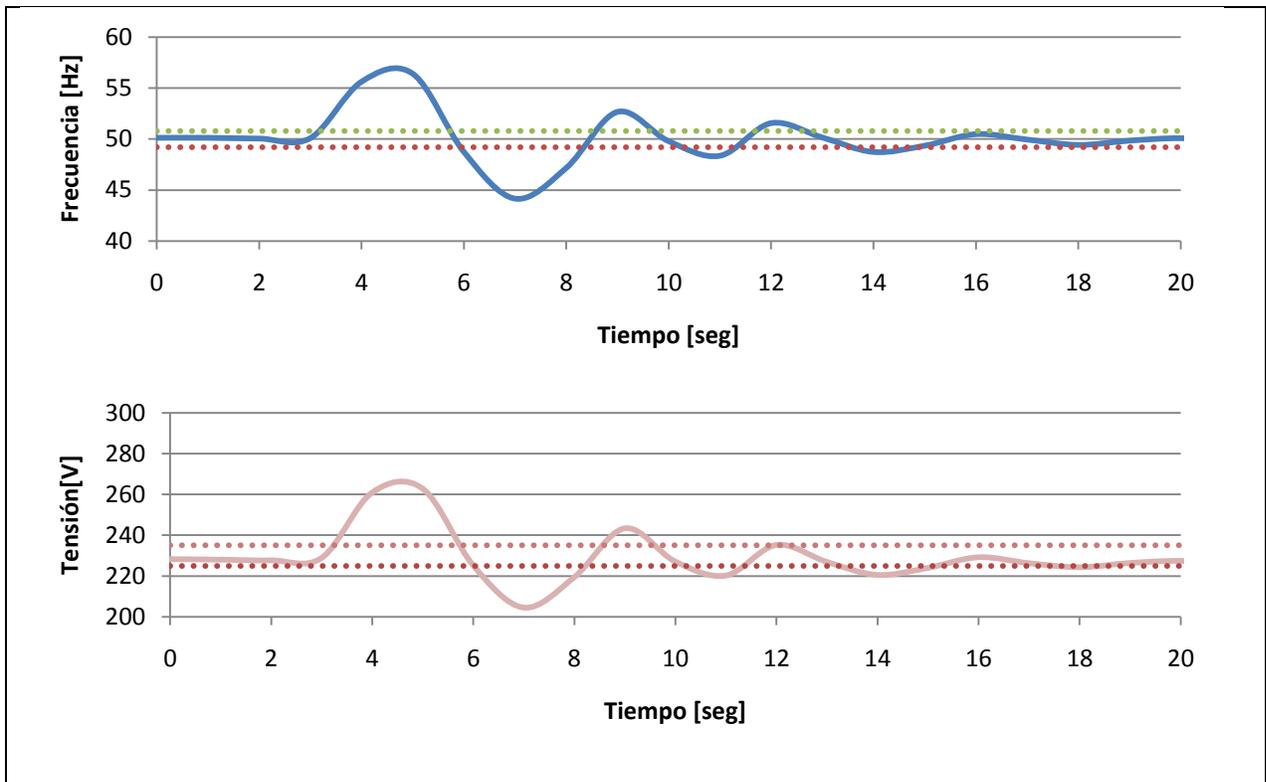


Figura 7.26: Respuesta en frecuencia y tensión para rechazo de carga de 420 [W]

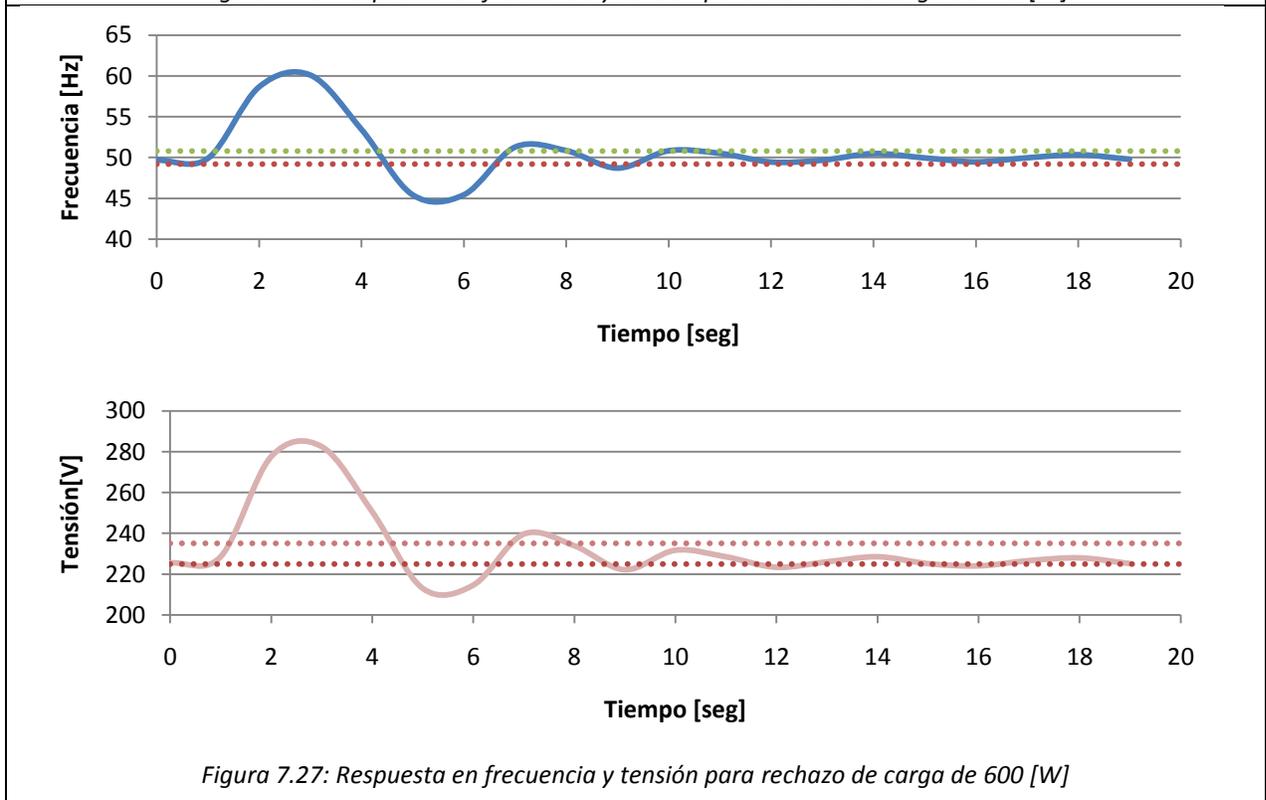


Figura 7.27: Respuesta en frecuencia y tensión para rechazo de carga de 600 [W]

De las figuras anteriores se puede apreciar el comportamiento del sistema frente a variaciones en la carga eléctrica conectada a la CMH, en donde se verifica que la frecuencia se mantiene dentro de rangos aceptables y durante tiempos cortos se sobrepasa los límites de operación normal para variaciones pequeñas de carga (Figura 7.24). La tensión también se mantiene dentro de los límites establecidos como aceptables en la programación del algoritmo de control. Sin embargo, para variaciones mayores la respuesta obtenida no es la deseada, escapando a lo establecido por la Norma Técnica de Exigencias de Seguridad y Calidad de servicio, en donde el rango aceptable de variación de frecuencia es de 49 - 51 Hz y la variación de tensión no puede sobrepasar los 10% de la tensión nominal.

Es importante recalcar que el generador, a pesar de poseer una capacidad de generación nominal de 3 kVA, lo máximo que se puede obtener desde el recurso hidráulico disponible son aproximadamente 2,2[kW]. Esto se debe al límite de corriente del motor de la bomba centrífuga que alimenta el recurso hidráulico y a la curva característica de esta.

#### **7.4.4 Comportamiento del prototipo en general**

Al momento de iniciar las pruebas con todos los elementos instalados, se observó un comportamiento inusual en el control de frecuencia, ya que la válvula no seguía la ubicación dada por el control general. Luego de tratar de encontrar el error que ocasionaba este comportamiento, se determinó que el variador de frecuencia utilizado para controlar la bomba centrífuga introduce un ruido electromagnético de alta frecuencia producido por la modulación inherente que posee en su funcionamiento. Tratando de encontrar una solución se buscaron referencias donde se hablara del tema, teniendo la mayoría como respuesta al problema la conexión de la tierra y pantalla de los cables de comunicación a una tierra común, con el fin de eliminar el ruido ocasionado. Sin embargo, a pesar de disminuir la interferencia en las señales de control, aún se obtenía un comportamiento erróneo. El variador de frecuencia utilizado permite seleccionar la frecuencia de corte de la modulación la que puede ser configurada entre 2 y 16 kHz, obteniendo evidentemente que para frecuencias menores la interferencia inducida en las señales de control disminuye en comparación para frecuencias cercanas a 16 kHz, pero genera un mayor “ruido acústico” en el funcionamiento de la bomba centrífuga.

El control remoto programado funciona perfectamente, permitiendo configurar el control de la posición de la válvula y corriente de excitación entre el modo manual y automático, además de la operación del sistema en los modos conectado y aislado de la red. Existe un retardo entre el tiempo en el que el usuario ejecuta una acción en la pantalla y el tiempo que el control la ejecuta, relacionada con un retardo agregado a la programación del control remoto de manera que se asegure la correcta transmisión de datos entre los controladores. Por esto mismo es que la actualización de las variables desplegadas en los visores implementados para el monitoreo de la CMH no es en tiempo real, sino que con el mismo retardo explicado anteriormente.

La sincronización de la CMH con la red eléctrica se logra satisfactoriamente, en donde se verifica que el tiempo entre que el sincronizador recibe la señal de conectarse a la red y éste cambia su estado a “conectado a la red” es alrededor de 4 seg en promedio.

Con la CMH operando conectada a la red, se obtiene la potencia eléctrica total entregada por la CMH y a través de la medición de apertura de la válvula, utilizando el modelo de estimación de caudal (Anexo B) , es posible obtener la potencia hidráulica entrando a la turbina. Con esto se determina la eficiencia del conjunto turbina-generator mostrada en la figura 7.28

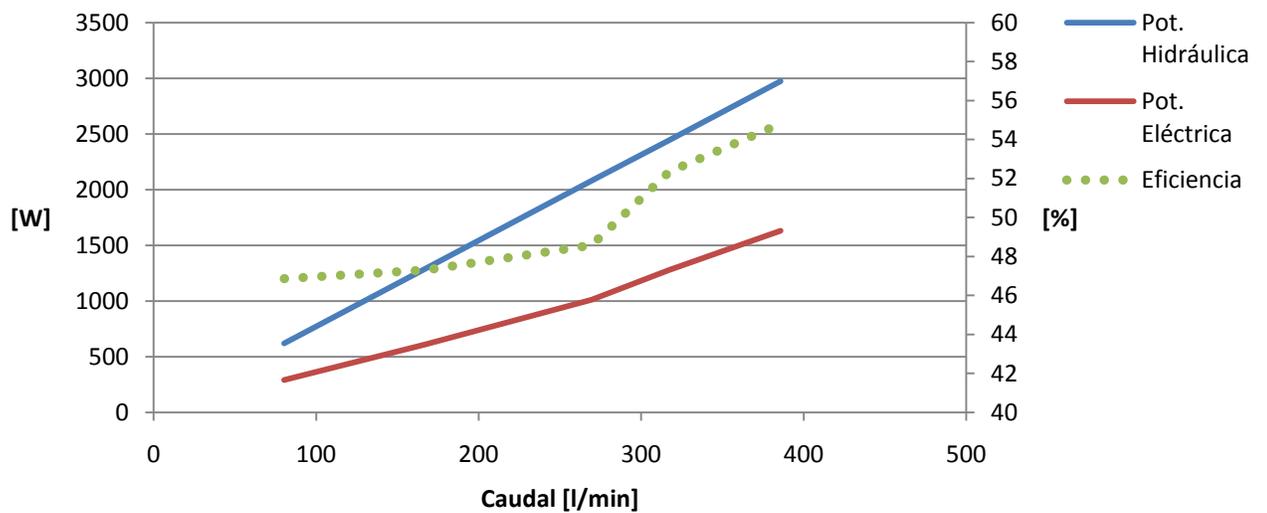


Figura 7.28: Inyección de potencia a la red y la eficiencia respectiva turbina-generator.

## Conclusiones

En relación al objetivo general planteado, se obtiene como resultado un prototipo a escala de una CMH con los controles asociados, convirtiéndose en una herramienta de simulación y pruebas para el comportamiento de este tipo de centrales apoyando de manera experimental la docencia del DIE de la Universidad de Chile.

La revisión del estado del arte permite verificar la relevancia que está adquiriendo con el desarrollo de la tecnología la GD y la alta penetración que tienen en ella las CMH. Además se agregan las tecnologías utilizadas como CMH y los componentes que forman parte de un proyecto de este tipo, permitiendo comprender de mejor manera su funcionamiento.

El prototipo desarrollado contempla dos partes importantes para su correcto funcionamiento: La reproducción de una caída natural de agua utilizando una bomba centrífuga, y el sistema de control y monitoreo de la central hidroeléctrica con las variables eléctricas relacionadas.

La reproducción de una caída natural de agua se obtiene de manera satisfactoria gracias a la realimentación de la presión de la tubería hacia un variador de frecuencia que actúa sobre la velocidad de giro de la bomba centrífuga manteniendo la presión constante. Lo anterior permite que al cerrar la válvula el agua ingrese a la turbina con menor velocidad y en el caso contrario, si la válvula se abre, el agua ingresa con mayor velocidad logrando la acción requerida por el controlador al realizar este movimiento. Si no se tiene el control sobre la velocidad de giro de la bomba, se obtiene un comportamiento en el sentido contrario, por lo que resulta de gran importancia la implementación de este lazo de control. Además este control permite simular recursos hidráulicos de distintas alturas, transformándose en una herramienta importante dentro del prototipo al momento de querer comparar la generación obtenida por distintos recursos naturales.

El comportamiento de la bomba centrífuga mencionado anteriormente, está relacionado con la curva característica de ésta, además del funcionamiento particular del motor de inducción que entrega la potencia mecánica a la turbina. Esto se debe a que al tratarse de un motor de inducción existe un deslizamiento asociado, el cual se ve alterado al modificar la carga mecánica, equivalente a modificar el caudal del recurso hidráulico simulado. Es por esto que al aumentar el caudal, la potencia mecánica que necesita realizar el motor es mayor, con lo que aumenta el deslizamiento provocando una disminución

en la velocidad de giro y por ende una presión simulada menor. En el caso de disminuir el caudal, se obtiene el efecto contrario, provocando un aumento en la altura equivalente del recurso hidráulico. Con esto se demuestra la necesidad de utilizar un control sobre la velocidad de giro de la bomba centrífuga, de manera de mantener la presión constante.

Por el lado de control sobre la generación eléctrica, si bien el diseño del hardware de control no fue desarrollado en el trabajo de esta memoria, su implementación en el prototipo y elaboración del algoritmo de control se llevaron a cabo de manera satisfactoria, siendo validada su operación en el laboratorio.

Los resultados obtenidos para el control en modo aislado representan comportamientos aceptables para ciertos puntos de operación correspondientes a pequeñas variaciones de carga (menores a 500W trifásicos). Sin embargo, cuando la variación de carga es mayor al 75% de la potencia máxima entregada por la CMH, la variación de tensión y frecuencia escapan a lo dictaminado por la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio para sistemas medianos. Esto es porque la variación de la velocidad de giro del conjunto turbina-generador es muy elevada, debido a la poca inercia que tienen estos elementos. Una posible solución a este problema es agregar un volante de inercia al eje, lo que no fue realizado ya que escapaba a los objetivos principales y a problemas con el tiempo para desarrollar el trabajo.

Al momento de diseñar el algoritmo de control de frecuencia de la CMH se verificó la importancia de poder contar con una velocidad variable en el movimiento de la válvula, pues la variación del área de salida de ésta tiene un comportamiento cuadrático respecto a su posición, por lo que cuando la válvula está aproximadamente cerrada, la variación de frecuencia obtenida al variar la misma cantidad su posición que cuando se está en el otro extremo es mucho mayor, provocando cierta inestabilidad en esta zona.

El algoritmo de control de frecuencia implementado con el que se obtuvo mejores resultados presenta distintas velocidades de variación de la posición de la válvula proporcionales al error de frecuencia existente. Sin embargo, al no tener una realimentación de la posición de la válvula, la zona de menor área de salida de la válvula provoca errores que no se tienen cuando ésta se encuentra en posiciones de mayor apertura.

En la parte final de este documento, se adjunta el manual correspondiente al funcionamiento de la CMH indicando la funcionalidad de sus componentes, las conexiones existentes entre ellas y las posibles pruebas a realizar en el prototipo.

La interfaz gráfica del sistema de monitoreo y control remoto se realizó en el programa LabVIEW, en donde se tiene la opción de modificar la operación de la CMH y verificar su correcto funcionamiento de manera remota gracias a la utilización de un módulo ZigBee el que permite realizar una comunicación

inalámbrica entre los componentes. Este sistema fue completamente validado en el laboratorio, verificando que existe un radio de control aproximado de 300 m, distancia suficiente para ubicar un operador del sistema. Además las indicaciones que el operador puede modificar en la interfaz se ven reflejadas de manera satisfactoria en la operación de la CMH.

Las señales de comunicación existente entre el controlador general y los actuadores se vieron fuertemente afectadas por el ruido electromagnético generado por el variador de frecuencia, provocando que en ocasiones la operación de la CMH fuera inestable o simplemente el control no actuara sobre las variables. Con la finalidad de mitigar los efectos que ocasiona el ruido electromagnético, la frecuencia de modulación utilizada en el variador de frecuencia fue configurada en su valor mínimo (2 kHz) disminuyendo la interferencia ocasionada en las señales de control. Esto se corroboró al comparar las señales a través de un osciloscopio.

La sincronización de la CMH con la red eléctrica se llevó a cabo satisfactoriamente, obteniéndose que el tiempo en que se logra la conexión con la red es acorde a lo esperado, cercano a los 5 segundos. Sin embargo, al momento de realizar la sincronización se pudo concluir que es necesario tener algún tipo de comunicación entre el control de la CMH y el sincronizador, de manera que éste último le indique a la CMH si debe aumentar o disminuir su nivel de tensión de acuerdo a las posibles variaciones que puede tener la red eléctrica. Lo anterior se debe a que puede ocurrir que una CMH operando como GD se conecte en algún lugar con mala regulación de tensión, posibilitando diferencias entre el nivel programado en el control y la tensión de la red.

La eficiencia calculada para el conjunto turbina-generador varía dependiendo del caudal utilizado, manteniendo la altura constante, obteniéndose que para caudales mayores la eficiencia aumenta en comparación a la utilización de caudales pequeños. Esto posiblemente ocurre ya que el diseño de la turbina está realizado para caudales grandes, y por ende la eficiencia de ésta aumenta cuando el punto de operación se encuentra más cercano a sus valores nominales. Lo anterior no es posible de corroborar en forma teórica ya que no se tiene un modelo acabado de la turbina y por la antigüedad que posee se desconocen los datos de placa de ésta.

Debido al comportamiento mostrado por la CMH y a la modificación en su forma de operación gracias al sistema de monitoreo y control remoto, este sistema representa una fuerte herramienta docente ya que permite observar el funcionamiento a escala de una central real, además de realizar pruebas en su funcionamiento y los efectos que se tiene al variar la carga eléctrica conectada a ella. Otro punto importante es la posibilidad que al momento de realizar las pruebas la variación obtenida en el funcionamiento de la CMH puede ser registrada para su posterior análisis en un archivo de Excel.

Dentro de los trabajos futuros se encuentran:

- Perfeccionamiento sistema de control. Una de las opciones para mejorar la respuesta de la CMH ante variaciones en su carga eléctrica es agregar más inteligencia a los actuadores y que puedan enviar información hacia el controlador o entre ellos, permitiendo un conjunto modular de control más inteligente.
- Rectificación de tensión generada para alimentar control de excitación. La necesidad de alimentar en forma externa el chopper utilizado para controlar la corriente de campo crea un problema debido a los altos niveles de corriente necesarios para realizar la excitación correcta. Lo anterior puede ser solucionado utilizando el segundo enrollado de armadura que tiene el generador, desde donde se obtiene una tensión que puede ser rectificada para obtener la alimentación correspondiente del convertidor.
- Realimentar posición de la válvula al control. Con el fin de que la velocidad con la que la válvula modifica el área de salida sea proporcional a su posición, es necesario que el control tenga alguna referencia de ésta, lo que puede ser solucionado acoplado un potenciómetro al eje de la válvula y realimentando la tensión modificada al controlador.
- Realimentar medición de presión. La medición de presión entregada por el manómetro, en conjunto con la posición de la válvula permiten obtener una medición aproximada del recurso hidráulico utilizado, por lo que resulta importante contar con dicho valor dentro de las mediciones obtenidas por el controlador de manera de estimar la potencia máxima disponible en el sistema.
- Realizar un modelo detallado del conjunto turbina generador, de manera de poder estimar con mayor precisión el comportamiento que tiene la CMH.
- Realizar mediciones en las 3 fases del generador trifásico. Las mediciones que entrega el TP y TC son medidas en una sola fase, lo que ocasiona posibles desbalances entre las tensiones generadas. Una posible solución a este problema es agregar una medición correspondiente a cada fase y entregar como señal de medida un promedio de las tres, tratando de que sean equivalentes.
- Mejorar acople mecánico del generador trifásico. Las vibraciones físicas que tiene el generador trifásico se ven reflejadas en el comportamiento de las variables eléctricas, por lo que sería de gran importancia contar con una mejor base para éste.

# Referencias.

- [1] H.L. Willis y W G Scott. *"Distributed Power Generation. Planning and Evaluation"*. Estados Unidos, Marcel Dekker, Inc, 2000.
- [2] R. MacGregor F. C. Lambert y H.B. Püttgen *"Distributed Generation: Semantic Hype or the Dawn of a New Era?"* IEEE Power & Energy Magazine Enero/Febrero 2003 p22-29.
- [3] P. Chiradeja *"Benefit of Distributed Generation: A Line Loss Reduction Analysis"*, 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific Dalian, China.
- [4] J.L. Cerda *"Integración de unidades de generación distribuida en un modelo de Mercado de adquisición de energía de una empresa distribuidora"*, Universidad de Chile, 2002
- [5] K. Jarami, *"Análisis de Mecanismos de Coordinación de Generadores Distribuidos en Sistemas Eléctricos"*, Universidad de Chile, 2006
- [6] P. Mendoza, *"Control Electrónico de una Central Micro-Hidráulica para su aplicación en Generación Distribuida"*, Universidad de Chile, 2007
- [7] W. Brokering, R. Palma B. y L. Vargas, *"Los Sistemas Eléctricos de Potencia"*, Santiago de Chile, Prentice Hall - Pearson Educación, 2008.
- [8] *"Manual de Pequeña Hidráulica - Como llevar a buen fin un proyecto mini central hidroeléctrica"*. Dirección General de Energía (DG XVII). Comisión Europea. 1998.
- [9] D. Muguerza *"Micro Centrales Hidroeléctricas"*, Curso de microturbinas hidroeléctricas. <http://exa.unne.edu.ar/depar/areas/fisica/maestria/modulo2/microturbinas/apuntemch.pdf>
- [10] G. Neidhofer. *"The evolution of the synchronous machine"*. Engineering Science and education journal, ABB Power Generation Ltd., Birr, October 1992
- [11] U.Chile Oficina de Publicaciones Docentes, DIE. *"Máquinas Sincrónicas"*. Publicación C/5, (38).

- [12] G. Masters, "Renewable and efficient electric power system", 2004, Wiley-Interscience. Cap 4.
- [13] Comisión Nacional de Energía. "Energía Hídrica".  
[http://www.cne.cl/fuentes\\_energeticas/e\\_renovables/hidrica.php](http://www.cne.cl/fuentes_energeticas/e_renovables/hidrica.php)
- [14] Sitio de Solarco, "Energía Micro hidráulica"  
<http://www.solarco.cl/microhidraulica.htm>
- [15] T. Sakurai, H. Funato, S. Ogasawara. "Fundamental characteristics of test facility for micro hydroelectric power generation system". 2009. Power Electronics and Motion Control Conference. IPEMC '09. IEEE 6th International.
- [16] O. Audisio, "Pequeñas centrales hidráulicas: Bombas utilizadas como turbinas", Universidad Nacional del Comahue, Argentina.  
[http://www.cedecap.org.pe/uploads/biblioteca/50bib\\_arch.pdf](http://www.cedecap.org.pe/uploads/biblioteca/50bib_arch.pdf)
- [17] Sitio de Miliarium , "Calculo de pérdidas de carga en tuberías"  
<http://www.miliarium.com/prontuario/MedioAmbiente/Aguas/PerdidaCarga.htm>
- [18] P. Fernandez, "Bombas centrífugas y volumétricas", Universidad de Cantabria. Cap. 1 y 5.
- [19] Variador de frecuencia Altivar 71, "Overwiev of Altivar 71 – ATV 71". [http://www.schneider-electric.com/sites/corporate/en/products-services/automation-control/products-offer/range-presentation.page?c\\_filepath=/templatedata/Offer\\_Presentation/3\\_Range\\_Datasheet/data/en/shared/automation\\_and\\_control/altivar\\_71.xml](http://www.schneider-electric.com/sites/corporate/en/products-services/automation-control/products-offer/range-presentation.page?c_filepath=/templatedata/Offer_Presentation/3_Range_Datasheet/data/en/shared/automation_and_control/altivar_71.xml)
- [20] Microship. "PIC18F2480 Reference Manual". <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39637a.pdf>
- [21] Microship. "PIC16F628a Reference Manual". <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40044F.pdf>
- [22] Analog Devices, "(AD736) True RMS-to-DC converter Reference Manual".  
[http://www.analog.com/static/imported-files/Data\\_Sheets/AD736.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/Data_Sheets/AD736.pdf)

- [23] Decelectronics , “Datasheet modulo RF version OEM XBee”  
<http://www.decelectronics.com/html/XBEE/XBEE.pdf>
- [24] National Instrument, LabView. <http://www.ni.com/labview/esa/>
- [25] “General purpose industrial pressure transducer and transmitter”.  
<http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/002f/0900766b8002fb2e.pdf>
- [26] Gems Sensors, “Universal industrial pressure transducers specifications”.  
<http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/066c/0900766b8066cbc0.pdf>
- [27] R. Palma, G. Jiménez, I. Alarcón. “Las energías renovables no convencionales en el mercado eléctrico chileno”.2009. Proyecto energías renovables no convencionales (CNE/GTZ).  
<http://gtz.de/de/dokumente/sp-ERNC-mercado-electrico-chileno.pdf>
- [28] National semiconductor, “(LM311) Voltage comparator Reference Manual”.  
<http://www.national.com/ds/LM/LM111.pdf>
- [29] M. Vargas, “Sistema de monitoreo y control remoto para una central micro hidráulica”,  
Universidad de Chile, Agosto 2008.
- [30] Electric Machinery Committee of the IEEE Power Engineering Society. IEEE Std115-1995, IEEE  
Guide: *Test Procedures for Synchronous Machines*, July 1996.

# Anexo A

## Datos de placa bomba centrífuga

La bomba utilizada corresponde a una bomba de acero inoxidable normalizada Calpeda modelo DZA 50-32-200/5.5 serie DZ/INOX, adquirida a Bombas Diana quienes son los representantes nacionales de Calpeda. Los datos que presenta este modelo son los siguientes:

Q (caudal)		H (altura)
[l/min]	[m <sup>3</sup> /h]	[m]
50	3	57,7
100	6	57,5
150	9	56,2
200	12	55,9
250	15	55,3
300	18	55

Velocidad nominal	2900 [rpm]
-------------------	------------

Tabla A.1: Datos de placa bomba centrífuga

## Curva característica

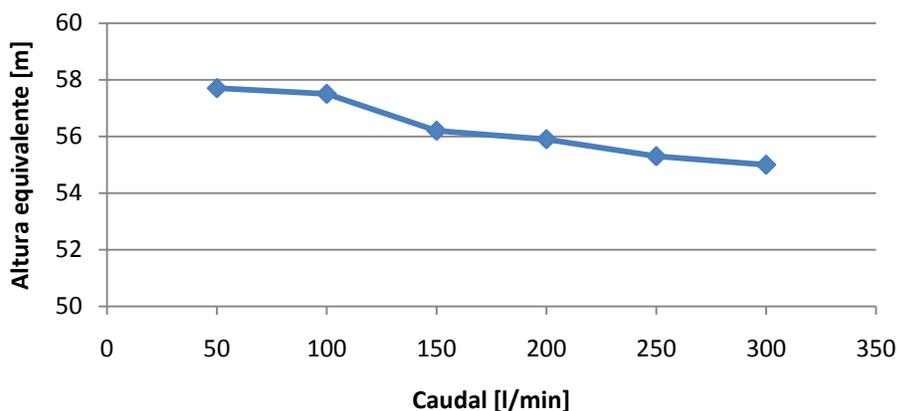


Figura A.1: Curva característica bomba centrífuga

La bomba centrífuga es alimentada mecánicamente por un motor de inducción trifásico Imatesa de 2 polos. Los datos de placa del motor son los siguientes.

Datos de placa			
modelo	tipoY132S1-2	Eficiencia (%)	85,5
Potencia nominal	7,5 [HP]	Factor de Potencia	0,88
	5,5 [kW]	Torque de partida/Torque nominal	2
Corriente nominal	11,1 [A]	Corriente de partida/Corriente nominal	7
Velocidad	2900 [rpm]	Max. Torque salida/ Torque nominal	2,3

Tabla A.2: Valores nominales motor de inducción bomba centrífuga.

# Anexo B

## Cálculo área de salida y estimación del caudal.

El área de salida de la válvula aguja se puede representar por la siguiente figura.

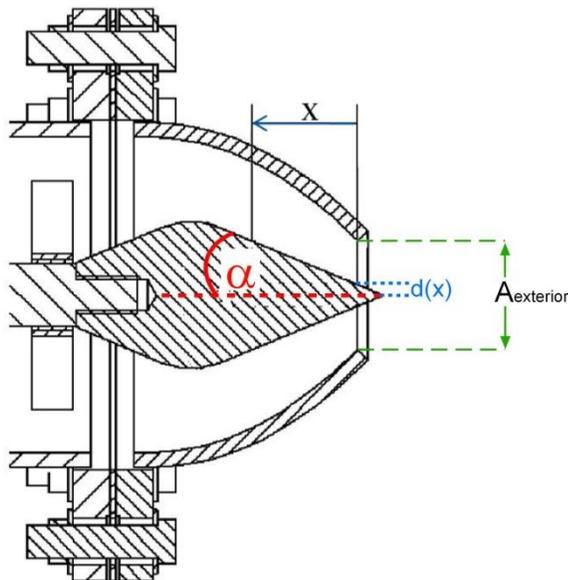


Figura B.1: Diagrama de válvula aguja.

Al realizar un corte transversal en el punzón justo en el área que se encuentra circunscrita en el área de salida, se puede observar un círculo, el que posee radio  $d(x)$  como se indica en la figura anterior, donde  $x$  corresponde a la posición horizontal del punzón.

Se puede apreciar que el área de salida corresponde a  $A_{salida} = A_{exterior} - \pi * d(x)^2$  (B.1), por lo que si de alguna manera se puede encontrar  $d(x)$  se obtiene el área de salida.

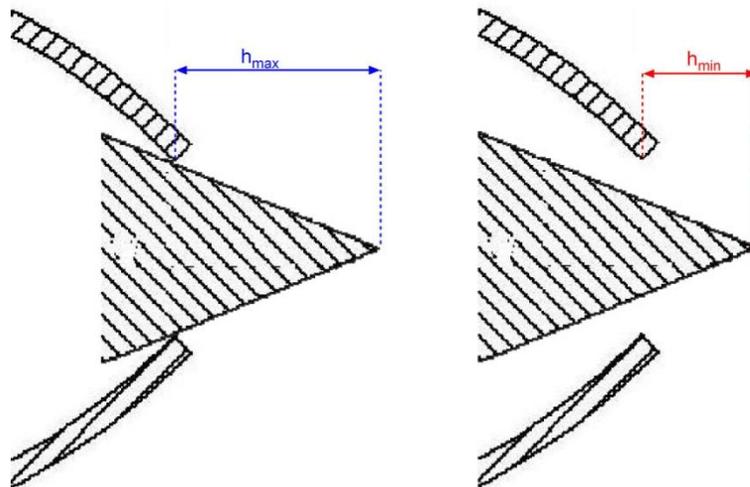


Figura B.2: Posición del punzón ante la apertura mínima y máxima de la válvula respectivamente.

Luego, tal como se muestra en la figura anterior cuando se encuentra la válvula completamente cerrada ( $X=0$ ), la punta del punzón sobresale lo máximo de la tobera, y para  $X=X_{max}$  se tiene el caso

contrario, es decir la menor distancia entre la punta del punzón y el área transversal de salida. Con esto se puede determinar la distancia total que recorre el punzón  $\Delta h = h_{max} - h_{min}$ . (B.2)

La punta del punzón posee un ángulo interior  $\alpha = 22.34^\circ$ , y sabiendo que  $\tan(\alpha) = d(x)/P$  donde P corresponde a la punta del punzón fuera de la tobera se tiene que:

$$d(x) = \tan(\alpha) * (h_{max} - x) \quad (B.3)$$

Finalmente, el área de salida del agua se puede determinar utilizando la expresión anterior, considerando que  $x \in [0, 2.42] \text{cm}$  correspondientes al rango de movimiento horizontal del punzón de la válvula. Además, el eje de la válvula solidario al punzón realiza 17 vueltas para poder desplazarse por completo, por lo que también es posible determinar el área de salida dependiendo de la cantidad de vueltas realizadas por el eje. La siguiente tabla muestra estos resultados.

Vueltas de la válvula	Posición válvula [cm]	Área salida [cm <sup>2</sup> ]	Vueltas de la válvula	Posición válvula [cm]	Área salida [cm <sup>2</sup> ]
0,5	0,07	0,22	9	1,28	3,18
1	0,14	0,44	9,5	1,35	3,31
1,5	0,21	0,65	10	1,42	3,43
2	0,28	0,86	10,5	1,49	3,54
2,5	0,36	1,06	11	1,57	3,65
3	0,43	1,25	11,5	1,64	3,76
3,5	0,50	1,44	12	1,71	3,86
4	0,57	1,63	12,5	1,78	3,95
4,5	0,64	1,81	13	1,85	4,04
5	0,71	1,98	13,5	1,92	4,12
5,5	0,78	2,15	14	1,99	4,20
6	0,85	2,32	14,5	2,06	4,27
6,5	0,93	2,47	15	2,14	4,34
7	1,00	2,63	15,5	2,21	4,40
7,5	1,07	2,77	16	2,28	4,45
8	1,14	2,91	16,5	2,35	4,50
8,5	1,21	3,05	17	2,42	4,55

Tabla B.1: Área de salida en función de la posición y cantidad de vueltas de la válvula.

Luego, utilizando las fórmulas enunciadas en la sección 6.1 se tiene que

$$V_{val}^2 = \frac{P_{man} - P_{ATM} + \rho g \Delta h}{\frac{1}{2} \rho \left( 1 - \left( \frac{A_{val}}{A_{man}} \right)^2 \right)} \quad (B.4) \quad Q = cte = A_{man} * V_{man} = A_{val} * V_{val} \quad (B.5)$$

El valor de la presión entregado por el manómetro es calculado tomando como referencia la presión atmosférica, por lo que el término  $P_{man} - P_{ATM}$  en realidad corresponde solamente a  $P_{man}$ .

Luego con la posición de la válvula y la presión del manómetro es posible aproximar el caudal generado por el sistema hidráulico.

En un comienzo el prototipo contenía una bomba centrífuga más pequeña, con la cual fue validado el modelo hidráulico. La siguiente figura muestra la curva entregada por los fabricantes de la bomba y los valores obtenidos utilizando el modelo anterior.

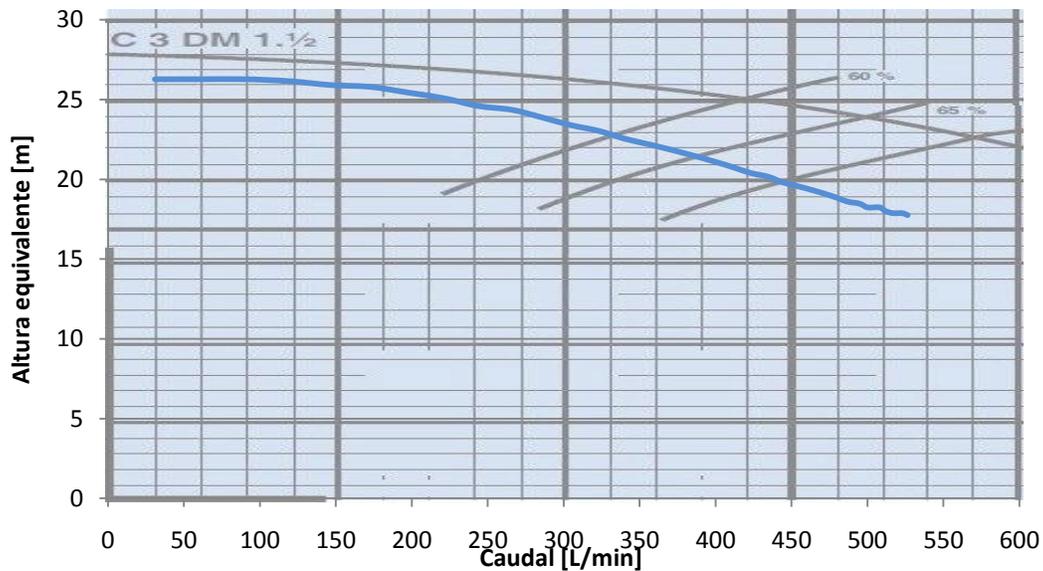


Figura B.3: Curva característica bomba centrífuga – validación modelo hidráulico

Dado el tiempo de uso de las bombas y el desgaste de los álabes del rotor, se produce una disminución en los valores obtenidos en comparación con la curva teórica. Sin embargo, el comportamiento es similar y se verifica la correcta aproximación del modelo hidráulico al funcionamiento real de la bomba.

# Anexo C

## Datos de pruebas al generador y parámetros obtenidos

### Característica de cortocircuito

Corriente de campo [A]	Corriente de armadura [A]
0	0,126
0,514	0,734
1,03	1,496
1,51	2,216
2,02	3,011
2,5	3,765
2,99	4,514

### Curva de excitación en vacío

Corriente de campo [A]	Tensión en bornes [V]	Tensión sin saturación [V]
0	6,8	0,0
0,29	42,7	46,7
0,52	82,7	83,7
0,766	125,5	123,3
1,04	154,9	167,4
1,32	174,1	212,5
1,52	186,2	244,7
1,8	197,7	289,7
2,06	205,3	331,6
2,34	213,7	376,6
2,53	218,7	407,2
2,73	223,5	439,4
3	228,3	482,9
3,2	231,9	515,1
3,51	235,6	565,0
3,73	237,7	600,4
4	241,5	643,8
4,23	243,5	680,9
4,51	246,1	725,9
4,74	249,3	763,0
5,04	251,3	811,2

### C.1 Parámetro $X_s$

Corriente de campo [A]	Tensión en bornes [V]	Tensión no saturada [V]	Corriente CC [A]
1,52	186,2	244,66	2,26
$X_s$ (no sat)		$X_s$	
[ $\Omega$ ]	[p.u.]	[ $\Omega$ ]	[p.u.]
108,16	2,24	82,31	1,71

Corriente de campo [A]	Tensión en bornes [V]	Tensión no saturada [V]	Corriente CC [A]
3	228,29	482,88	4,46
$X_s$ (no sat)		$X_s$	
[ $\Omega$ ]	[p.u.]	[ $\Omega$ ]	[p.u.]
108,16	2,24	51,13	1,06

### C.2 Parámetro $X_d$ y $X_q$

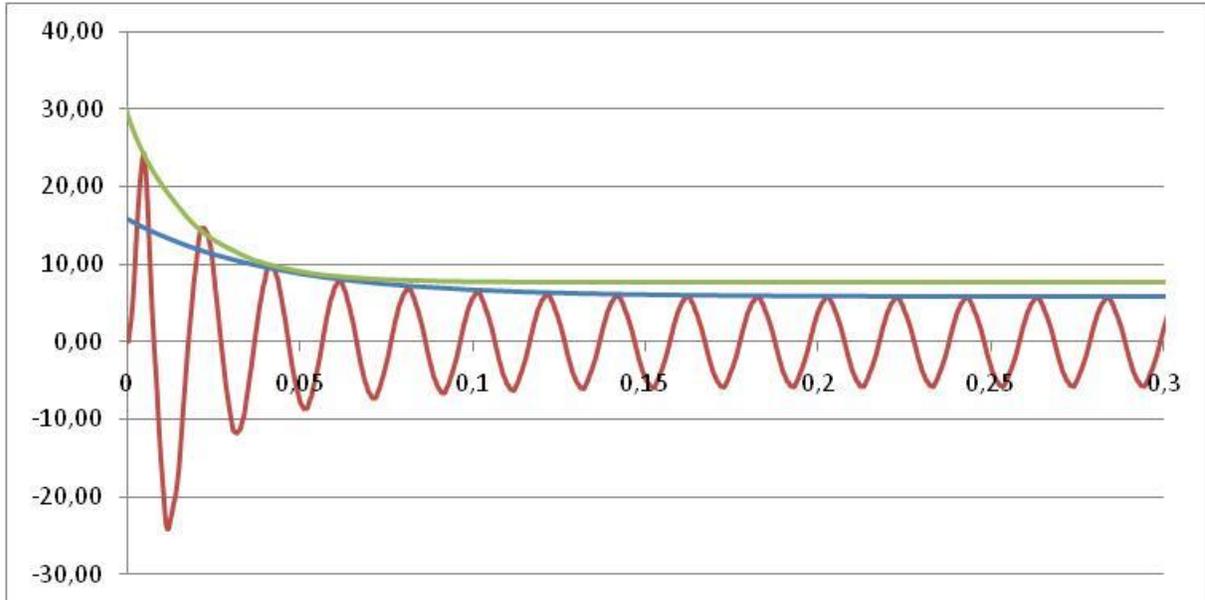
#### Prueba de deslizamiento

Tensión máxima de armadura	251,67 [V]
Tensión mínima de armadura	245,32 [V]
Corriente máxima de armadura	4,77 [A]
Corriente mínima de armadura	2,57 [A]

	[ $\Omega$ ]	[p.u.]
$X_d$	97,92	2,03
$X_q$	51,43	1,07
$X_q/X_d$	0,53	

	[ $\Omega$ ]	[p.u.]
$X_d$ ( $X_s$ no saturado)	2,24	108,1575
$X_q$	1,18	56,803

## Respuesta al cortocircuito abrupto



### C.3 Parámetro $X'_d$ y $X''_d$

Tensión de armadura antes de la falla 375,5 [V].

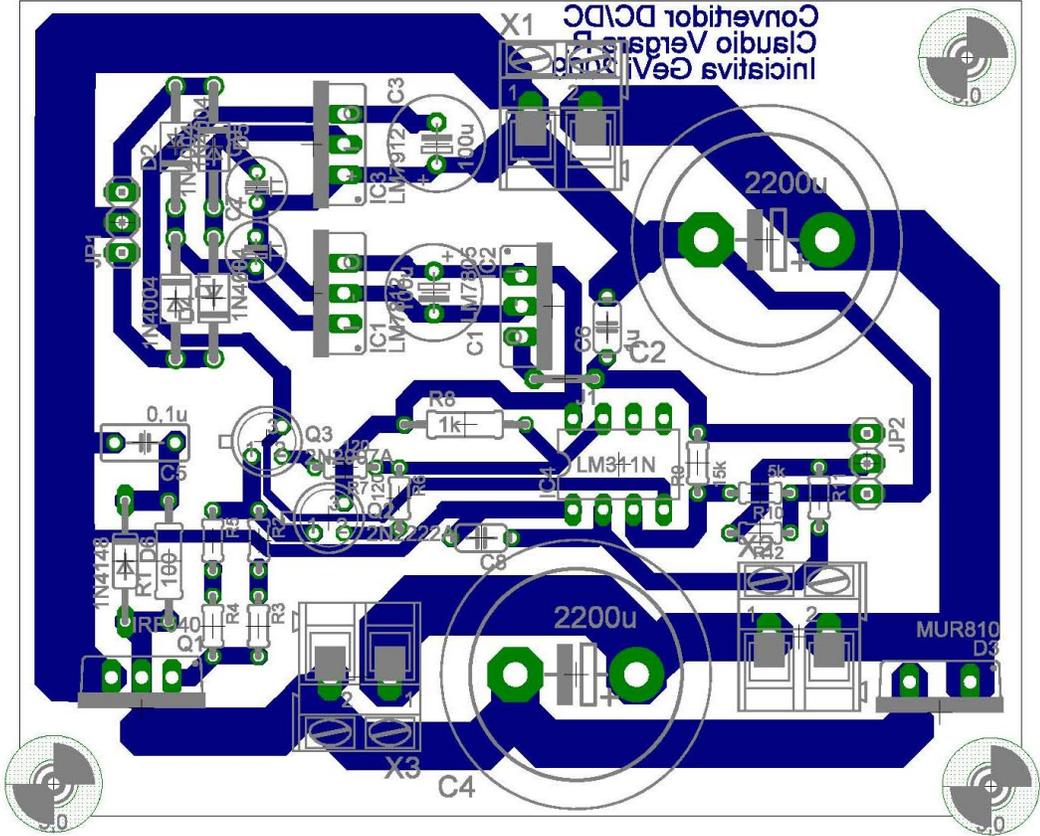
		$X'_d$	
$I'$ [A]	[ $\Omega$ ]	[p.u.]	
15,91	13,63	0,28	

		$X''_d$	
$I''$ [A]	[ $\Omega$ ]	[p.u.]	
29,76	7,28	0,15	

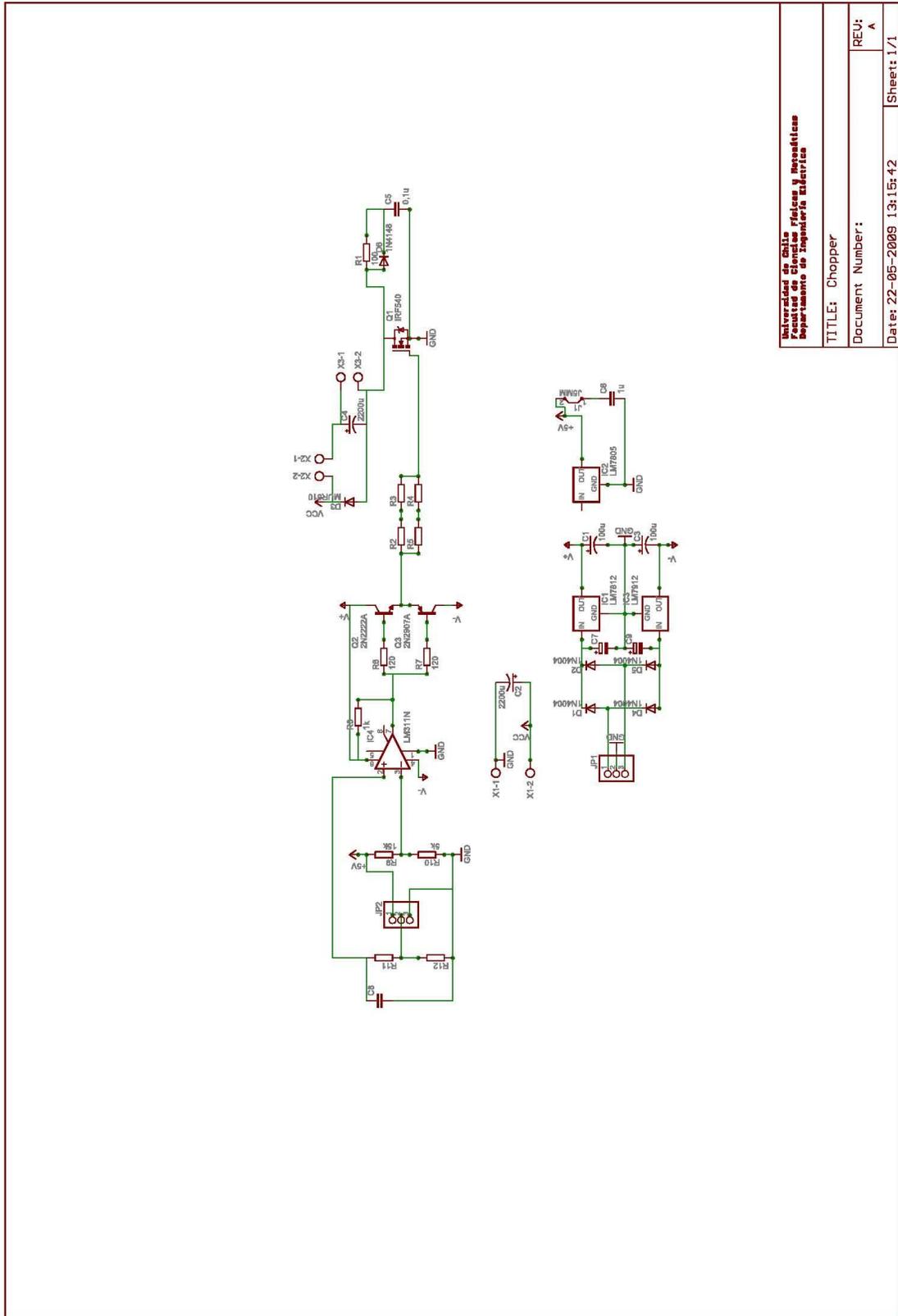




### D.3 Circuito impreso conversor DC-DC Chopper.



## D.4 Diagrama esquemático conversor DC-DC Chopper.



Universidad de Chile  
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas  
Departamento de Ingeniería Eléctrica

TITLE: Chopper

Document Number:

REV:  
A

Date: 22-05-2009 13:15:42

Sheet: 1/1





# Anexo E

## Códigos de Programación

### E.1 Control posición Válvula

```
#include <16F628A.h>
#include <MATH.H>

#FUSES NOWDT //No Watch Dog Timer
#FUSES HS //High speed Osc (> 4mhz)
#FUSES NOPUT //No Power Up Timer
#FUSES NOPROTECT //Code not protected from reading
#FUSES NOBROWNOUT //Reset when brownout detected
#FUSES MCLR //Master Clear pin enabled
#FUSES NOLVP //NO Low Voltage Programming on B3(PIC16) or B5(PIC18)
#FUSES NOCPD //No EE protection

#use delay(clock=2000000)
#use rs232(baud=9600,parity=N,xmit=PIN_B2,rcv=PIN_B1,bits=8)

long ancho_pulso;
long posicion;
long ancho;
long est_est1;
int a;
int i;
INT j;

/*
overflow de 3.2 ms ---->resolucion de 12.8 us
por lo que para 500us se tiene un ancho de 39-40
para 2500 us se tiene un ancho de 195
*/
////////////////////interrupciones////////////////////
#int_EXT
EXT_isr(){
    set_timer0(0);
}

#int_CCP1
CCP1_isr(){
    ancho=get_timer0();
}

////////////////////Declaración funciones////////////////////
void pos (int sec);
int estado(long ancho);
void retardo(int j);
////////////////////Programa principal////////////////////
void main(){
    setup_timer_0(RTCC_INTERNAL|RTCC_DIV_128);
    setup_timer_1(T1_DISABLED);
    setup_timer_2(T2_DISABLED,0,1);
    setup_ccp1(CCP_CAPTURE_FE);
    setup_comparator(NC_NC_NC_NC);
    setup_vref(VREF_LOW|-2);
    enable_interrupts(INT_EXT);
    enable_interrupts(GLOBAL);
    enable_interrupts(INT_CCP1);
    setup_oscillator(False);
    ancho=200;
    est1=5;
    While(1){
        est1=estado(ancho);
        if(est1==9 && !input(PIN_A3)){
            for(i=1;i<5;i++){retardo(0);pos(i);}
        }
        else if(est1==8 && !input(PIN_A3)){
            for(i=1;i<5;i++){retardo(3);pos(i);}
        }
        else if(est1==7 && !input(PIN_A3)){
            for(i=1;i<5;i++){retardo(6);pos(i);}
        }
        else if(est1==6 && !input(PIN_A3)){
            for(i=1;i<5;i++){retardo(10);pos(i);}
        }
        else if(est1==4 && !input(PIN_A4)){
            for(i=4;i>0;i--){retardo(10);pos(i);}
        }
        else if(est1==3 && !input(PIN_A4)){
            for(i=4;i>0;i--){retardo(6);pos(i);}
        }
        else if(est1==2 && !input(PIN_A4)){
            for(i=4;i>0;i--){retardo(3);pos(i);}
        }
        else if(est1==1 && !input(PIN_A4)){
            for(i=4;i>0;i--){retardo(0);pos(i);}
        }
        else pos(0);
    } // SE CIERRA EL WHILE
} // SE CIERRA EL VOID
```

```
void pos (int sec){
    if (sec==0){output_high(pin_b7); output_high(pin_b6);
                output_high(pin_b5); output_high(pin_b4);}

    if (sec==1){output_high(pin_b7); output_low (pin_b6);
                output_high(pin_b5); output_low (pin_b4);}

    if (sec==2){output_low (pin_b7); output_high(pin_b6);
                output_high(pin_b5); output_low (pin_b4);}

    if (sec==3){output_low (pin_b7); output_high(pin_b6);
                output_low (pin_b5); output_high(pin_b4);}

    if (sec==4){output_high(pin_b7); output_low (pin_b6);
                output_low (pin_b5); output_high(pin_b4);}
}

int estado(long ancho){
    if ( 15<=ancho && ancho<=27 ) est=1; // 500 cerrar vel 4
    else if ( 31<=ancho && ancho<=47 ) est=2; //1000 cerrar vel 3
    else if ( 51<=ancho && ancho<=66 ) est=3; //1500 cerrar vel 2
    else if ( 70<=ancho && ancho<=86 ) est=4; //2000 cerrar vel 1
    else if ( 90<=ancho && ancho<=105 ) est=5; //2500 mantener posicion
    else if ( 109<=ancho && ancho<=125 ) est=6; //3000 abrir vel 1
    else if ( 129<=ancho && ancho<=145 ) est=7; //3500 abrir vel 2
    else if ( 148<=ancho && ancho<=164 ) est=8; //4000 abrir vel 3
    else if ( 168<=ancho && ancho<=184 ) est=9; //4500 abrir vel 4
    return est;
}

void retardo(int j){
    delay_us(2400);
    a=j;
    delay_ms(a);
}
```

## E.2 Control general

```
#include <18F2480.h>
#device adc=10 HIGH_INTS=TRUE
#include <math.h>
#FUSES NOWDT, WDT128, HS, NOPROTECT, BROWNOUT, BORV20, NOPUT, NOCPD,
NOSTVREN, NODEBUG, NOLVP, NOWRT, NOWRTD, NOIESO, NOFCMEN, PBADEN,
BBSIZ2K, NOWRTC, NOWRTB, NOEBTR, NOEBTRB, NOCPB, LPT1OSC, MCLR, NOXINST
#use delay(clock=2000000)
#use rs232(baud=19200,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7,bits=8)
////////////////////Declaracion de variables////////////////////////////////////

int dato;
int estado;
int exc_man;
int cont_exc;
    //////////////////variables control frecuencia////////////////////////////////
Long periodo, per, pref;
int val;
int pulso;
    //////////////////variables control escitación////////////////////////////////
int exc, exc_min, exc_max, EMAX;
long Vdif, max_vdif, Vnom;

Long volt, inten, phi;
Long V, kv;
Long IN, ki;
signed long FP;
long kphi;
Long P, Pmax, Pmin;

Long i, imin;    //Variables auxiliares

    //////////////////variables medicion corriente////////////////////////////////

////////////////////////////////////Interrupciones////////////////////////////////////

#int_EXT HIGH    //interrupcion para contar frecuencia red
EXT_isr(){    //el incremento es de 6.4[us], por lo que
    per=get_timer0(); //para el periodo de 20[ms] se tienen
    set_timer0(0);    //1562.5 conteos
}

#int_rda
void serial_isr() {    // Interrupción recepción serie USART
int recibido1, recibido2;

    recibido1 = getc();
    delay_ms(1);
    if(kbhit()){
    recibido2 = getc();
    /*
    estado = 1 Operación Isla, se controla Frecuencia y Tensión
    estado = 2 Conectado a la red se controla potencia activa
    */

    dato = (int) recibido1;
    if(dato==1){//estado del sistema
        estado=recibido2;
        printf("Estado %U",estado);
    }
    if(dato==2){//exitacion
        exc_man=recibido2;
        printf("EXC %U",exc);
    }
    if(dato==3){//estado control excitacion
        cont_exc=recibido2;
        printf("Est_exc %u",cont_exc);
    }
    if(dato==4){//valvula
        Var_man=recibido2;
        printf("Est_exc %u",var_man);
    }
    if(dato==5){//estado control valvula
        cont_var=recibido2;
        printf("Est_exc %u",cont_var);
    }
    if(dato==6){//datos funcionamiento
        printf("P %Lu va %u phi %Lu E %u V %Lu I %Lu
        \n\r",periodo,val,phi,exc,volt,inten);
    }
}
```

```
if(dato==7){//datos funcionamiento
    Set_P=recibido2;
    printf("Est_exc %u",Set_P);
}
if(dato==8){//datos funcionamiento
    Set_Q=recibido2;
    printf("Est_exc %u",Set_Q);
}
}
}

#int_TIMER1 HIGH    //Interrupcion para generar PWM de control de frecuencia
TIMER1_isr(){    //va dirigido hacia el control del motor stepper
    output_bit(pin_C1,1);
}

////////////////////////////////////Declaracion funciones////////////////////////////////////
void mediciones ();

////////////////////////////////////Programa principal////////////////////////////////////
void main(){

    setup_adc_ports(AN0_TO_AN4|VSS_VDD);
    setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL|ADC_TAD_MUL_0);
    setup_spi(FALSE);
    setup_wdt(WDT_OFF);
    setup_timer_0(RTCC_INTERNAL|RTCC_DIV_32);
    setup_timer_1(T1_INTERNAL|T1_DIV_BY_1); // resolucion 0.2us overflow 13.1ms
    setup_timer_2(T2_DIV_BY_16,155,1);
    setup_timer_3(T3_DISABLED|T3_DIV_BY_1);
    setup_vref(FALSE);
    setup_ccp1 (CCP_pwm);

    enable_interrupts(INT_TIMER1);
    enable_interrupts(INT_EXT);
    enable_interrupts(GLOBAL);
    enable_interrupts(INT_RDA);
    ext_int_edge( L_TO_H );
    setup_oscillator(False);

    Vnom=475;

    max_Vdif=45;

    pref=1562.5;

    i=0;
    imin=250;
    EMAX=156;
    exc_min=20;

    Pmin=Set_P-50;
    Pmax=Set_P+50;
    Qmin=Set_Q-50;
    Qmax=Set_Q+50;

    exc=0;
    periodo=1562;

    kv=1;
    ki=1;
    kphi=1;

    while(1){
    mediciones();

        if(estado==1){ //operación en isla

            if(periodo>=7812){ //periodo de 10Hz
                Vdif=0.2*Vnom;
                exc_max=EMAX/4;
            }
            else if(periodo/1.1 > pref){
                Vdif=Vnom * (periodo/pref);
                exc_max=EMAX;
            }
            else {
                Vdif=Vnom;
                exc_max=EMAX;
            }
        }
        //////////////////////////////////control frecuencia////////////////////////////////////
        if(cont_var==1){val=var_man;
        if(cont_var==2){
```

```

    if(periodo>=1628){ val=225; i=0;} //abrir lo mas rapido (r=0) 48 [Hz] 4500 us //40
    else if(periodo>=1611){ val=200; i=0;} //abrir con ret=1 48.5[Hz] 4000 us //43
    else if(periodo>=1594){ val=175; i=0;} //abrir con ret=2 49 [Hz] 3500 us //45
    else if(periodo>=1578){ val=150; i=0;} //abrir con ret=3 49.5[Hz] 3000 us //49
    else if(periodo<=1502){ val=25 ; i=0;} //cerrar lo mas rapido ret=0 52 [Hz] 500 us //60
    else if(periodo<=1517){ val=50 ; i=0;} //cerrar con ret=1 51.5[Hz] 1000 us //58
    else if(periodo<=1532){ val=75 ; i=0;} //cerrar con ret=2 51 [Hz] 1500 us //54
    else if(periodo<=1547){ val=100; i=0;} //cerrar con ret=3 50.5[Hz] 2000 us //51
    else
        { val=125; i++;} //DENTRO DEL RANGO DE OPERACION 2500 us
    }

    pulso = ((long) val)*100;
    if(get_timer1() > pulso){ output_bit(pin_C1,0); } //control PWM stepper

////////////////////////////////////control excitación////////////////////////////////////

    if(cont_exc==1){ exc=exc_man; } //CONTROL MANUAL

    if(cont_exc==2 && i>=imin){ //CONTROL AUTOMATICO
        if((volt-Vdif)>=max_Vdif){
            if(volt<Vdif && exc<exc_max){ exc++; }
            if(volt>Vdif && exc>exc_min){ exc--; }
            i=0;
        }
    }

    set_pwm1_duty(exc); //PWM excitación
}

V=volt*kv;
IN=inten*Ki;
FP=cos(phi*Kphi);
P=V*IN*FP;
Q=V*IN*sen(phi*kphi);

if(estados==2){ //conectado a la red

////////////////////////////////////control Potencia activa////////////////////////////////////
    if(P<Pmin){ val=175 } //abrir con ret=2
    else if(P>Pmax){ val=75 } //cerrar con ret=2
    else val=125;
}
    pulso = ((long) val)*100;
    if(get_timer1() > pulso){ output_bit(pin_C1,0); }

////////////////////////////////////control Potencia Reactiva////////////////////////////////////
    if(Q<Qmin && exc<exc_max){ exc++; } //aumentar campo
    else if(Q>Qmax && exc>exc_min){ exc--; } //disminuir campo
}
    set_pwm1_duty(exc);

} //while

} //main

void mediciones (){

    int d;
    if(periodo<7812)periodo=per; // periodo de 10Hz

    set_adc_channel( 0 ); d=0;while(d<=50){d++;}

    volt=read_adc();

    set_adc_channel( 1 ); d=0;while(d<=50){d++;}

    inten=read_adc();

    set_adc_channel( 2 ); d=0;while(d<=50){d++;}

    phi=read_adc();
}

```



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



## **MANUAL DE FUNCIONAMIENTO Y PRUEBAS PARA PROTOTIPO DE UNA CENTRAL MICRO HIDRÁULICA**

## Introducción

El siguiente informe detalla el funcionamiento del prototipo de central micro hidráulica (CMH) ubicado en el Laboratorio de Energía del Departamento de Ingeniería Eléctrica el que permite reproducir el comportamiento de una central ante distintas condiciones de operación y variación en el recurso hidráulico disponible.

La Figura 1 muestra los distintos componentes que forman al prototipo, detallados a continuación.

1. Estanque de agua: almacena el agua utilizada para simular el recurso hidráulico, contiene una conexión en una de sus caras laterales que permite la circulación del agua hacia la bomba y en la tapa superior contiene un orificio por el cual el agua utilizada para mover la turbina reingresa al estanque, manteniendo siempre el agua en un circuito cerrado. En uno de sus costados cuenta con un medidor de nivel con el cual se puede ver la cantidad de agua al interior del estanque.
2. Bomba Centrífuga: Su accionamiento permite la circulación del agua por la tubería hacia la turbina, generando una potencia hidráulica que simula la contenida por una caída natural de agua. Con el fin de que su funcionamiento reproduzca fielmente el obtenido en la realidad, la bomba centrífuga es alimentada mediante un variador de frecuencia que realiza el control sobre su velocidad de giro.
3. Turbina hidráulica: Corresponde a un elemento mecánico utilizado para transformar la energía cinética del agua en energía rotatoria para hacer girar un eje. La turbina utilizada en este prototipo es una de tipo Pelton. Generalmente este tipo de turbina forma parte de centrales con un recurso hidráulico de gran altura y poco caudal. Sin embargo, para pequeñas caídas de agua resulta igualmente eficiente. Este elemento es importante para el funcionamiento de la CMH correspondiente al control del caudal utilizado, el que es regulado mediante el accionamiento de una válvula de aguja.
4. Generador sincrónico: Este componente permite la obtención de la energía eléctrica, se encuentra conectado mediante poleas al eje de la turbina hidráulica. Corresponde a un generador sincrónico trifásico de potencia nominal 3 kVA que permite el control de manera externa de la corriente de excitación, variable importante para controlar la generación de la CMH.
5. Panel de medición y conexión de cargas: Tal como se verifica en la foto corresponde a un panel de acrílico en donde se encuentran medidores análogos que permiten monitorear de manera visual los valores de las variables eléctricas generadas, dentro de las que se tiene: tensión entre fases; corriente de línea y frecuencia eléctrica. Además contiene los

conectores correspondientes para realizar la conexión de cargas eléctricas trifásicas o monofásicas a la CMH. También se tiene una conexión hembra trifásica del tipo industrial en un extremo del prototipo.

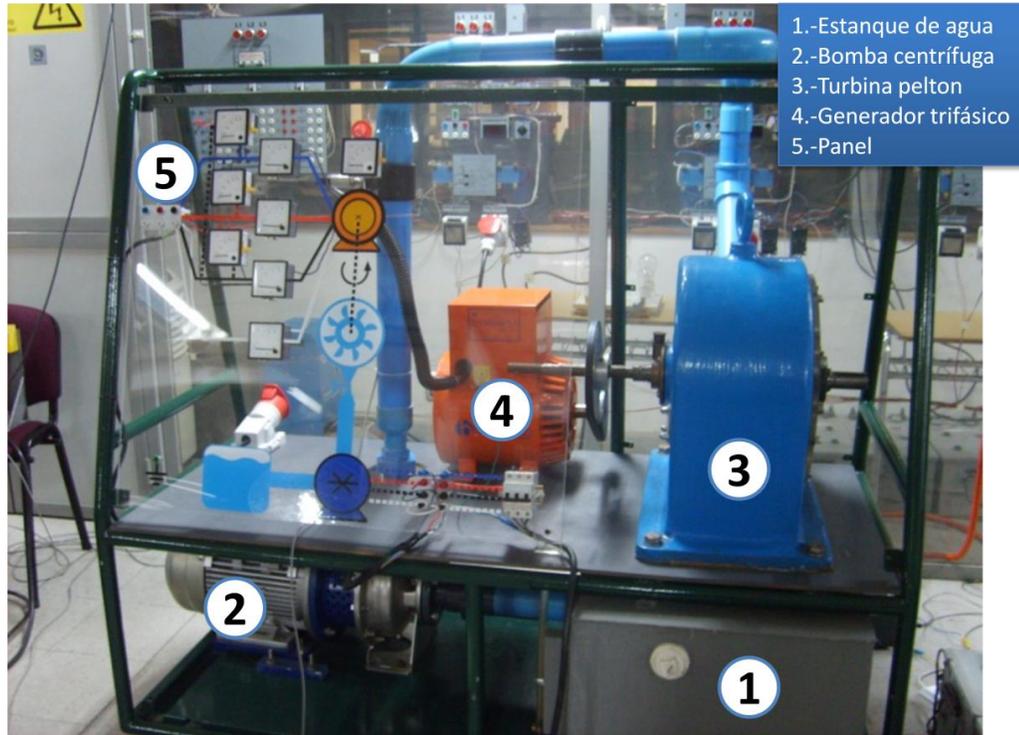


Figura 1: Prototipo de CMH y sus componentes

Para poder utilizar el prototipo mostrado anteriormente es necesario contar con los siguientes elementos externos:

- Computador o notebook con LabVIEW versión 8.2 y acceso a un puerto USB del computador.
- Programa "Control\_CMH.vi"
- Antena del módulo Zigbee.



## Principales utilidades del prototipo

- Gracias al variador de frecuencia incorporado, se realiza un control sobre la velocidad de giro de la bomba centrífuga de manera de mantener la presión constante en la tubería, la que es equivalente a la altura del recurso hidráulico simulado. La presión es medida mediante un manómetro, entregando un voltaje continuo proporcional a la presión medida. Este voltaje es entregado al variador de frecuencia como señal de realimentación. Luego, lo que se busca al utilizar este control, es que la presión en la tubería permanezca constante, equivalente a que la altura del recurso hidráulico también lo haga. Por lo tanto si se modifica la referencia en el variador de frecuencia, se pueden obtener distintos recursos hidráulicos a simular. La siguiente tabla muestra los valores que se deben ingresar en el variador de frecuencia y la equivalencia en altura del recurso hidráulico que se simula. El caudal máximo disponible a simular corresponde a 300 l/min.

Altura equivalente [m]	Referencia numérica
30	2500
35	2900
40	3200
45	3750
50	4100

*Tabla 1: Referencias ingresadas al variador y su altura equivalente.*

- En adición a lo anterior, se puede verificar la importancia de la existencia del control de presión al momento de simular el comportamiento real de un recurso hidráulico, comparando la respuesta de la CMH cuando se encuentra activado con los resultados sin éste control.
- Gracias al controlador implementado, se puede observar el funcionamiento de la CMH el operar conectada a la red y en modo aislado, distinguiendo las distintas variables controladas en cada caso y las diferencias en el comportamiento de la tensión y frecuencia.
- El control remoto, permite adquirir datos del funcionamiento de la CMH por lo que al realizar pruebas en el prototipo se pueden guardar los datos en un archivo Excel para su futuro análisis o creación de informes.

## OPERACIÓN EN ISLA

- Bajo este modo de operación es posible verificar las respuestas que tiene la CMH al variar la carga eléctrica conectada y entender el fenómeno de “embalamiento” que se produce al desconectar carga eléctrica del generador.
- El control de frecuencia y excitación pueden ser configurados en modo manual y automático, por lo que es posible observar la relación caudal-frecuencia y excitación-tensión que se tiene en las centrales hidráulicas.
- Analizar el comportamiento de la CMH cuando se encuentra activado el control manual de frecuencia- tensión y la carga eléctrica es modificada, en contraste con los resultados obtenidos en el caso que se encuentra activado el control automático.
- Al tratarse de un generador sincrónico trifásico, es posible analizar el comportamiento de éste cuando alimenta cargas equilibradas a diferencia de cuando se conectan cargas desequilibradas y observar el comportamiento que se tiene al conectar o desconectar el neutro del generador.

## MODO CONECTADO A LA RED

- Realizada la sincronización de la CMH con la red, es posible modificar el punto de operación de ésta a través del control remoto utilizado, variando la posición de la válvula y por ende la potencia activa que se inyecta a la red, además de cambiar el nivel de excitación con el fin de modificar la potencia reactiva, permitiendo dejarlo sobre excitado o sub excitado.
- Estando bajo éste modo de operación, es posible realizar una desconexión de la CMH de la red observando el comportamiento que adquiere la central.
- En adición a lo anterior, se puede verificar la relación existente entre la cantidad de potencia activa o reactiva inyectada con el valor del factor de potencia obtenido.
- La topología de la red donde se encuentra conectada la CMH, permite la interconexión de ésta con otras tecnologías de generación, tales como generadores eólicos, solares o diesel, por lo que se puede observar el comportamiento del sistema completo al alimentar cargas locales.
- Al interconectar la CMH con otro tipo de generador, es posible configurar a la CMH para que solo entregue potencia activa, manteniendo la posición y corriente de excitación constante traspasándole la regulación de tensión y frecuencia al otro generador, o en caso contrario asumir el control de estos valores, con lo que se puede determinar si es capaz de mantener una calidad de suministro aceptable o en una operación normal.

La siguiente figura muestra el control remoto implementado en LabVIEW (CONTROL\_CMH.vi) y sus distintas funciones.

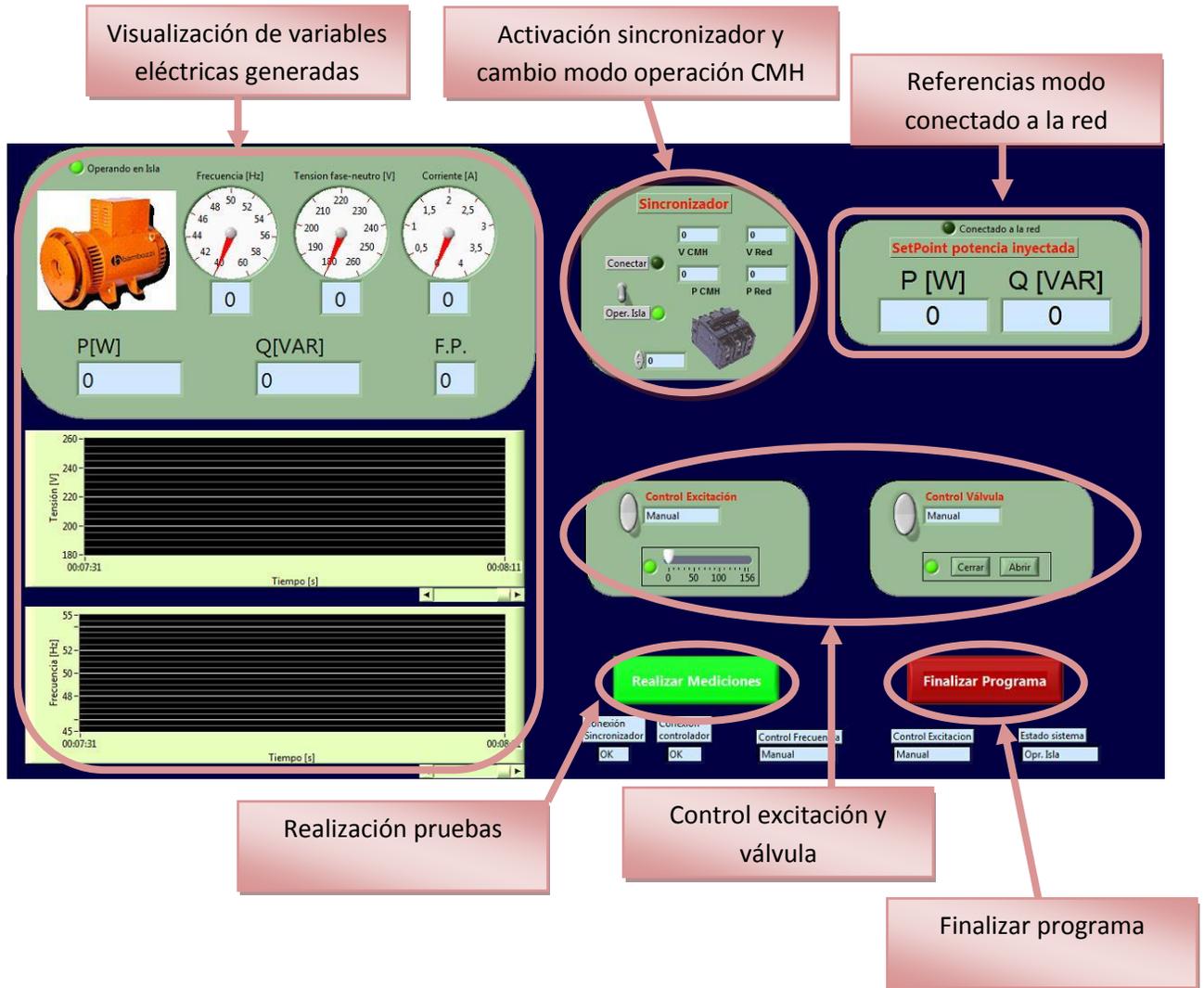


Figura 2: Visualización control remoto y sus distintas funciones.

### Aspectos de seguridad de la CMH

Al tratarse de un prototipo con fines docentes y dados los niveles de tensión y corriente involucrados, resulta importante contar con ciertas características de seguridad que permitan disminuir el riesgo de accidentes al utilizar la CMH. La siguiente lista resume las características más importantes que se tienen relacionadas con la seguridad en el prototipo:

- Bornes para la obtención de la electricidad aislados.
- Existencia de interruptores de emergencia que permiten detener el funcionamiento del prototipo de manera rápida.
- Conexión de dispositivos de medida en la parte posterior del panel y de manera aislada.
- Instalación de toma trifásica industrial para la conexión de la CMH con la red eléctrica.

## Funcionamiento de la CMH

Para poner en funcionamiento la CMH se deben seguir los siguientes pasos:

1. Verificar la cantidad de agua en el estanque mediante el medidor de agua ubicado a un costado de él. La Figura 1 muestra el nivel aceptable para su funcionamiento. En caso de faltar agua se debe agregar utilizando una manguera introducida al estanque por la parte superior.



Figura 3: Nivel de agua en el estanque

2. Los distintos componentes del control deben estar correctamente conectados entre sí. Al control general se le deben conectar la señal del TP/TC, Control de excitación (chopper) y el control de posición de válvula. Los cables utilizados para estas conexiones son todos iguales, por lo que no importa cual es utilizado entre ellos.

El lado primario del TP debe ser conectado entre una fase y neutro. El TC debe ser conectado en serie en la misma fase a la que fue conectado el TP.

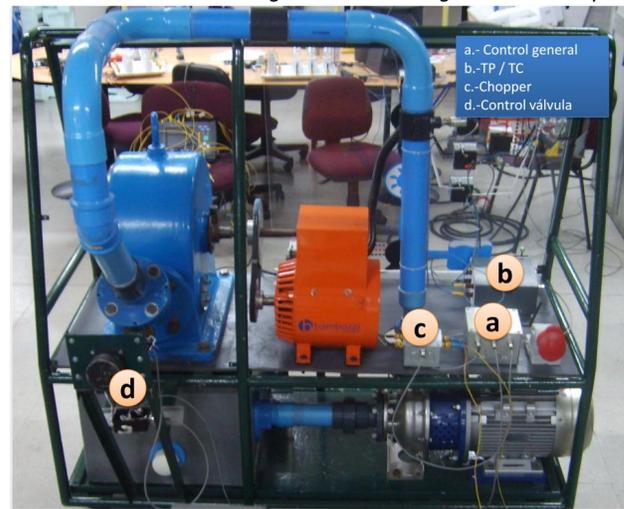
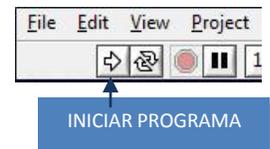


Figura 4: Disposición elementos de control CMH

3. El módulo Zigbee debe ser conectado al computador mediante un clave USB/miniUSB. Una vez conectado, abrir el archivo "CONTROL\_CMH.vi" e iniciar su funcionamiento activando el botón indicado en la figura adyacente.



4. Los elementos conectados en el punto 2, deben ser alimentados respectivamente. El control general debe ser alimentado con tensión alterna, verificar que el interruptor ubicado en un costado se encuentra encendido. El control de excitación o Chopper debe ser alimentado con tensión  $\pm 11$  V para activar el circuito electrónico. La alimentación para el control de posición de la válvula corresponde a una fuente en tensión continua de 12 V capaz de entregar 3 A continuos.

5. Verificar que los controles de posición de válvula y excitación estén en modo manual. Luego el control de excitación debe estar en 0 y la válvula debe ser cerrada por completo.



Figura 5: Control Válvula      Figura 6: Control Excitación

6. Conectar la bobina de campo a la salida del chopper y conectar las baterías a la entrada de éste. Las baterías deben tener una tensión cercana a los 48 [Vcc]. Es importante respetar la polaridad indicada en los bornes del chopper.
7. Alimentar el variador de frecuencia. Verificar la correcta conexión del manómetro al variador de frecuencia e igualmente entre este último y la bomba centrífuga.
8. Configurar en el variador de frecuencia la referencia de altura a simular de acuerdo a la tabla 1. Poner en funcionamiento el variador de frecuencia
9. Incrementar la corriente de campo a 2[A]. Luego abrir la válvula lentamente hasta llegar al punto de operación nominal de la CMH. Tensión generada 220[V] a 50 [Hz] aprox.

En este momento el sistema se encuentra listo para realizar pruebas o ejercicios de funcionamiento tales como: conectar cargas; cambiar el modo de control de las variables entre manual o automático; conectar-desconectar de la red o variar referencias de potencia activa inyectada a la red en el modo conectado

Tal como se muestra en la Figura 2, existe un botón llamado “Realizar prueba” con el que se accede a una segunda interfaz (Figura 7) y permite el registro de las variables mostradas en los indicadores de la primera interfaz. Al apretar el botón “Finalizar prueba” de la segunda interfaz los datos pueden ser guardados en un archivo Excel para su posterior análisis (ver Figura 8).



Figura 7: Segunda interfaz y botón “Finalizar Prueba”.

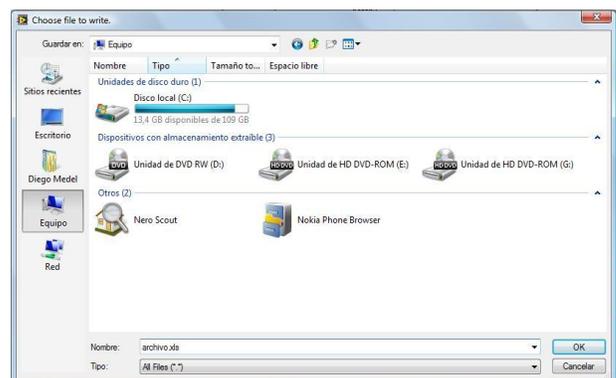


Figura 8: Ventana para elegir dirección de almacenamiento.

Con la finalidad de apagar el prototipo, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Si la CMH está en modo “conectado a la red” se debe pasar al modo “aislado de la red”. Si se está en modo “aislado de la red” se deben desconectar las cargas.
2. Pasar a operación manual el control de posición de válvula y excitación.
3. Cerrar completamente la válvula.
4. Llevar la excitación al menor nivel, 0 A.
5. Desactivar el variador de frecuencia.
6. Desconectar alimentación de potencia del chopper (baterías de 48 Vcc).
7. Apagar todos los componentes de control de la CMH. Desconectar alimentación del variador de frecuencia.
8. Presionar botón “Finalizar programa”.