



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

**REGULACIÓN PRIMARIA DE PMSG PARA APLICACIÓN EN
MICRO-GENERACIÓN HIDRÁULICA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

JAVIER IGNACIO ROBINSON BRAVO

PROFESOR GUÍA:
PATRICIO MENDOZA ARAYA.

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
CONSTANZA AHUMADA SANHUEZA.
ANDRÉS CABA RUTTE.

SANTIAGO DE CHILE
2023

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO
POR: JAVIER IGNACIO ROBINSON BRAVO
FECHA: 2023
PROF. GUÍA: PATRICIO MENDOZA ARAYA.

REGULACIÓN PRIMARIA DE PMSG PARA APLICACIÓN EN MICRO-GENERACIÓN HIDRÁULICA

La generación eléctrica ha evolucionado considerablemente a lo largo de las últimas décadas. En la actualidad es posible distinguir variados equipos con distintos principios de funcionamiento que permiten la inyección de potencia eléctrica a la red. Gracias al desarrollo de la electrónica de potencia y de distintos dispositivos para brindar estabilidad a la red, se ha podido incorporar cada vez más energías de tipo renovable y limpias, que conducen a un futuro sustentable y libre de contaminación.

Dentro de los equipos tradicionales, se encuentran los generadores sincrónicos y de inducción, los cuales funcionan según el principio de inducción electromagnética, utilizando masas rotatorias y corrientes generadoras de campo magnético. Dentro de las denominadas “máquinas rotatorias”, existe una en particular que se ha implementado en variadas prácticas relacionadas con la generación distribuida, particularmente en la micro-generación hidráulica, la cual corresponde al generador síncrono de imanes permanentes o PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator).

Un PMSG se caracteriza por no poseer una corriente de excitación controlable, sino un campo magnético rotatorio constante producido por imanes, debido a esto, el control de este tipo de máquinas se ve acotado en comparación a máquinas con flujo magnético variable. La ausencia de esta variable de control provoca que este tipo de máquina requieran de un sistema de control adicional que le permita mantener las características nominales de la red a la cual se conecta.

Es por lo anterior que el objetivo este trabajo es el diseño y prueba de concepto de un dispositivo de control de tensión para una máquina de imanes permanentes para su uso en micro-generación hidráulica, en particular, para su uso en el generador hidráulico de el laboratorio de máquinas hidráulicas de la Universidad de Chile.

A partir de una revisión bibliográfica y del estado del arte en cuanto a esta problemática, se identifican posibles soluciones aplicables en este contexto, entre las cuales destaca el uso compensadores síncronos de potencia reactiva o STATCOM's a escala.

En esta memoria se muestra el proceso de diseño de un regulador de voltaje basado en STATCOMS, se explica la creación de distintos modelos y escenarios virtuales que permiten validar esta estrategia de control en un contexto de micro-generación hidráulica.

Los resultados de este trabajo pretenden ser una base para una futura confección física de un dispositivo instalable en la máquina del laboratorio.

*A mi familia y amigos, por su apoyo y su fe en mí,
pero también a mí mismo para recordarme que se puede.*

Muchísimas gracias

Agradecimientos

Me gustaría agradecer en primer lugar a mi familia, a mis padres y mi hermana, gracias por darme la fortaleza y la confianza en mí mismo para levantarme cuando tropezaba y seguir adelante cuando dudaba, no solamente durante mi proceso de titulación, si no durante todo mi proceso universitario y toda mi vida. Gracias a mis padres, que todo me lo han dado, todo lo que soy hoy en día es gracias a ellos.

Por supuesto un agradecimiento a mis amigos de la universidad, a los que conocí en plan común y me acompañaron hasta el final, gracias por motivarme a pasarlo bien y disfrutar de tantas cosas que la universidad ofrece además de lo académico, gracias por todos esos paseos, buenos ratos y risas. Espero que nuestro grupito (Fuerza Compas) nunca muera, sepan que siempre los recibiré de brazos abiertos en mi casa o donde sea.

Además de los amigos de plan común, una mención a los amigos de eléctrica, honestamente creo que nunca hubiese desarrollado tanto gusto por la carrera sin ustedes, espero seguir contando con su apoyo cuando seamos colegas en lugar de compañeros de clase.

A mis amigos del colegio, los de Huechu, por supuesto que sin ustedes no lo sacaba adelante, desde que los conozco siempre me han hecho creer que tengo otra familia, a veces pienso que no merezco todo el cariño que me dan, pero sepan que se los agradezco desde lo más profundo de mi corazón. Ojalá podamos disfrutar a concho esta nueva etapa de la vida a la que llegamos, los adoro.

Un agradecimiento especial a la Dani, la que me vio y apoyó en mis peores momentos, siempre encontraste la mejor forma de alentarme y hacerme feliz en este difícil proceso, gracias por tu cariño, tu cuidado y compañía.

Una mención honorífica al Mati y el Fabián, con todas esas horas quemadas en el Discord trabajando en nuestras memorias, se logró cabros.

Por último, gracias al profe Patricio por sacarme las dudas cuando me estancaba y gracias por compartir el material que me permitió hacer este trabajo.

Muchas gracias a todos.

Tabla de Contenido

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Motivación | 1 |
| 1.2. Objetivos | 3 |
| 1.2.1. Objetivos generales | 3 |
| 1.2.2. Objetivos específicos | 3 |
| 1.3. Alcances | 3 |
| 2. Marco Teórico | 5 |
| 2.1. Generación hidráulica | 5 |
| 2.1.1. Clasificación de centrales hidroeléctricas | 6 |
| 2.1.2. Recurso hídrico | 6 |
| 2.1.3. Turbina Hidráulica | 7 |
| 2.2. Generadores eléctricos | 8 |
| 2.2.1. Generador Síncrono de Imanes Permanentes (PMSG) | 8 |
| 2.3. Caracterización del micro-generador FCFM | 10 |
| 2.3.1. Experiencias de laboratorio | 11 |
| 2.4. Estrategias para el control de Voltaje | 12 |
| 2.4.1. Convertidores AC-DC-AC o Back to Back (BTB) | 12 |
| 2.4.2. Equipos de compensación reactiva (FACTS) | 14 |
| 2.4.3. Aplicación en centrales de baja escala | 14 |
| 2.5. Compensador Síncrono Estático (STATCOM) | 16 |
| 2.5.1. Principio de operación | 16 |
| 2.5.2. Circuito inversor | 17 |
| 2.5.3. Funcionamiento | 18 |
| 2.5.4. Esquema de control de STATCOM | 19 |
| 2.5.5. Filtros LCL para convertidores | 21 |
| 2.5.6. Curva de operación | 22 |
| 2.6. Interruptor <i>chopper</i> para control de potencia | 23 |
| 2.7. Selección de estrategia a utilizar | 24 |
| 3. Metodología | 25 |
| 4. Simulaciones | 28 |
| 4.1. Modelos virtuales | 28 |
| 4.1.1. Turbina Hidráulica | 28 |
| 4.1.2. PMSG | 30 |
| 4.1.3. Compensador estático de reactivos (STATCOM) | 31 |
| 4.1.3.1. Diagrama de control | 32 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 4.1.3.2. | Diseño de filtro LCL y amortiguamiento pasivo | 34 |
| 4.1.3.3. | Ganancias de controladores PI | 36 |
| 4.1.4. | Cortador de corriente/ <i>Chopper</i> | 36 |
| 4.1.4.1. | Diagrama de control | 37 |
| 4.2. | Escenarios de simulación | 37 |
| 4.2.1. | PMSG sin controlador | 38 |
| 4.2.2. | STATCOM en sistema eléctrico estable | 38 |
| 4.2.3. | <i>Chopper</i> de potencia activa en sistema eléctrico estable | 39 |
| 4.2.4. | PMSG con ELC | 40 |
| 5. | Resultados y análisis | 42 |
| 5.1. | PMSG sin controlador | 42 |
| 5.2. | STATCOM en red firme | 45 |
| 5.3. | <i>Chopper</i> en red firme | 51 |
| 5.4. | PMSG con ELC | 53 |
| 5.4.1. | Variaciones de carga primaria | 53 |
| 5.4.1.1. | Carga nominal o mayor | 55 |
| 5.4.1.2. | Carga baja | 56 |
| 5.4.2. | Variación en referencia de voltaje | 58 |
| 5.4.3. | Variación en referencia de potencia | 60 |
| 6. | Conclusiones | 62 |
| 6.1. | Trabajo futuro | 63 |
| | Bibliografía | 64 |
| | Anexos | 67 |
| A. | Código de diseño | 67 |
| B. | Parámetros modelo ELC final | 68 |

Índice de Tablas

| | | |
|------|--|----|
| 2.1. | Valores nominales del PMSG de la facultad. | 10 |
| 4.1. | Parámetros y ganancias de diagrama de turbina hidráulica [5] | 30 |
| 4.2. | Parámetros constructivos del PMSG. | 31 |
| 4.3. | Condiciones iniciales del PMSG. | 31 |
| 4.4. | Parámetros del bus DC del STATCOM | 32 |
| 4.5. | Parámetros del filtro LCL | 35 |
| 4.6. | Ganancias PI de controlador STATCOM | 36 |
| 4.7. | Ganancias PI de controlador del <i>chopper</i> | 37 |
| 5.1. | Inyección de reactivos según voltaje en PCC. | 59 |
| B.1. | Parámetros de componentes del ELC | 68 |
| B.2. | Ganancias PI de controlador STATCOM (ELC) | 68 |
| B.3. | Ganancias PI de controlador <i>Chopper</i> (ELC) | 68 |

Índice de Ilustraciones

| | | |
|-------|--|----|
| 1.1. | Ejemplo de generación distribuida, generación local por paneles solares. | 2 |
| 1.2. | Esquema de micro-generación hidráulica. | 2 |
| 2.1. | Esquema de generación en central hidráulica. | 5 |
| 2.2. | Diagrama de turbina Pelton típica. | 7 |
| 2.3. | Disposición de circuito hidráulico de generador PMSG en el laboratorio. | 10 |
| 2.4. | Estructura del sistema de control de velocidad del generador PMSG. | 11 |
| 2.5. | Esquema básico de convertor Back to Back. | 13 |
| 2.6. | Clasificación de equipos de compensación FACTS. Extraído de [20]. | 14 |
| 2.7. | Modelo de sistema de micro-generación. Extraído de [23]. | 15 |
| 2.8. | Ejemplo de loop de control para un SVC de baja escala. Extraído de [20]. | 16 |
| 2.9. | Esquemas de convertidores tipo CSC y VSC. | 16 |
| 2.10. | Conexión típica de un STATCOM a la red eléctrica. | 17 |
| 2.11. | Esquema básico de inversor (1 fase). | 18 |
| 2.12. | Símbolo de IGBT con diodo. | 18 |
| 2.13. | Inversor VSI IGBT monofásico. | 18 |
| 2.14. | Esquema de control tradicional de convertor DC-AC [27]. | 20 |
| 2.15. | Diagrama de control tradicional de STATCOM [22]. | 21 |
| 2.16. | Convertor DC-AC con filtro L (R resistencia interna) [28]. | 21 |
| 2.17. | Convertor DC-AC con filtro LCL con amortiguamiento pasivo[28]. | 22 |
| 2.18. | Curvas de operación característica del STATCOM [29]. | 23 |
| 2.19. | Micro generador hidráulico con ELC usando sistema <i>chopper</i> | 24 |
| 3.1. | Diagrama de bloques de la metodología a seguir. | 27 |
| 4.1. | Implementación de turbina hidráulica en PLECS. | 29 |
| 4.2. | Implementación de sistema governor en PLECS. | 29 |
| 4.3. | Modelo eléctrico de PMSG en PLECS. | 30 |
| 4.4. | Ejemplo de conexión de bloque PMSG en PLECS. | 31 |
| 4.5. | Esquema básico de STATCOM. | 32 |
| 4.6. | Diagrama de control de voltaje implementado. | 33 |
| 4.7. | Lazos de control del eje directo. | 33 |
| 4.8. | Lazos de control del eje de cuadratura. | 34 |
| 4.9. | Esquema básico de <i>chopper</i> con IGBT. | 37 |
| 4.10. | Controlador del <i>chopper</i> en sistema estable. | 37 |
| 4.11. | Escenario de simulación: PMSG sin controlador. | 38 |
| 4.12. | Escenario de simulación: STATCOM en sistema estable. | 39 |
| 4.13. | Escenario de simulación: <i>Chopper</i> en sistema estable. | 40 |
| 4.14. | Escenario de simulación: PMSG con controlador de voltaje y carga. | 41 |
| 5.1. | Potencia activa del PMSG ante variación de carga. | 42 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.2. | Niveles de caudal, altura neta y apertura de inyector de la turbina hidráulica ante variación de carga. | 43 |
| 5.3. | Tensión y frecuencia del sistema ante variación de carga. | 43 |
| 5.4. | Potencia activa del PMSG ante variación de carga, incremento hasta saturación. . . . | 44 |
| 5.5. | Niveles de caudal, altura neta y apertura de inyector de la turbina hidráulica, incremento hasta saturación. | 44 |
| 5.6. | Tensión y frecuencia del sistema ante PMSG saturado. | 45 |
| 5.7. | Voltaje efectivo en barra de conexión del compensador. | 46 |
| 5.8. | Potencia reactiva generada/consumida por el compensador. | 46 |
| 5.9. | Voltaje en condensador del bus DC. | 47 |
| 5.10. | Voltaje y corriente de referencia en eje de cuadratura (controlador). | 47 |
| 5.11. | Voltaje y corriente de referencia en eje directo (controlador). | 48 |
| 5.12. | Voltaje efectivo en barra de conexión del compensador. | 48 |
| 5.13. | Potencia reactiva generada/consumida por el compensador. | 49 |
| 5.14. | Voltaje en condensador del bus DC. | 49 |
| 5.15. | Voltaje y corriente de referencia en eje de cuadratura (controlador). | 50 |
| 5.16. | Voltaje y corriente de referencia en eje directo (controlador). | 50 |
| 5.17. | Niveles de potencia en componentes del sistema. | 51 |
| 5.18. | Corriente en resistencia de desahogo. | 52 |
| 5.19. | Voltaje del bus DC. | 52 |
| 5.20. | Niveles de potencia en componentes del sistema (modo referencia de generación). . . . | 53 |
| 5.21. | Potencia total generada por PMSG y potencia consumida en resistencia de desahogo. . | 54 |
| 5.22. | Voltaje efectivo en punto de conexión de ELC. | 54 |
| 5.23. | Frecuencia del sistema y velocidad rotacional del PMSG. | 55 |
| 5.24. | Voltaje efectivo en punto de conexión de ELC. | 55 |
| 5.25. | Aporte de potencia reactiva de STATCOM. | 56 |
| 5.26. | Voltaje efectivo en punto de conexión de ELC. | 56 |
| 5.27. | Frecuencia del sistema y velocidad rotacional del PMSG. | 57 |
| 5.28. | Potencia total generada por PMSG y potencia consumida en resistencia de desahogo. . | 57 |
| 5.29. | Parámetros de turbina hidráulica. | 58 |
| 5.30. | Voltaje efectivo en punto de conexión de ELC. | 59 |
| 5.31. | Aporte de potencia reactiva de STATCOM. | 59 |
| 5.32. | Potencia total generada por PMSG y potencia consumida en resistencia de desahogo. . | 60 |
| 5.33. | Voltaje efectivo en punto de conexión de ELC. | 61 |
| 5.34. | Voltaje del condensador del bus DC en el ELC. | 61 |

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

En Chile, la generación eléctrica ha cambiado a lo largo de su historia, a medida que el país crece, también debe hacerlo lo el sistema eléctrico. Los avances tecnológicos en el mundo, han permitido aprovechar una gran cantidad de recursos naturales disponibles a lo largo del territorio nacional, recursos como la energía solar, eólica, de gas natural o hídrica han permitido satisfacer esta creciente demanda y a su vez descarbonizando la matriz energética cada vez más. Este fenómeno a logrado acercar el futuro energético a uno completamente renovable y limpio como el que se presenta en la agenda de energía del país [1].

Sin embargo, una limpieza total de la matriz energética de una manera abrupta no es factible dadas las condiciones de la red eléctrica actual. Una problemática actual del sistema eléctrico chileno, es la estabilidad y confiabilidad de este, la forma y geografía del territorio lo condiciona a tener una topología particular, una red eléctrica larga y acotada que dificulta su enmallamiento, aspecto que la vuelve inestable. Una característica negativa de la generación de tipo renovable no convencional, es que no aporta estabilidad al sistema debido a los bajos niveles o ausencia de inercia de sus sistemas de conversión, característica que sí poseen los generadores convencionales grandes, por lo que no se puede prescindir de ellos sin antes abarcar esta temática.

Además de la baja estabilidad natural del sistema eléctrico, su topología lineal produce que los sistemas de transmisión se congestionen en periodos de alta demanda energética, los centros de consumo generalmente se encuentran alejados de los recursos naturales y existen pocos “camino” para que la energía llegue a los usuarios, generando “cuellos de botella” en las líneas de transmisión [2].

Ante estas problemáticas, a lo largo de los años de han investigado posibles soluciones como lo es el desarrollo de sistemas de conversión más robustos mediante el uso de electrónica de potencia o la incorporación de sistemas de almacenamiento en la generación, pero una de las más relevantes en los últimos años ha sido el concepto de la generación distribuida (GD) sustentado por la ley 20.571, la que consiste en la generación local de energía cerca de los consumos, como lo es por ejemplo, la generación mediante paneles solares en los hogares, lo que aliviaría el estrés del sistema actual.

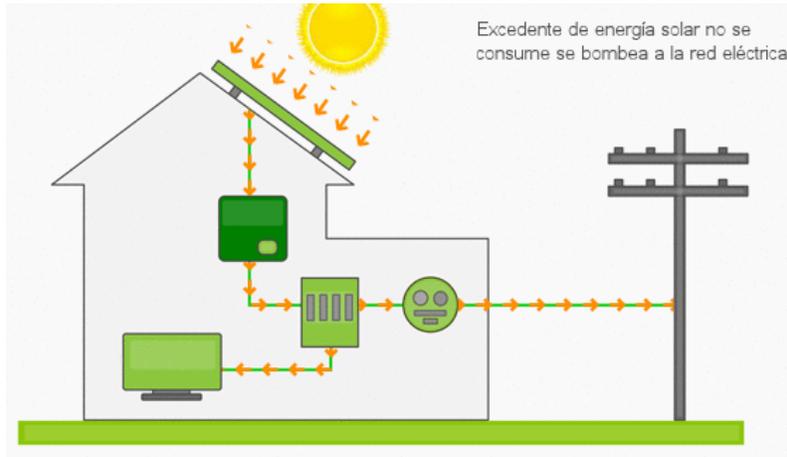


Figura 1.1: Ejemplo de generación distribuida, generación local por paneles solares.

La GD no solo se limita al consumo de hogares, también es aplicable a escalas más grandes, como lo son pequeñas poblaciones, en este ámbito, la micro-generación de tipo hidráulica tiene un gran potencial en Chile dada la cantidad de caudales de agua que se encuentran sobre todo al sur del país, esta generación consiste en aprovechar la energía del agua circulante en los ríos para transformarla en energía eléctrica capaz de alimentar varios hogares, es decir varios kilo-Watts de potencia.

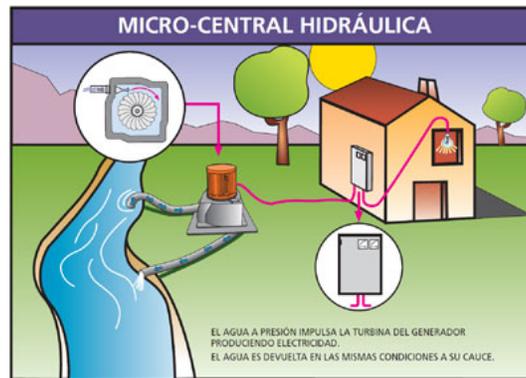


Figura 1.2: Esquema de micro-generación hidráulica.

Según el mapa de vulnerabilidad energética del Ministerio de Energía de Chile [3], existen más de 24 000 viviendas sin suministro de energía, de las cuales una gran cantidad se encuentran en la zona sur. Debido a la gran presencia de ríos y lagos en el sector la energía hídrica puede ser una gran oportunidad para solucionar este problema considerando que actualmente existe una gran capacidad instalada [4].

Si bien es una tecnología atractiva, sigue siendo tema de estudio, una de las aristas principales en cuanto al desarrollo de los generadores de esta escala es el control de los niveles de tensión que entregan ya que en operaciones aisladas estos parámetros tienden a desestabilizarse.

Este trabajo pretende ser un aporte para el desarrollo de las tecnologías de la generación distribuida, para hacerlo, se abarcará la temática de control de voltaje de los micro-generadores

hidráulicos para la estabilidad y confiabilidad de estos sistemas de generación, lo que permitirá modernizar el sistema eléctrico chileno.

Además de lo anterior, este trabajo busca desarrollar un proyecto aplicable en un entorno académico, en particular busca ser aplicable en laboratorios de la universidad para fomentar este tipo de conocimiento y complementar la formación del ingeniero mediante el fomento de este tipo de estudios.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos generales

El objetivo principal de este trabajo es diseñar y modelar un dispositivo capaz de regular la tensión en bornes de un generador síncrono de imanes permanentes para uso académico, en particular se busca poder controlar el micro-generador hidráulico del laboratorio de máquinas hidráulicas del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile.

1.2.2. Objetivos específicos

Dentro de los objetivos específicos de este trabajo se pueden encontrar:

- Selección de una estrategia de control de tensión de un PMSG con las características del que se encuentra en el laboratorio de máquinas hidráulicas a partir de una revisión bibliográfica de aplicaciones similares.
- Modelar la solución seleccionada matemáticamente mediante el uso de ecuaciones que describan los fenómenos físicos de los componentes en cuestión, para luego poder replicar estos modelos en software.
- Validar la estrategia elegida a través de simulaciones por software estudiando variables y parámetros importantes cuando se aplica en un entorno de micro-generación.
- Definir un rango de operación y consideraciones del dispositivo que indique bajo que condiciones es capaz de operar correctamente.

1.3. Alcances

Considerando los objetivos de este trabajo, es necesario aclarar algunas limitaciones para una mejor comprensión de este documento:

- El trabajo realizado no consiste en la construcción física de un dispositivo, sino una prueba conceptual de una de las posibles soluciones a la problemática del generador real del laboratorio, la cual de tener resultados positivos puede ser utilizada como base para una implementación real futura.
- El trabajo no tiene como objetivo la optimización del modelo escogido, el diseño de los parámetros solo considera el correcto funcionamiento del dispositivo y no la minimización de los

tiempos de respuesta.

- El diseño de los componentes del dispositivo podría resultar en valores de parámetros que no se encuentran en el mercado, lo que introduce la posibilidad de diseño de componentes específicos para una implementación real, como por ejemplo capacitores o inductores.

Capítulo 2

Marco Teórico

Este capítulo tiene el objetivo de explicar los conceptos teóricos más relevantes para facilitar la comprensión del trabajo descrito en este documento, mostrar otro tipo de soluciones que se han desarrollado por distintos autores para problemas similares a modo de guiar este trabajo y además presenta una caracterización de la máquina con la que se trabajará.

2.1. Generación hidráulica

El principio detrás de la gran mayoría de centrales generadoras en el mundo es la denominada inducción electromagnética, la que en pocas palabras consiste en generar campos magnéticos variables en conductores eléctricos, estos campos se hacen girar mediante un componente de las máquinas denominado rotor, el cual se acopla mecánicamente a un eje que permite la transferencia de energía mecánica. En las centrales hidráulicas, esta energía proviene de los grandes volúmenes de agua que caen por efecto de la gravedad, esta agua es captada y utilizada para mover componentes rotatorios acoplados a rotores de generadores eléctricos.

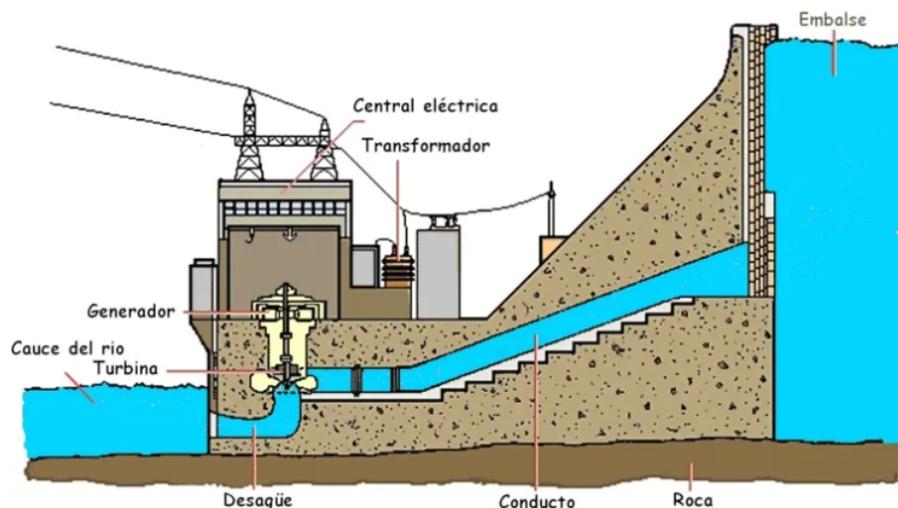


Figura 2.1: Esquema de generación en central hidráulica.

2.1.1. Clasificación de centrales hidroeléctricas

Una de las formas en que pueden ser clasificadas las centrales hidráulicas es mediante la potencia nominal de estas, es decir, según cuanta potencia sean capaces de inyectar a la red eléctrica en condiciones óptimas. Existen también otras formas de clasificarlas, sin embargo esta corresponde a la más útil para efectos de este trabajo, ya que define las escalas de los equipos que se utilizarán para su desarrollo.

En [5], [6] y [7], se clasifican estas centrales como:

- **Centrales grandes:** Potencia mayor a 100 [MW]
- **Centrales medianas:** Potencia entre 15 y 100 [MW]
- **Centrales pequeñas:** Potencia entre 1 y 15 [MW]
- **Mini centrales:** Potencia entre 100 y 1000 [kW]
- **Micro centrales:** Potencia entre 5 y 100 [kW]
- **Pico centrales:** Potencia menor a 15 [kW]

2.1.2. Recurso hídrico

Para caracterizar la energía que se produce en este tipo de centrales, es necesario caracterizar antes el recurso natural que permite la generación, la energía que tienen los volúmenes de agua es de tipo mecánica y puede dividirse en potencial y cinética sin embargo, esta última puede considerarse despreciable en comparación a la primera [8].

Los volúmenes de agua que pasan por la central tienen 2 propiedades que definen la energía potencial:

- **Caudal(Q):** Corresponde al volumen de agua que atraviesa o fluye por una sección determinada por unidad de tiempo
- **Altura Neta Equivalente(H_n):** Corresponde a la distancia vertical calculada entre la superficie del agua y la turbina, considerando pérdidas asociadas la circuito que guía el agua hasta esta.

A partir de esto, se puede definir la energía potencial del agua como:

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_n \quad (2.1)$$

Donde “ ρ ” corresponde a la densidad del agua o fluido en cuestión y “ g ” a la aceleración de gravedad de la Tierra ($9.807 \frac{m}{s^2}$).

Según la caracterización de la máquina del laboratorio [7], para este trabajo se puede considerar que el caudal de agua es una variable controlable, por lo que no sufrirá variaciones imprevistas durante las pruebas, además se puede considerar que la altura tampoco sufrirá de este tipo de variaciones ya que se encuentra en un tanque suspendido. Esto permite que la ecuación 2.1 sea válida para modelar matemáticamente la máquina.

2.1.3. Turbina Hidráulica

Las turbinas hidráulicas son las máquinas encargadas de hacer girar el rotor de los generadores eléctricos mediante la transformación de la energía potencial del agua en energía mecánica. Los volúmenes de agua que caen, impactan a los álabes de la turbina, generando torque mecánico en esta, haciendo que sus partes rotatorias giren.

Las turbinas hidráulicas pueden clasificarse según la forma constructiva que tengan, estas formas se adoptan dependiendo de las características del recurso y la cantidad de potencia que se requiera en cada aplicación. Algunas turbinas que se utilizan para este tipo de aplicaciones son Kaplan, Francis y Pelton [9].

La turbina hidráulica que se encuentra implementada en el laboratorio corresponde a una de tipo Pelton, su diseño y construcción se explica en [8], se utiliza debido a que es la más adecuada para los niveles de potencia que se buscan generar.

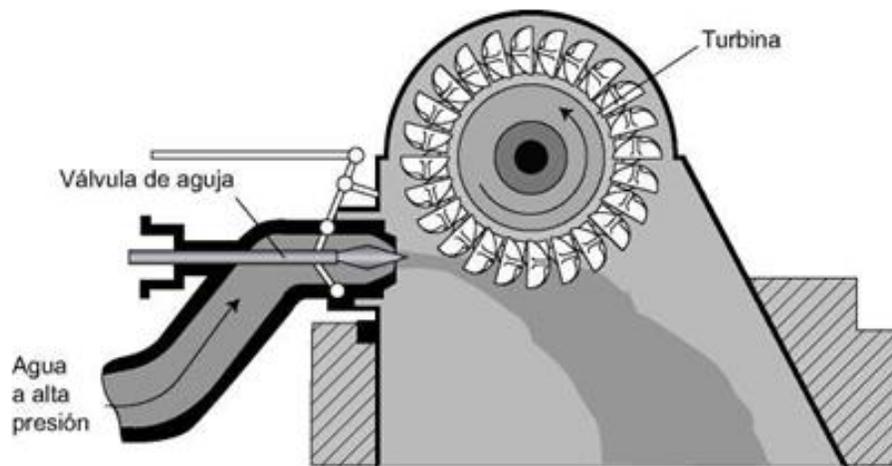


Figura 2.2: Diagrama de turbina Pelton típica.

La energía eléctrica que se genere depende del nivel de caudal que esté entrando a la turbina, este caudal es controlable mediante un componente denominado inyector, el cual posee una parte móvil denominada aguja, la que permite aumentar o disminuir la sección por donde el agua es disparada hacia los álabes de la turbina, por lo tanto, controlando la sección de salida del inyector, se puede controlar el torque producido por el agua y por ende la potencia mecánica de la turbina.

Las turbinas no son capaces de transformar toda la potencia del recurso hidráulico en potencia mecánica, el porcentaje de transformación dependerá de los aspectos constructivos de la turbina, al igual que de las pérdidas y otros factores, los que se ven reflejados en el rendimiento. Con esto la potencia mecánica queda descrita por la ecuación 2.2 a continuación [6].

$$P_m = \eta_{global} \cdot P_h \quad (2.2)$$

Con,

- P_m : Potencia mecánica
- P_h : Potencia del recurso hídrico

- η_{global} : Rendimiento global de la máquina

2.2. Generadores eléctricos

Los generadores eléctricos son las máquinas encargadas de transformar la energía mecánica en energía eléctrica utilizando el principio de la inducción electromagnética con campos magnéticos rotatorios. Los generadores eléctricos poseen 2 variables de control, las cuales son la velocidad de rotación del rotor y la densidad de flujo del campo magnético (normalmente atribuido a la denominada corriente de excitación), estas variables les permiten controlar sus 4 salidas; la potencia activa, la potencia reactiva, el voltaje en bornes y la frecuencia.

A pesar de ser 2 variables de control independientes, cualquier tipo de cambio en ellas se ve reflejado en la totalidad del sistema, es decir que cada una modifica de alguna manera todas las salidas, en otras palabras, existe un acoplamiento entre las entradas del sistema de control de un generador o máquina. Cuando se tiene un generador conectado a una red grande o robusta, este problema es despreciable, ya que la red fija los valores del voltaje y frecuencia de la máquina, por lo que se puede controlar mejor la potencia de inyección, por otro lado, en un sistema aislado, ni el voltaje ni la frecuencia son fijos, por lo que acople de variables debe ser abarcado mediante otras estrategias.

La clasificación más habitual para este tipo de máquinas consiste en la caracterización de la velocidad de giro del rotor, dentro de las más comúnmente usadas se encuentran:

- **Máquinas Asíncronas:** Corresponden a las máquinas cuyo velocidad de giro del rotor no necesariamente es igual al de la frecuencia de la red eléctrica. Estos generadores normalmente se utilizan para aplicaciones de generación menor o como motores para generar torque mecánico (operación inversa al generador). Los generadores de inducción son un ejemplo de este tipo.
- **Máquinas Síncronas:** Corresponden a aquellas que la velocidad de giro del rotor es igual o una ponderación de la frecuencia de la red. Son los generadores principales de las redes eléctricas grandes y comúnmente se utilizan para generar altas cantidades de potencia. Las centrales hidroeléctricas comúnmente utilizan este tipo de generadores

2.2.1. Generador Síncrono de Imanes Permanentes (PMSG)

Los PMSG son una sub-clasificación de los generadores síncronos, su principal característica, es el uso de imanes para la generación del campo magnético rotatorio en lugar de utilizar electroimanes como en generadores convencionales, a diferencia de este último, los imanes convencionales no tienen la capacidad de variar la intensidad del campo magnético que producen, sino que tiene una magnitud constante, en consecuencia de esto el control sobre la tensión en bornes se vuelve pobre.

La aplicabilidad de estas máquinas depende del tipo y niveles de generación que se quieran alcanzar, a continuación se muestran algunas ventajas y desventajas de ellas encontradas en la literatura [10], [11]:

- **Ventajas:** Tamaño pequeño y de uso simplificado, bajos costos por mantenimiento gran densidad de potencia por unidad de volumen, no tiene pérdidas eléctricas en el rotor debido a la ausencia de la corriente de excitación

- Desventajas: Ausencia de control sobre el flujo magnético rotatorio, dificultades para la regulación de tensión en modo aislado y uso limitado a aplicaciones de baja potencia.

Los PMSG son frecuentemente utilizados para la construcción de turbinas eólicas [12] por su bajos costos de mantención y además dado que los parques eólicos consisten en varias turbinas para alcanzar altos niveles de potencia, son una buena opción para la construcción de estas.

Es importante definir las ecuaciones que rigen para este tipo de máquinas, esto permite diseñar un sistema de control que se base en los principios eléctricos que describen la operación, para hacerlo es necesario transformar los ejes abc propios de una máquina trifásica a un sistema de coordenadas dq rotatorio utilizando la transformada de Park, con esto en consideración se tienen las siguientes ecuaciones descritas en [5] y [11]

Ecuaciones de voltaje:

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega_e \Psi_q \quad (2.3)$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\Psi_q}{dt} - \omega_e \Psi_d \quad (2.4)$$

Ecuaciones de flujo:

$$\Psi_d = L_d i_{sd} + \Psi_m \quad (2.5)$$

$$\Psi_q = L_q i_{sq} \quad (2.6)$$

Ecuaciones de Torque:

$$T_e = \frac{3p}{2} (\Psi_m i_{sq} + (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq}) \quad (2.7)$$

$$T_e - T_m = J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (2.8)$$

Velocidad de giro:

$$\omega_e = p\omega_r \quad (2.9)$$

Con,

- u_{sd} y u_{sq} : Voltajes en ejes dq del estator.
- R_s : Resistencia del estator.
- i_{sd} e i_{sq} : Corrientes en ejes dq del estator.
- Ψ_d y Ψ_q : Flujos magnéticos en ejes dq a través del estator.
- Ψ_m : Flujo magnético propio de los imanes permanentes.
- L_q y L_d : Inductancias del generador en ejes dq .
- T_e y T_m : Torque electromagnético y torque mecánico respectivamente.
- J : Momento de inercia del generador.
- p : Número de polos.
- ω_r : Velocidad angular del rotor.

2.3. Caracterización del micro-generador FCFM

El circuito hidráulico, la turbina y el PMSG del laboratorio de máquinas hidráulicas de la facultad, es descrito con detalle en [7], en el se especifican las características nominales de los componentes .

Las características más importantes del PMSG se muestran en la tabla 2.1 a continuación:

Tabla 2.1: Valores nominales del PMSG de la facultad.

| | |
|---------------------|-----------|
| Potencia nominal | 10 [kW] |
| Voltaje entre fases | 380 [V] |
| Velocidad nominal | 750 [RPM] |
| Número de polos | 8 |

Como se trata de una máquina que tiene 8 polos (4 pares), la velocidad rotacional de la máquina es 4 veces menor que la frecuencia eléctrica de las señales que genere, esto según la relación 2.10:

$$n = \frac{60 \cdot f}{P} = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (2.10)$$

Donde n es la velocidad rotacional del rotor en $[rpm]$, f la frecuencia eléctrica del sistema y p el número de polos ($P = \text{pares de polos}$).

La disposición física del sistema mecánico-hidráulico se muestra en la figura 2.3, esta es descrita detalladamente en [7].

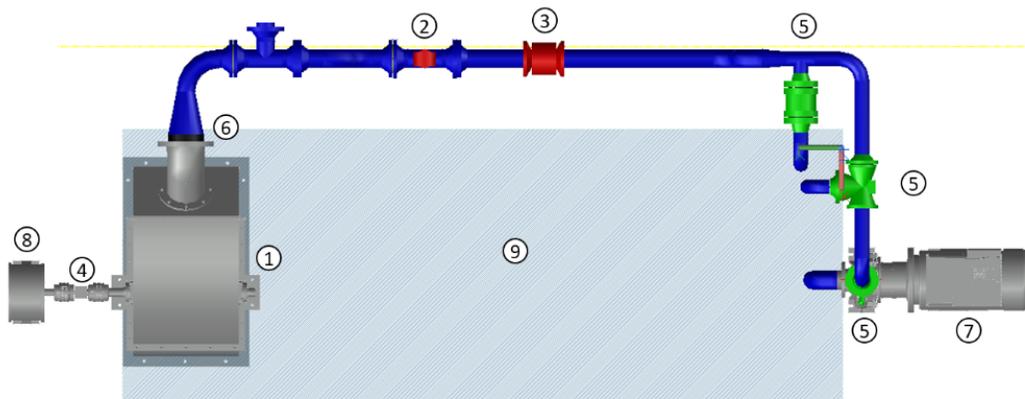


Figura 2.3: Disposición de circuito hidráulico de generador PMSG en el laboratorio.

1. Turbina hidráulica Pelton
2. Medidor de presión
3. Medidor de caudal
4. medidor de torque

5. Conjunto de válvulas
6. Inyector
7. Bomba centrífuga y variador de frecuencia
8. Generador PMSG
9. Pozo con agua

El modelo circuital eléctrico es similar al mostrado en la figura 2.7 más adelante, considerando que no existe el equipo de compensación reactiva.

El sistema de control de giro del rotor del generador, esta relacionado la apertura del inyector de la turbina para modificar los niveles de caudal que lo mueven, la estructura del esquema de control corresponde al mostrado en el diagrama de la figura 2.4.

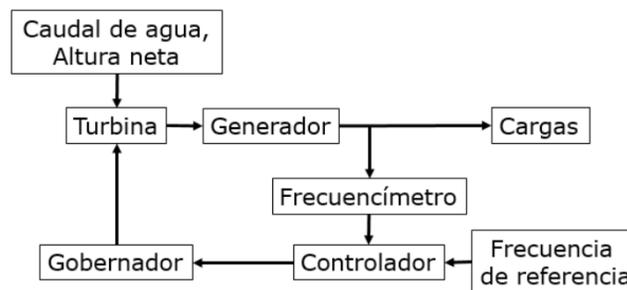


Figura 2.4: Estructura del sistema de control de velocidad del generador PMSG.

2.3.1. Experiencias de laboratorio

Conocer el tipo de actividades que se realizan utilizando el PMSG en cuestión, resulta de utilidad al momento de crear los escenarios de simulación, ya que se puede establecer cuales son las variables que afectarán al funcionamiento de la estrategia de control elegida, lo que se considerará en el diseño. Hasta el año 2021, las experiencias que existen son [5]:

1. Control automático de una micro-central hidráulica a través del control del caudal mediante el movimiento del inyector, a voltaje y frecuencia constante, y cargas eléctricas variables.
2. Caracterización del funcionamiento de una microturbina hidráulica Pelton.

La primera experiencia indica que el generador es sometido a una variación de carga y por ende a un desbalance entre generación y consumo eléctrico, lo que a su vez, produce cambios en la frecuencia del sistema.

La segunda experiencia consta en modificar las características del recurso hídrico presente para estudiar el comportamiento de la turbina y la generación de la máquina, lo que sugiere que esta última se verá sometida cambios graduales en la potencia eléctrica generada.

2.4. Estrategias para el control de Voltaje

El problema de regulación de voltaje de un PMSG aislado es un tema que se ha investigado, por lo que pueden encontrarse en la literatura algunas soluciones que pueden ser replicadas para este trabajo, si bien las condiciones y situaciones no son iguales, son una buena base para guiarlo.

En general, las aplicaciones del PMSG se dan en ambientes de generación eólica, por lo que una gran cantidad de autores, describen esquemas de control para regular la tensión de turbinas en parques eólicos [11–14], sin embargo, el principio de generación eólica es similar al de generación hidráulica, por lo que las soluciones descritas en los distintos documentos, pueden ser utilizadas para las bases de este trabajo.

Es posible identificar 2 soluciones principales para este tipo de regulación a esta escala, la primera consiste en la utilización de convertidores AC-DC-AC [13, 14], los cuales regulan tensión mediante un bus DC, transistores y variados tipos de modulación para replicar señales AC, la segunda solución consiste en la regulación mediante compensación de tipo reactiva utilizando equipos como STATCOMS [15–17] o compensadores estáticos (SVC's) [18–20].

2.4.1. Convertidores AC-DC-AC o Back to Back (BTB)

Los convertidores son dispositivos que permiten la transformación de una señal en corriente alterna en corriente continua y una de corriente continua a una de corriente alterna con otras propiedades. El proceso se lleva a cabo mediante electrónica de potencia, haciendo uso de componentes como transistores, diodos, condensadores y distintas estrategias de control que permiten modificar las características de la señal de salida.

Los convertidores BTB tienen 3 partes principales que permiten su funcionamiento, a continuación se da una explicación breve de cada una, [5] [13] [14]:

- **Convertidor del lado de la máquina (MSC):** Corresponde al conjunto de diodos que conforman el rectificador de onda, se encarga de transformar la señal alterna trifásica en una señal de corriente continua mediante la inversión de los pulsos negativos de la señal AC. Como su nombre lo indica, se conecta al lado de la máquina, la cual es su entrada, en este caso el PMSG.
- **Puente DC:** Corresponde al Bus de corriente continua de convertidor BTB, tiene el objetivo de mantener los niveles de voltaje DC que se utilizan para la replicación de la onda AC de salida. Para mantener el voltaje se utiliza un condensador que permite suavizar la señal de salida del MSC. En algunos casos se utiliza un componente denominado “*Crowbar*” que permite descargar energía mediante una resistencia cuando hay exceso de esta.
- **Convertidor del lado de la red (GSC):** Corresponde al conjunto de elementos (generalmente transistores) que utilizan el voltaje del bus DC para la construcción de una nueva señal AC, para hacerlo, se utilizan distintos tipos de modulaciones y esquemas de control.

La figura 2.5, muestra como se ve un esquema de un convertidor BTB tradicional con los componentes mencionados anteriormente.

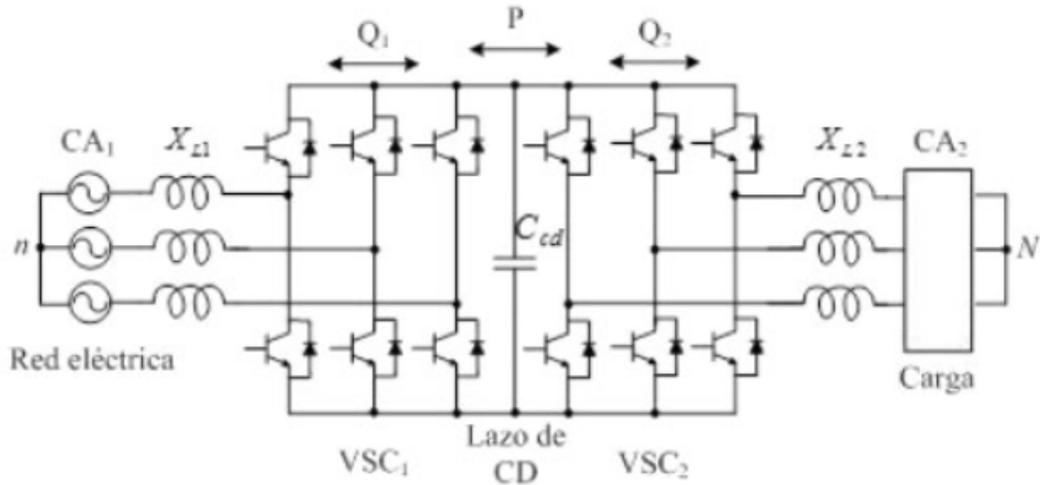


Figura 2.5: Esquema básico de convertidor Back to Back.

Para replicar ondas sinusoidales a partir de transistores, se utilizan distintos tipos de modulaciones, los bloques más utilizados en la actualidad para estas aplicaciones corresponden al de Modulación por Ancho de Pulsos (PWM) y el de Modulación por Vectores Espaciales (SVM).

En generación eólica, se hace referencia a los MSC y GSC como Conversores de Fuente de Voltaje o (VSC), ya que funcionan a partir de la regulación de los niveles de voltaje de sus entradas [13]. El control de tensión de la señal de salida, al igual que el de la potencia transmitida viene dado por el tipo de control que se utilice para ambos convertidores, a modo de ejemplo, una opción para el MSC puede ser el uso del control de tipo escalar o de tipo vectorial [5] [11]

- Control de tipo escalar: Se basa en las relaciones validas para los estados estacionarios del generador, se controlan la magnitud y frecuencia de los voltajes al igual que las corrientes y los flujos enlazados
- Control de tipo vectorial: Basado en las relaciones dinámicas de del generadores, se controlan los mismos parámetros que le control de tipo escalar pero se agrega el control de la posición de los vectores.

En [5], se proponen 2 estrategias de tipo vectorial para la regulación del PMSG y se comparan, el Control Directo del Torque (DTC) y el Control de Flujo Orientado (FOC). El trabajo distingue las ventajas y desventajas de cada uno, concluyendo que es más conveniente uno sobre el otro dependiendo de las tiempos de respuestas requeridos. A pesar de los resultados que se obtienen, existen limitaciones en cuanto a las capacidades del convertidor, principalmente en la parte del bus DC, las cuales limitan el rango de operación del dispositivo.

Una ventaja importante del uso de convertidores BTB es el desacople electromagnético de la máquina con la red dado que las señales son deconstruidas y reconstruidas usando inversores, por lo que las variables de salida del PMSG tienen un mayor grado de libertad, sin embargo esto trae desventajas en otros aspectos, como el limitado aporte de estabilidad ante contingencias de equipos de inversión.

2.4.2. Equipos de compensación reactiva (FACTS)

En los sistemas eléctricos de potencia, una opción de regulación de tensión es la inyección de reactivos en puntos de consumo utilizando equipos de compensación reactiva. Dado el crecimiento de las redes eléctricas, se han buscado soluciones para avanzar con el desarrollo de la generación distribuida, en donde el uso de estos equipos a jugado un importante papel en la generación eólica [18] [19].

Los compensadores reactivos son equipos conformados principalmente con componentes pasivos que poseen altos valores de reactancia, como condensadores o reactores (bobinas), estos se conectan en paralelo cerca de los puntos de consumo para la inyección local de reactivos, de esta manera se evita la transmisión de esta a través de las líneas. Los condensadores son utilizados para subir los niveles de tensión mediante inyección y los reactores bajan los niveles de tensión mediante el consumo de reactivos.

Existen varios tipos de compensadores, su clasificación se basa en las características constructivas, en particular por su uso de capacitores, reactores o ambos, además según se puedan o no desconectar dichos componentes mediante el uso de tiristores u otro tipo de interruptores. Los compensadores de este tipo reciben el nombre de Sistemas de Transmisión AC Flexibles o FACTS [21, 22].

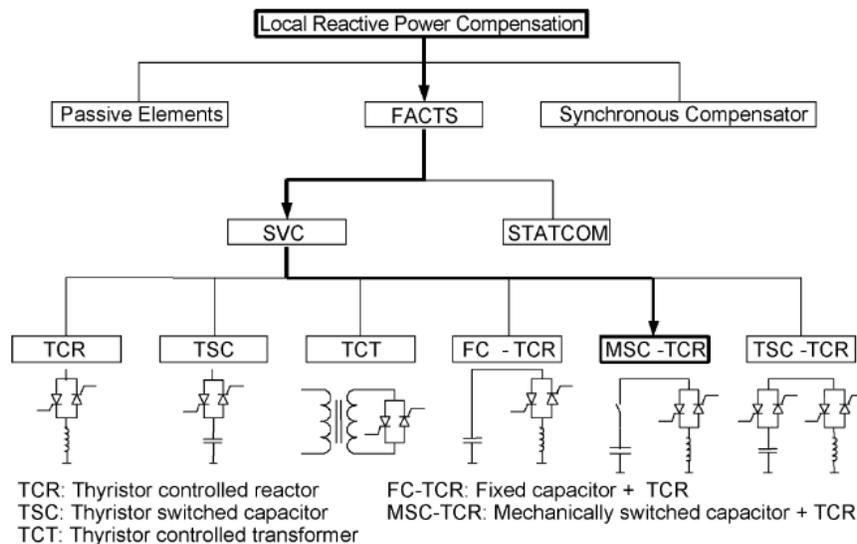


Figura 2.6: Clasificación de equipos de compensación FACTS. Extraído de [20].

Los equipos FACTS tienen la ventaja de que tienen una construcción sencilla y económica, a igual de ser fáciles de instalar, sobre todo para aplicaciones de baja escala como lo es este proyecto.

2.4.3. Aplicación en centrales de baja escala

Habitualmente, los dispositivos FACTS se encuentran a un nivel de transmisión en alta tensión, sin embargo, existen dispositivos a escala que han sido aplicables en voltajes bajos equivalentes a los una red de distribución pequeña (220-380 [V]), los cuales han sido probados en condiciones similares a que tiene una micro-central conectada a una carga de manera aislada [20, 21].

El problema de regulación de tensión en micro-centrales puede ser abordado como se indica en [23] y [24] donde se tiene un generador aislado (de inducción) conectado a una carga directamente, el balance de potencia activa se controla mediante una resistencia de desahogo en paralelo, controlada mediante tiristores, adicionalmente se propone conectar un dispositivo tipo FACTS para regulación de reactivos y por ende el voltaje en bornes del generador y carga.

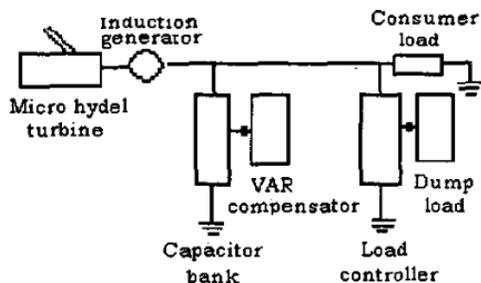


Figura 2.7: Modelo de sistema de micro-generación. Extraído de [23].

El modelo circuital de la figura 2.7 representa el modelo circuital de una micro-central con un generador de inducción conectado a una carga de manera aislada, se puede apreciar la conexión de la resistencia de desahogo (*Load controller*) y un banco de capacitores para la compensación de reactivos en paralelo (*Capacitor bank*).

Existen diagramas de control como el de la figura 2.8 que permiten la desconexión y conexión de los distintos componentes de los FACTS de manera automática mediante la medición de los voltajes y corrientes de cada fase del sistema, lo cual es fundamental para que funcionen manteniendo los valores nominales de la carga.

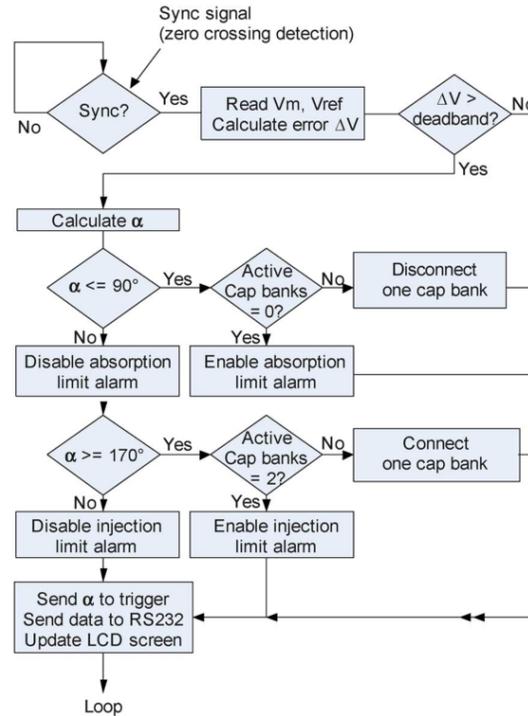


Figura 2.8: Ejemplo de loop de control para un SVC de baja escala. Extraído de [20].

2.5. Compensador Síncrono Estático (STATCOM)

Los STATCOM's o "*STATIC synchronous COMPensators*" corresponden a equipos FACTS que funcionan en base convertidores de potencia electrónicos controlados comúnmente a través de señales digitales, a partir de estos se pueden obtener señales en corriente alterna a partir de una señal de corriente directa. Una de las principales características de este equipo es que tiene la capacidad de modificar su consigna de potencia reactiva para distintos modos de operación, entregando corriente capacitiva o inductiva independiente del sistema AC. Los convertidores que se utilizan para este tipo de dispositivos pueden ser de tipo fuente de corriente (CSC) o fuente de voltaje (VSC).

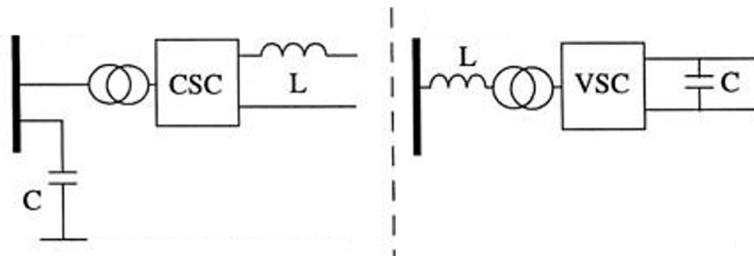


Figura 2.9: Esquemas de convertidores tipo CSC y VSC.

2.5.1. Principio de operación

Para entender el principio de funcionamiento de este dispositivo, se puede analizar su modelo eléctrico simplificado, el cual consiste en una fuente regulada de tensión (V_s), conectada a una barra de voltaje (V_0) mediante un transformador.

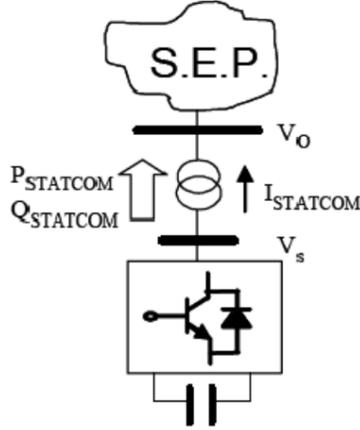


Figura 2.10: Conexión típica de un STATCOM a la red eléctrica.

A partir de este modelo, se puede estudiar como se comporta la transferencia de potencia si se observan las ecuaciones tradicionales de flujos de potencias:

$$P = \frac{|V_0| \cdot |V_s|}{X_T} \cdot \sin(\delta) \quad Q = \frac{|V_0| \cdot |V_s|}{X_T} \cdot \cos(\delta) - \frac{|V_s|^2}{X_T} \quad (2.11)$$

Donde δ corresponde a la diferencia angular de las tensiones V_s y V_0 , bajo una operación normal del sistema y el dispositivo, se tiene que $\delta = 0$, por lo que según las expresiones, no existe transferencia de potencia activa entre el STATCOM y el sistema, por otro lado, se observa que el flujo de potencia reactiva depende de los voltajes de la barra y del convertidor, cuando el voltaje del sistema V_0 sea mayor, la potencia reactiva será positiva, lo que implica una absorción esta por parte del STATCOM, en cambio si el voltaje del compensador es mayor al del sistema, la potencia activa será negativa, lo que implica que el compensador la está proporcionando al sistema [22].

Por lo tanto, si $|V_0| < |V_s|$, la operación es capacitiva, si $|V_0| > |V_s|$, la operación es inductiva.

En resumen, un STATCOM es capaz de regular la tensión de un punto de conexión mediante el ajuste de la señal de voltaje que se modula en sus salidas para acomodar la transferencia de potencia reactiva necesaria [25].

2.5.2. Circuito inversor

Los circuitos inversores corresponde a un convertidor electrónico que es capaz de construir una señal AC a partir de una DC mediante el encendido y apagado de los distintos *switches* que o componen. La señal DC consta de al menos 2 polos con distintos niveles de tensión, usualmente negativos y positivos los cuales se pueden obtener mediante capacitores o fuentes de tensión, los polos son conectados a una carga mediante interruptores, los cuales alternan su encendido y apagado para generar voltajes de distintos signos en ella.

La frecuencia de alternado al igual que el tiempo en que los interruptores permanecen encendidos o apagados afectará a la forma de la señal AC en la carga, para obtener una señal deseada, es

necesario ajustar estos parámetros en un proceso denominado modulación.

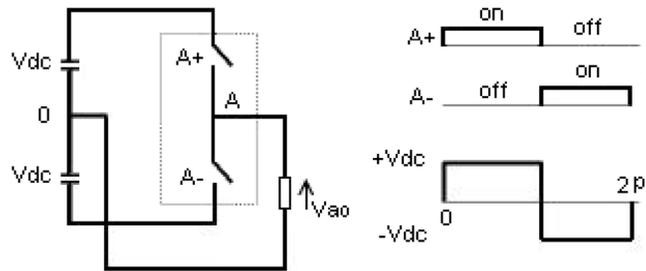


Figura 2.11: Esquema básico de inversor (1 fase).

Existen diversos tipos de interruptores que son utilizados para la construcción de convertidores de este tipo, uno de los más utilizados corresponde al “Transistor Bipolar de Puerta Aislada” o IGBT por sus siglas en inglés, estos son utilizados en conjunto a diodos con conexión anti-paralela, lo que permite flujo de corriente libre en un sentido y control sobre el otro.

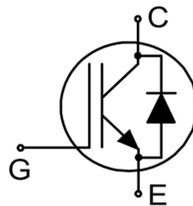


Figura 2.12: Símbolo de IGBT con diodo.

2.5.3. Funcionamiento

Para lograr el intercambio de potencia reactiva entre el sistema y el compensador, es necesario controlar el voltaje de este último, los STATCOM utilizan capacitores como fuentes de tensión para el tratamiento de señales DC, lo que corresponde a un convertidor tipo VSC, la estrategia de control tiene que hacerse cargo de su carga y descarga para obtener valores de tensión favorables en ellos, de esto se encarga la modulación PWM, cambiando el estado de los interruptores en instantes determinados para la construcción de una onda de voltaje apropiada.

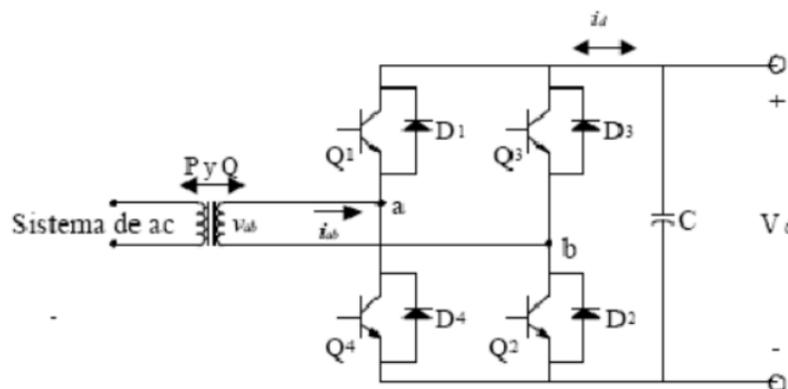


Figura 2.13: Inversor VSI IGBT monofásico.

Dependiendo del signo del voltaje del lado AC del convertidor y de los interruptores que se encuentren abiertos en ciertos instantes de tiempo, la potencia eléctrica podrá fluir desde el lado AC a DC o viceversa. A modo de ejemplo, si se considera el circuito inversor monofásico de la figura 2.13, se tiene que si el voltaje V_{ab} es positivo, la corriente I_{ab} negativa, los IGBT 1 y 2 están encendidos con 3 y 4 apagados, la corriente fluye a través de los transistores de los IGBT, dado además el signo del voltaje V_d , se tiene que la potencia fluye desde el lado DC al AC, lo que corresponde a un modo de operación de inversión, si para este mismo caso, la corriente cambia de signo debido a la naturaleza AC, se tiene que la corriente fluye por los diodos de los IGBT, cambiando la dirección del flujo de potencia, desde AC a DC, lo que corresponde a una operación de rectificación [22] [26].

En otras palabras, el manejo del encendido y apagado de los interruptores adecuados en momentos específicos de los ciclos trifásicos permite determinar los flujos de corriente y potencia dentro del convertidor.

2.5.4. Esquema de control de STATCOM

El esquema de control tradicional que se utiliza para los compensadores estáticos consiste mantener el perfil de voltaje de la barra a la cual esté conectado en su valor nominal a partir de del control de las corrientes del VSC.

El principio que se utiliza consiste en el la descomposición del vector trifásico de corriente utilizando la transformada de Park, la cual lo representa en un sistema de referencia rotacional con dos componentes, el eje directo y el eje de cuadratura. Esta transformación se lleva a cabo a partir de la siguiente relación matricial (ecuación 2.12):

$$\begin{bmatrix} y_d \\ y_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ \cos(\varphi - 120^\circ) & -\sin(\varphi - 120^\circ) \\ \cos(\varphi + 120^\circ) & -\sin(\varphi + 120^\circ) \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Con y_d e y_q el componente directo y de cuadratura respectivamente, φ el ángulo instantáneo del vector trifásico y x_a, x_b, x_c los vectores trifásicos de la señal.

En las estrategias de control que se utilizan comúnmente en convertidores, se regula la inyección de potencia activa y potencia reactiva a partir del control de las corrientes “ d ” y “ q ” respectivamente [27], para hacerlo se disponen de 2 lazos de control utilizando bloques PI, uno externo, encargado del control de la potencia y otro interno, encargado del control de la corriente. Para los lazos externos el esquema es más sencillo, ya que se genera una referencia de corriente a partir de una señal de error en la potencia, por otro lado, para el lazo de control interno o de corriente, además de considerar el error en la corriente de referencia, también existen otros valores que deben tomarse en cuenta al momento de generar una señal de voltaje, los cuales provienen de las expresiones características del circuito del filtro descritas por las leyes de Kirchhoff, esto provoca un acople entre los componentes directo y de cuadratura en las expresiones del voltaje;

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} + Ri_d - \omega Li_q = v_{d1} - v_d \\ L \frac{di_q}{dt} + Ri_q + \omega Li_d = v_{q1} - v_q \end{cases} \quad (2.13)$$

Donde v_d, v_{d1}, i_d corresponden a los voltajes en la salida del convertidor, el voltaje en la salida del

filtro y la corriente inyectada respectivamente.

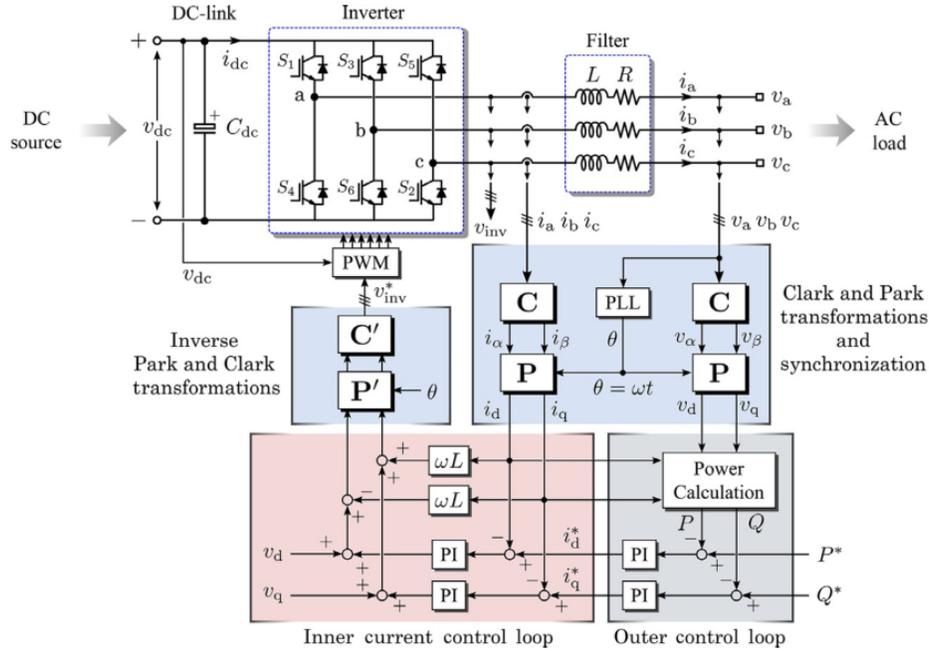


Figura 2.14: Esquema de control tradicional de convertidor DC-AC [27].

La figura 2.14 muestra la estructura básica del controlador de un convertidor, se puede observar que la componente directa se encarga de la regulación de potencia activa inyectada y la componente de cuadratura de la potencia reactiva inyectada (a menudo esta se establece como 0). Como el STATCOM consiste en un convertidor, se aplica un esquema como el descrito, sin embargo como la finalidad de este es distinta, la función de los componentes de la transformada de Park se modifica, por un lado, la componente de cuadratura i_q de la corriente de la fuente tiene el objetivo de corregir la consigna de potencia reactiva que este inyectando o absorbiendo el STATCOM, para esto se analiza la magnitud de voltaje de la barra a regular, si se compara este valor con una referencia asociado a los niveles nominales (1 [p.u]) se obtiene un error que es procesable mediante el controlador PI, el que entrega una referencia de potencia reactiva necesaria para suplir esta diferencia. Por otro lado, se tiene la componente directa de corriente i_d la cual permite mantener el nivel de tensión adecuado en el bus DC (capacitor), de tal manera que no se cargue ni descargue durante la modulación de la señal AC, así la relación de transferencia de reactivos (ecuación 2.11), puede mantenerse estable [15–17].

La última parte del control consiste en la generación de los voltajes de referencia para los moduladores PWM, los cuales requieren de señales variables en el tiempo para poder replicar las señales trifásicas deseadas, por lo que las señales “dq” obtenidas en el proceso son transformadas nuevamente a un sistema trifásico “abc” o a un sistema rotacional bi-dimensional “ $\alpha\beta$ ” (transformación de Clarke) dependiendo del tipo de modulación que se disponga, este paso requiere de un ángulo de referencia para la sincronización con la red, el cual puede ser obtenido mediante el uso de un bloque de lazo de seguimiento de fase o *Phase Locked Loop* (PLL).

La anterior corresponde a una estrategia típica de control para este dispositivo, la figura 2.15 a continuación muestra como se ve en un diagrama de bloques.

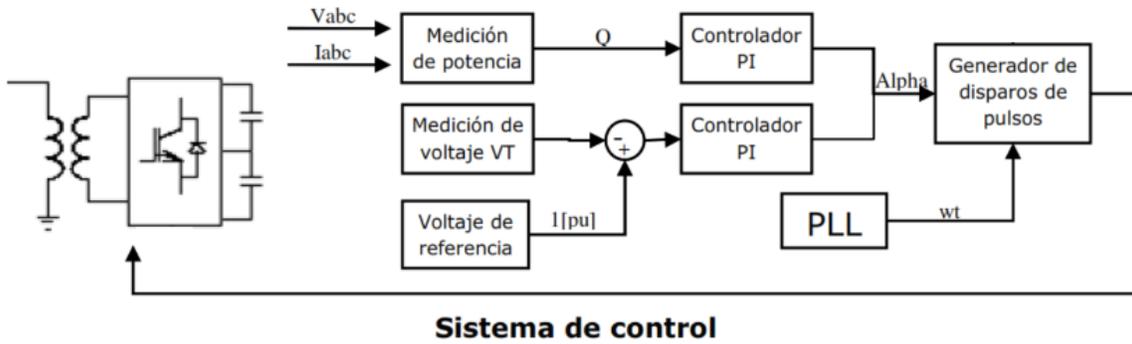


Figura 2.15: Diagrama de control tradicional de STATCOM [22].

2.5.5. Filtros LCL para convertidores

La generación de señales sinusoidales puras mediante el uso de convertidores no es posible debido a los abruptos cambios de tensiones en los terminales de estos provocados por el encendido y apagado de *switches*, de cierta manera, la señal generada es un “muestreo discreto” de una señal de referencia sinusoidal, lo que se traduce en ondas cuadradas. A partir de la teoría del análisis de Fourier, se puede tratar esta señal como una composición de infinitas señales sinusoidales con distintas frecuencias, las señales que se buscan obtener se encuentran dentro de un determinado rango de esas frecuencias, por lo que el uso de filtros es casi imprescindible cuando se hace uso de convertidores.

Los cambios abruptos de las señales cuadradas se ocasionan debido a las frecuencias más altas del espectro de la señal generada, por lo que es usual encontrar filtros tipo L conectados a los terminales de los convertidores, es decir, inductancias en serie en cada una de las fases. Una práctica común en este ámbito, es aprovechar las inductancias que se encuentran en los transformadores, ya que se trata de bobinas en núcleos ferromagnéticos, es habitual encontrar STATCOM's, SVC's u otro tipo de compensadores conectados a sistemas donde los niveles de tensión son más difíciles de lograr con este tipo de dispositivos. Además de su utilidad como filtro, la configuración en Δ permite mejorar aún más las señales debido a su característica de retención de la 3^{ra} armónica y sus múltiplos. Cuando se hace uso de transformadores, es necesario tener en cuenta el desfase que se produce entre sus lados de alta y baja tensión.

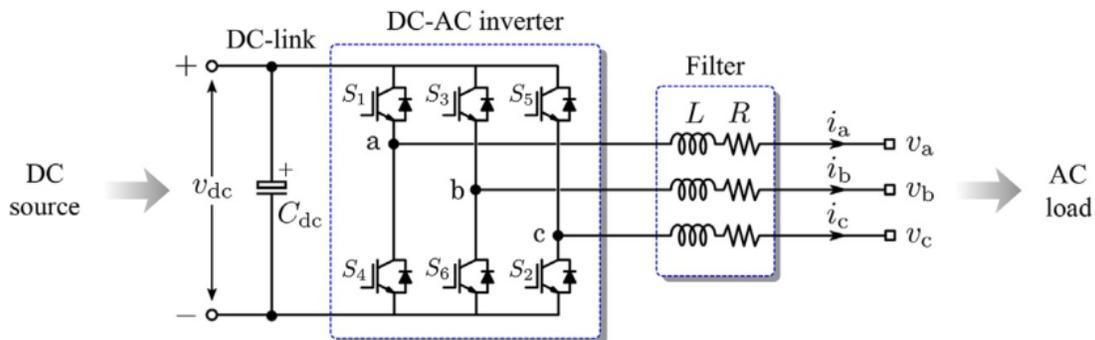


Figura 2.16: Conversor DC-AC con filtro L (R resistencia interna) [28].

El uso de filtros L usualmente resulta en una construcción de inductancias pesadas, voluminosas

y por lo tanto costosas, además, inductancias muy grandes son capaces de producir pérdidas significativas, caídas de voltajes y respuestas a dinámicas pobres, es por esto que en muchos casos se opta por el uso de filtros LCL, el que permite seleccionar inductancias más pequeñas y por lo tanto un sistema más compacto, sin embargo, poseen una desventaja, el uso de capacitancias e inductancias en conjunto resulta un efecto de resonancia que provoca inestabilidad en el control interno de corriente [28]. La corrección de la resonancia puede lograrse mediante un amortiguamiento pasivo o activo, el primero consiste en el uso de resistencias disipativas en serie a los condensadores a costo de una pérdida energética, el segundo consiste en la modificación del algoritmo de control para regular la inestabilidad sin necesidad de componentes físicos.

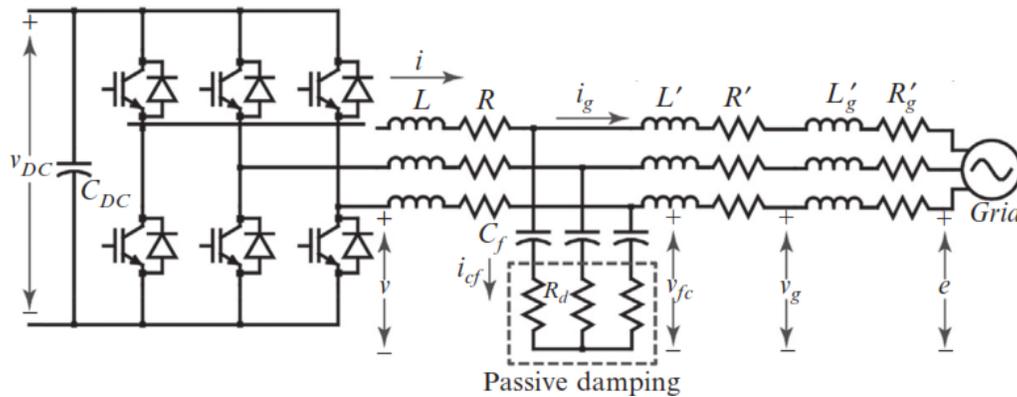


Figura 2.17: Conversor DC-AC con filtro LCL con amortiguamiento pasivo[28].

Para que el controlador del STATCOM sea eficiente y efectivo, es necesario establecer los parámetros del esquema en relación a los valores de los componentes del filtro por las relaciones eléctricas (debido a las leyes de Kirchoff), es por esto que existen metodologías de diseño para esta aplicación.

2.5.6. Curva de operación

Los compensadores no son capaces de inyectar cantidades infinitas de potencia reactiva, esto se debe principalmente a las limitaciones físicas de sus componentes constructivos, a consecuencia de esto, estos dispositivos no son capaces de normalizar los niveles de tensión para cualquier valor de esta, si no que poseen un rango en el cual la acción reguladora es la que se desea. En los STATCOM's estas limitaciones son ocasionadas por los niveles de corriente que los semiconductores pueden soportar.

Existen curvas V-I y V-Q que permiten visualizar el rango de operación de un dispositivo compensador, la figuras 2.18.a y 2.18.b muestran dichas curvas para el caso del STATCOM, en el lado capacitivo la corriente está limitada por la capacidad de apagado de los semiconductores ante dichas corrientes y el lado capacitivo por las temperaturas máximas de las junturas de los semiconductores.

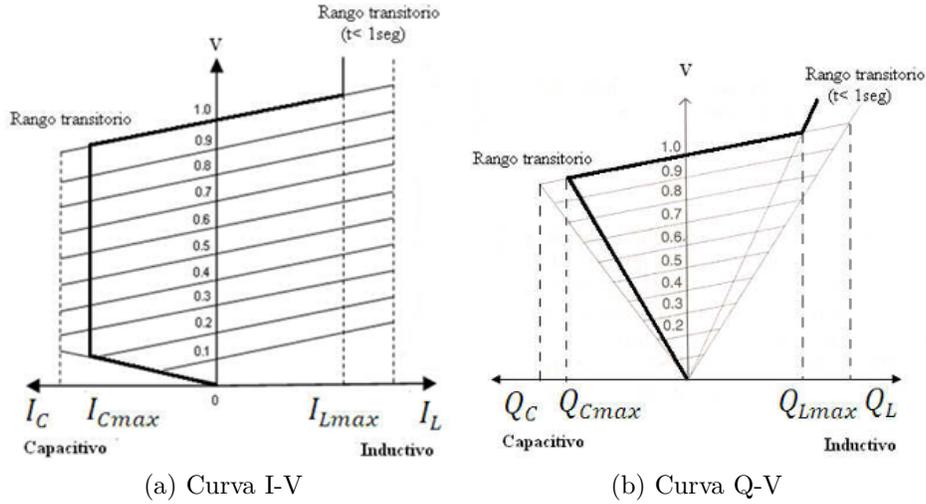


Figura 2.18: Curvas de operación característica del STATCOM [29].

La curva V-I permite destacar una característica importante de la operación del STATCOM, en la región capacitiva, es sistema es capaz de operar al máximo nivel de corriente, es decir, es capaz de inyectar su máxima cantidad de potencia reactiva sin importar el voltaje de la barra AC a regular [29].

2.6. Interruptor *chopper* para control de potencia

En aplicaciones de generación a escala pequeña o micro (5 a 100 [kW]) es común tratar con máquinas que tienen poca regulación de generación y que trabajan con un recurso constante como lo son los caudales de agua de un río, lo que resulta en una potencia constante a la salida del generador, la cual es aprovechada por cargas eléctricas que no necesariamente suelen ser constantes, provocando una diferencia entre lo consumido y generado [30]. Asociado a esta problemática, se pueden observar efectos negativos, entre ellos el principal corresponde a los cambios en la frecuencia debido a los efectos acelerantes y desacelerantes en las máquinas descritos por la ecuación del Swing. (ec.2.14).

$$2H \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e \quad (2.14)$$

Donde $\frac{d\omega}{dt}$ corresponde a la aceleración rotacional del rotor de la máquina y $T_m - T_e$ a la diferencia de torque mecánico y eléctrico respectivamente, lo que indica que un torque eléctrico mayor al mecánico, produce una aceleración negativa (frenado) y uno menor una aceleración positiva.

Los controladores electrónicos de carga o ELC han sido utilizados para resolver esta problemática, en [23] y [24] se describe un sistema que consiste en una resistencia de desahogo en combinación a un interruptor *chopper*, el principio de dicho sistema consiste en que los excesos de generación que no son consumidos por la carga, sean consumidos por una resistencia capaz de disiparla (en forma de calor por ejemplo).

Utilizar resistencias de desahogo con un convertor AC-DC, facilita el control sobre la potencia que esta consume debido a la unidireccionalidad de la corriente que circula a través de ella, con

ello, se puede hacer uso de interruptores como los IGBT con diodos para “recortar” dicha corriente mediante un esquema de control, lo que reduce los niveles efectivos de ella y por lo tanto la potencia que esta disipa. En la figura 2.19, se observa un sistema como el descrito para el control de una central hidráulica pequeña.

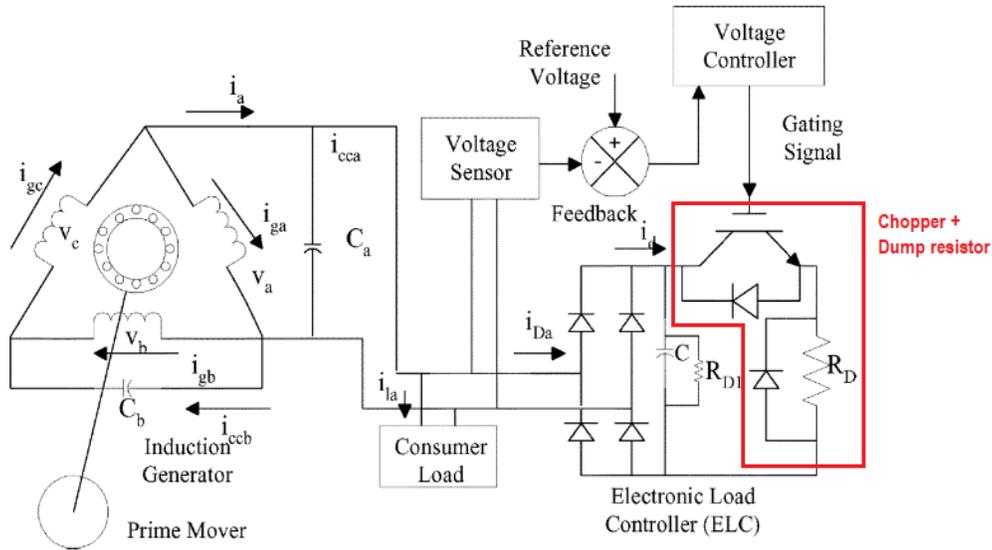


Figura 2.19: Micro generador hidráulico con ELC usando sistema *chopper*.

2.7. Selección de estrategia a utilizar

Como se mencionó anteriormente, para resolver el problema de control de tensión presentado en este trabajo se pueden utilizar 3 tipos de dispositivos; un convertidor Back to Back (BTB), un compensador estático de reactivos (SVC) o un compensador síncrono (STATCOM).

Dado el trabajo realizado por Maximiliano Guardiola en [5], la opción de un dispositivo BTB ya se encuentra propuesta, sin embargo el uso de este tipo de dispositivo en el generador en cuestión trae 2 desventajas importantes, la primera es que el control del convertidor requiere una intervención en el generador como tal, lo que podría significar una alteración la máquina, la segunda apunta hacia el aspecto formativo y docente, el uso de compensadores abre más opciones en cuanto a temáticas de control, compensación reactiva y funcionamiento de las redes eléctricas, el hecho de mantener un acople eléctrico directo entre la carga y el generador es enriquecedor para estudios tanto mecánicos como eléctricos.

Dicho lo anterior, se opta por un dispositivo tipo compensador, el cual puede ser algún tipo de SVC o STATCOM, a partir de lo expuesto por distintos autores en [15–17, 25], la segunda opción es más atractiva dado que los tiempos de respuestas son más cortos, tienen un sistema de control más flexible y tienen un mejor rendimiento en cuanto a la estabilidad de voltaje.

La opción de STATCOM presenta otra ventaja, es posible aprovechar lado de corriente continua para la implementación de un sistema controlador de carga como el que se describe en la sección 2.6, lo que resultaría en un dispositivo híbrido regulador de voltaje y carga activa.

Capítulo 3

Metodología

Esta sección tiene el objetivo de clarificar los pasos a seguir para llevar a cabo el desarrollo de este trabajo, la metodología se basa principalmente en el trabajo descrito en [5] para la creación de una simulación virtual para luego complementarlo con el desarrollo respectivo de una implementación física de la solución propuesta.

La metodología a seguir durante el desarrollo de este trabajo consta en las siguientes 6 partes:

1. **Definición de tipo de compensador a utilizar:** La primera parte del trabajo consiste en establecer la topología del dispositivo que se utilizará para regular la tensión en bornes del PMSG a partir de una revisión bibliográfica y un análisis de ventajas de cada una de las opciones. Dados los antecedentes anteriormente descrito, el compensador por el cual se opta corresponde al “Compensador síncrono estático de reactivos” o STATCOM por sus siglas en inglés.
2. **Estudio de modelos matemáticos para modelar máquina y compensador:** Se deben estudiar los principios eléctricos que se relacionan con sistemas eléctricos de este tipo, esto con el objetivo de determinar las expresiones matemáticas que definen los comportamientos dinámicos de las distintas variables en juego, lo que permite la obtención de diagramas de bloques equivalentes para ser usados en un modelo virtual.
3. **Estudio de esquemas de control tradicionales para el dispositivo a modelar:** El control de las variables de estado del sistema se logra mediante un esquema de control, en la literatura se pueden encontrar varios esquemas típicos que se utilizan en escenarios similares, para este estudio, se escoge la estructura de uno de ellos y se modifican sus parámetros para adaptarlo a la escala en la que se aplica.
4. **Implementación de modelos virtuales base en *PLECS*:** Una vez establecidos los diagramas de bloques relacionados con las expresiones matemáticas y seleccionada la estrategia de control, se procede a confeccionarlos en el *software PLECS* para realizar los estudios correspondientes de las variables de estado. Para simplificar los análisis y confección, el modelo final de la propuesta se construye a partir de 3 modelos base simplificados:
 - **PMSG sin compensador:** Se busca verificar el correcto funcionamiento del modelo mecánico-eléctrico de la turbina y generador en su estado actual, de tal manera de analizar los niveles de tensión a corregir y como se comporta ante dinámicas comunes

- **Compensador STATCOM en una red firme:** Es necesario verificar que el esquema de control es capaz de regular tensión, un sistema eléctrico firme permite identificar de una manera más sencilla los problemas que este puede tener, ya que una falla en la regulación puede deberse a aspectos externos al compensador.
 - **Chopper con resistencia de desahogo en una red firme:** Al igual que el escenario anterior, se dispone de una red firme para estudiar la regulación de potencia activa de la máquina.
5. **Confección de modelo final:** Una vez corroborado el correcto funcionamiento de los distintos modelos descritos, se combinan para generar el escenario equivalente al sistema real del laboratorio junto con la solución propuesta. Se estudia la regulación de tensión en bornes del PMSG.
 6. **Verificación de funcionamiento y establecimiento de límites de operación:** A partir del análisis de resultados del modelo final se pueden establecer las limitaciones del compensador, es decir, los niveles de carga y voltajes mínimos y máximos en donde el dispositivo opera de manera correcta, con estas limitaciones se puede confeccionar una carta de operación.

A modo de resumen, la figura 3.1 muestra un flujograma de las partes descritas en los párrafos previos.

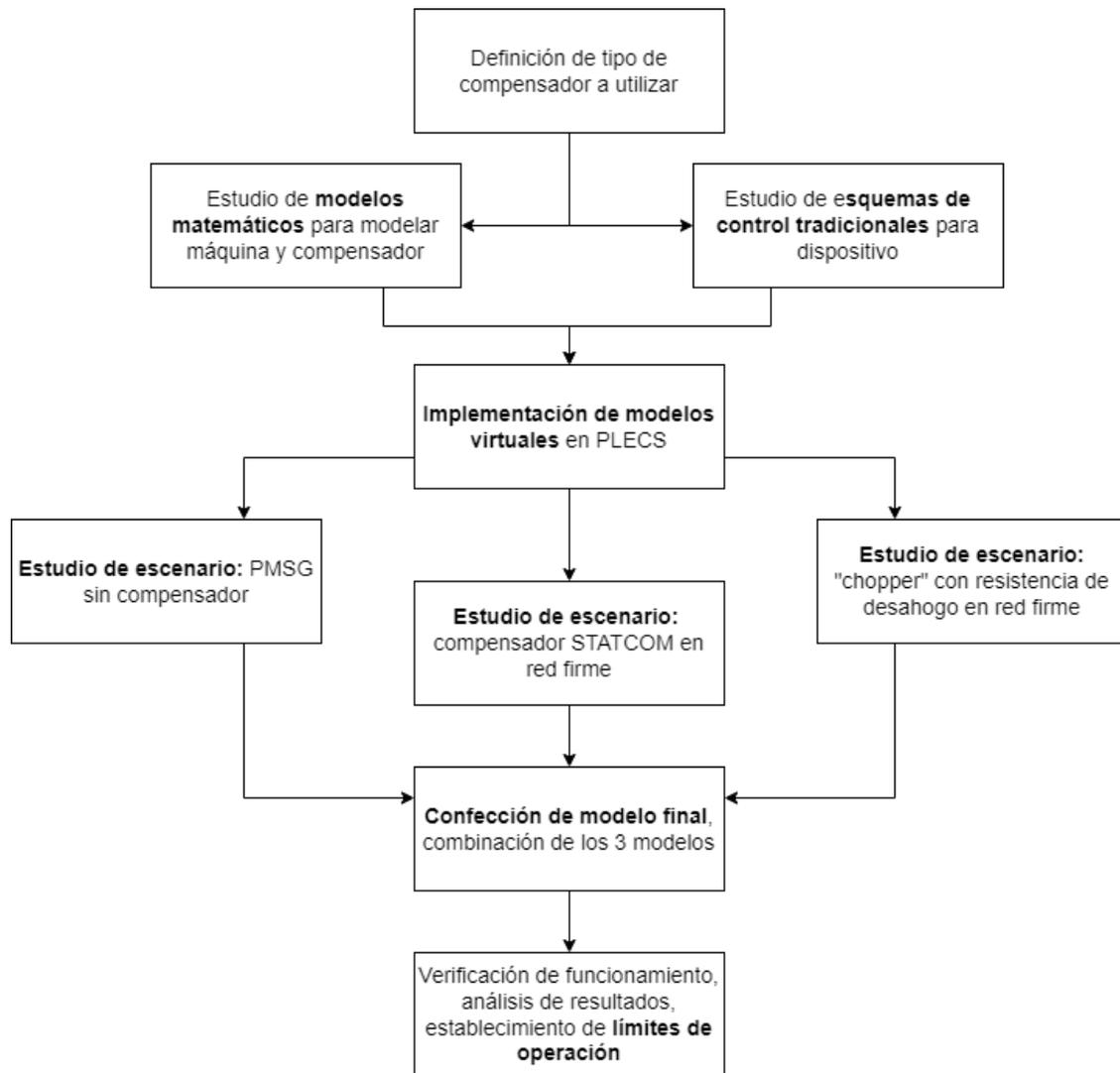


Figura 3.1: Diagrama de bloques de la metodología a seguir.

Capítulo 4

Simulaciones

El capítulo a continuación tiene el objetivo de resumir los aspectos más importantes de los escenarios virtuales que se llevaron a cabo para la validación de solución escogida. Se detallan los conceptos más relevantes para la comprensión de como se arma el dispositivo final, correspondiente al Controlador Electrónico de Carga (ELC).

4.1. Modelos virtuales

En esta sección se explica como se estructuran los distintos componentes que forman parte del dispositivo final, describiendo su funcionamiento, los valores de parámetros que son utilizados y los principios tanto físicos como matemáticos que permiten modelarlos.

4.1.1. Turbina Hidráulica

El modelo de la turbina hidráulica responsable del giro del rotor del generador, está basado en el que se describe en [31] y se encuentra implementado en el trabajo realizado en [5]. Para su construcción, es necesario definir algunos supuestos:

- No existe roce en las palas de la turbina.
- El fluido es incompresible.
- La potencia mecánica de la turbina es proporcional al producto del caudal y la altura del agua.

Con los supuestos definidos, se establecen cuales son las relaciones dinámicas que rigen en la estructura mecánica y en el sistema hidráulico de la turbina, las cuales se describen con detalle en [31] y son principalmente las que se muestran a continuación.

$$P_m = A_t H (Q - Q_{nl}) \quad (4.1)$$

$$\bar{H} = \left(\frac{\bar{U}}{G}\right)^2 \quad (4.2)$$

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{a_g}{L}(H - H_0) \quad (4.3)$$

$$\frac{\bar{U}}{\bar{H} - \bar{H}_0} = -\frac{1}{T_w s} \quad (4.4)$$

Donde, P_m corresponde a la potencia mecánica de salida, A_t la ganancia de la turbina, L el largo de las tuberías, T_w la constante de tiempo del agua, U la velocidad del agua y a_g la aceleración de gravedad. las variables H , Q y G son los valores normalizados de la altura neta del agua, el caudal y la apertura de la compuerta (inyector), sus valores van de 0 a 1 [p.u.] con este último siendo el máximo.

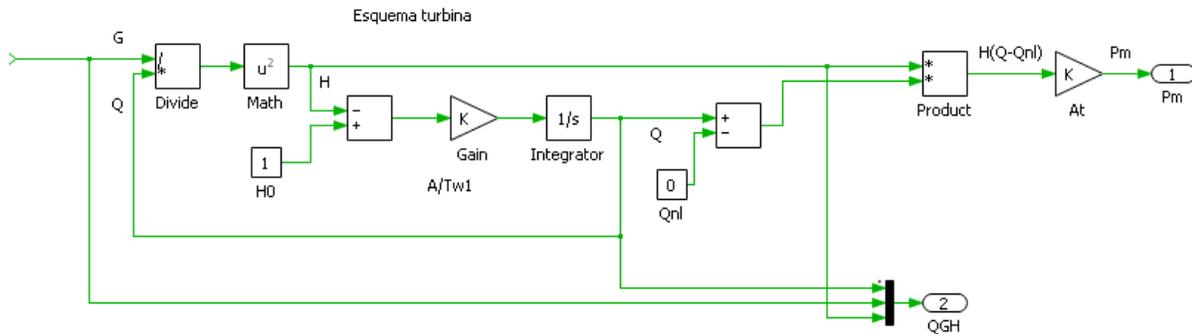


Figura 4.1: Implementación de turbina hidráulica en PLECS.

Junto al mecanismo hidráulico de la turbina, se encuentra el sistema del gobernador, que corresponde a una válvula que determina el área de apertura del inyector, lo que permite controlar el caudal de agua que mueve la turbina, esto a su vez permite tener un control sobre la velocidad de giro del rotor del generador y por ende en la frecuencia eléctrica de la señales trifásicas de voltaje que se generan.

El diagrama de bloques correspondiente al sistema del gobernador, esta compuesto por una función de transferencia que simula el comportamiento del servomotor del inyector, la entrada de esta función corresponde a la salida de un controlador PID que tiene como entrada una señal de error de frecuencia en función a un valor de referencia. la figura 4.2 muestra el sistema implementado en el software.

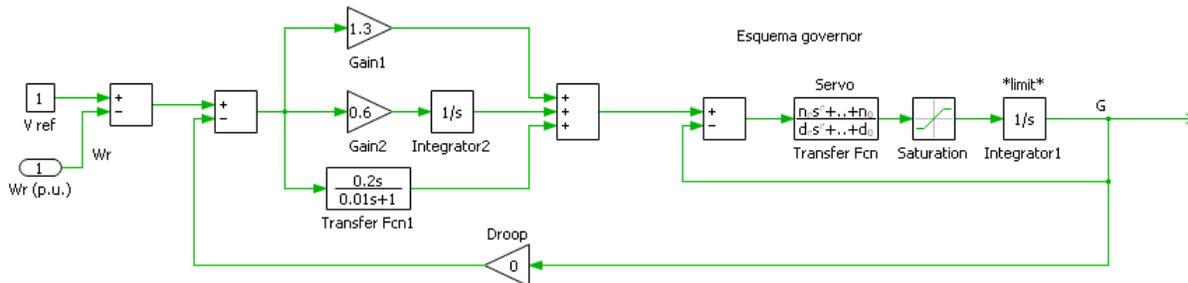


Figura 4.2: Implementación de sistema gobernador en PLECS.

Los parámetros del esquema de control corresponden a los que se presentan en [5] y se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 4.1: Parámetros y ganancias de diagrama de turbina hidráulica [5]

| Parámetro | Valor |
|--|------------------|
| Ganancia proporcional (K_p) | 1.3 |
| Ganancia integral (K_i) | 0.6 |
| Ganancia derivativa (K_d) | 0.2 |
| F. de transferencia servomotor (numerador) | 10/3 |
| F. de transferencia servomotor (denominador) | [0.07 1] |
| Saturación de servomotor [mín. máx.] | [-0.2 0.2] |
| Apertura del inyector [mín. máx.] | [0.01 0.975] |
| Ganancia de la turbina (A_t) | 1/(0.97518-0.01) |
| Ganancia A/T_ω | 1/0.08312 |

4.1.2. PMSG

Para simular el generador de imanes permanentes, se utiliza en bloque disponible en la librería del software que cumple esta función, este componente puede ser utilizado tanto como generador o motor, para definirlo, se debe establecer si la máquina tiene como entrada una señal eléctrica trifásica o un torque mecánico respectivamente.

Es importante ajustar los parámetros del PMSG, de tal manera de que las propiedades constructivas de este sean similares a las que se tienen en el laboratorio.

/El modelo eléctrico del generador se puede considerar como una fuente de tensión en serie con una resistencia y una inductancia en los ejes dq , el cual se basa en las relaciones del modelo matemático del PMSG descrito en las ecuaciones 2.3 y 2.4 en una sección previa. El modelo electromecánico se basa en las ecuaciones 2.5 a 2.9 y permite acoplar el sistema eléctrico a la turbina hidráulica. La figura 4.3 muestra el circuito equivalente del modelo eléctrico utilizado por PLECS.

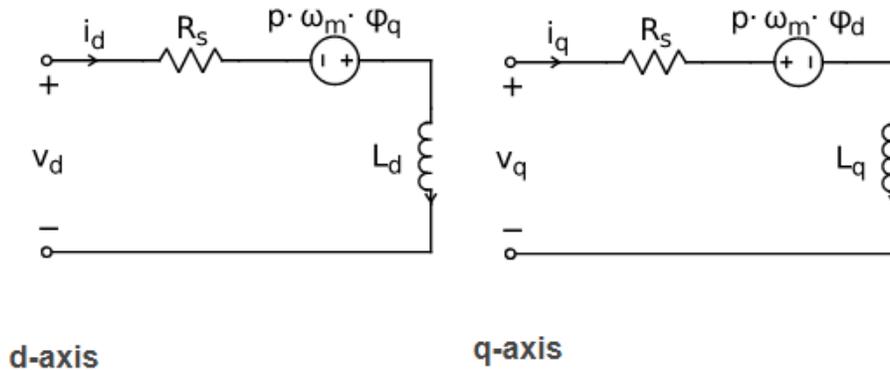


Figura 4.3: Modelo eléctrico de PMSG en PLECS.

Los parámetros p , ω_m , Φ_i , corresponden al número de pares de polos, la velocidad angular del rotor y el flujo magnético respectivamente, donde i es el índice que representa el eje de d o q .

Para su implementación en software, es necesario disponer de un sistema mecánico capaz de proporcionar un torque a la máquina, lo que se puede lograr utilizando el componente de torque

controlado, el cual recibe una señal proveniente del esquema de la turbina hidráulica que se describió anteriormente, con esto, se puede conectar el bloque PMSG a un sistema trifásico con carga y de esta manera, la máquina actúa como generador.

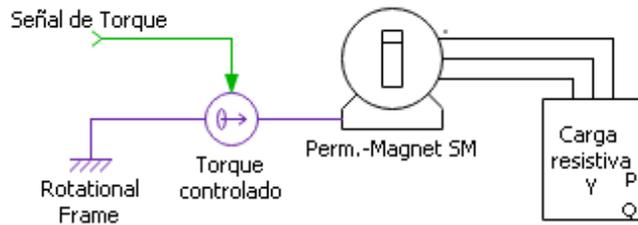


Figura 4.4: Ejemplo de conexión de bloque PMSG en PLECS.

Los tabla 4.2 a continuación muestra los parámetros constructivos del generador que se utilizan para la simulación.

Tabla 4.2: Parámetros constructivos del PMSG.

| Parámetro | Valor |
|--|--------------------|
| Resistencia de armadura (R_s) | 0.326 [Ω] |
| Inductancia de armadura (ejes dq , L_d L_q) | 6.88 [mH] |
| Flujo magnético de imanes (Ψ_m) | 0.858 [Wb] |
| Número de pares de polos | 4 |
| Momento de inercia del rotor (J) | 0.106 [Kgm^2] |

Además de las características constructivas, también es posible modificar los aspectos dinámicos del generador, en particular, se pueden escoger las condiciones como la velocidad y posición inicial del rotor y las corrientes iniciales en la armadura, de esta forma, se evita simular parte del régimen transitorio de la máquina en la simulación.

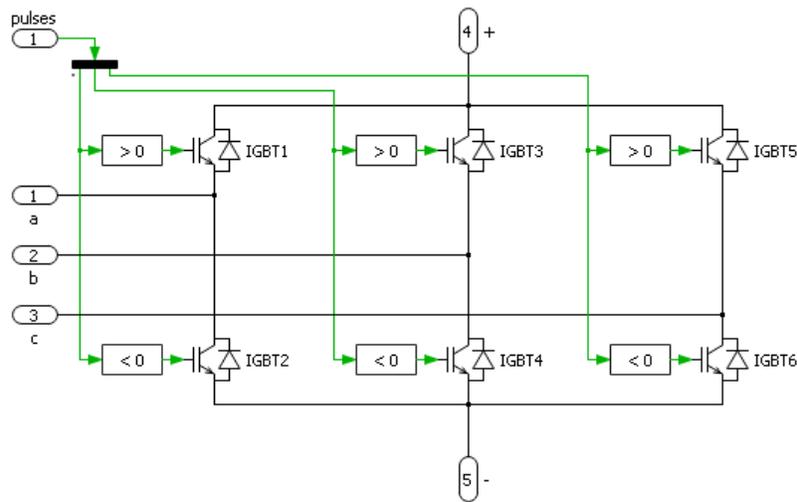
Tabla 4.3: Condiciones iniciales del PMSG.

| Variable | Valor inicial |
|---|---------------|
| Posición del rotor (θ_0) | 0 [rad] |
| Velocidad del rotor (ω_0) | 78.54 [rad/s] |
| Corriente de armadura (ejes $\alpha\beta$ [$i_{\alpha 0}$ $i_{\beta 0}$]) | [45 0] [A] |

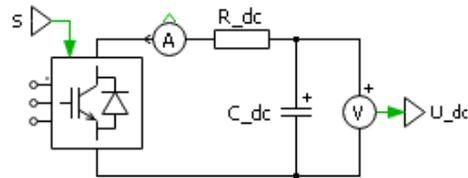
4.1.3. Compensador estático de reactivos (STATCOM)

El circuito correspondiente al este dispositivo consiste en un puente IGBT con diodos en anti-paralelo de dos niveles, el cual se conecta a un capacitor por el lado DC y al sistema eléctrico trifásico por el lado AC. Los efectos térmicos en los transistores y las pérdidas en los diodos se consideran despreciables para este modelo, pero son ajustables en los parámetros del bloque que ofrece PLECS.

El capacitor del lado DC cuenta con una resistencia en serie para controlar los tiempos de descarga de este.



(a) Puente IGBT.



(b) componentes bus DC.

Figura 4.5: Esquema básico de STATCOM.

La entrada *pulses* es donde se conecta la salida del modulador PWM asociado al esquema de control del STATCOM, corresponden a 3 señales de pulsos con valores -1 o 1 que corresponden al apagado y encendido de los transistores respectivamente, se utilizan bloques lógicos que permiten traducir las señales a 0's y 1's.

Los valores de los componentes utilizados para las simulaciones corresponden a los que se muestran en la tabla 4.4 a continuación.

Tabla 4.4: Parámetros del bus DC del STATCOM

| Parámetro | Valor |
|---------------------------------|------------------|
| Capacitor bus DC (C_{DC}) | 8 [mF] |
| Resistencia bus DC (R_{DC}) | 0.1 [Ω] |

4.1.3.1. Diagrama de control

El diagrama implementado para esta experiencia corresponde al que se muestra en la figura 4.6, el cual corresponde a una aplicación de un esquema típico que se utiliza en convertidores DC-AC (figura 2.14), con la particularidad de generar las referencias de corrientes i_d e i_q a partir de los voltajes DC y AC del PCC en lugar de potencia activa y reactiva respectivamente.

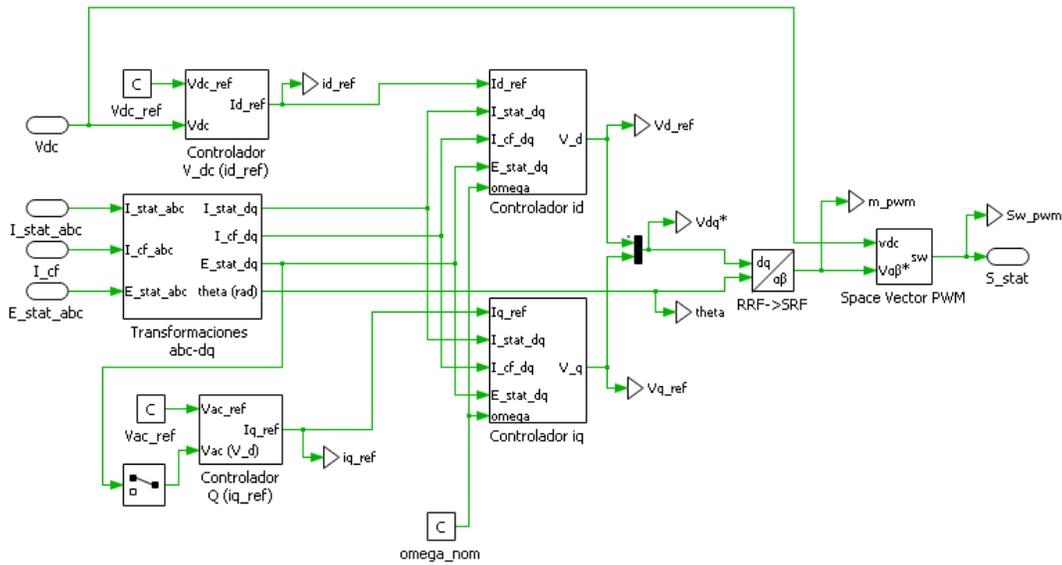


Figura 4.6: Diagrama de control de voltaje implementado.

Los valores y conexiones del lazo de control interno se diseñan de tal manera que exista una consistencia con las leyes de Kirchoff del circuito, además considera ganancias relacionadas con amortiguamiento activo de la resonancia del filtro y el acople que existe entre los ejes directo y de cuadratura.

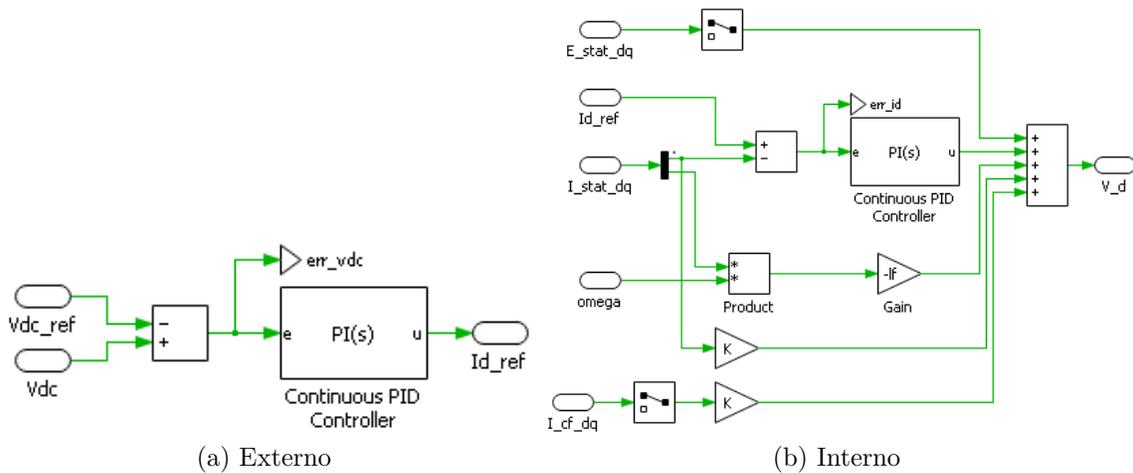


Figura 4.7: Lazos de control del eje directo.

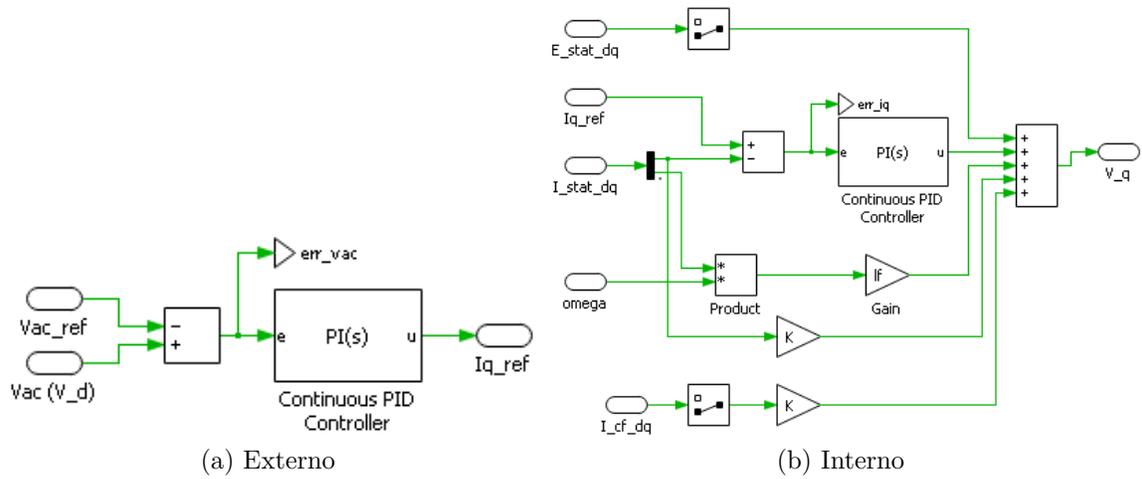


Figura 4.8: Lazos de control del eje de cuadratura.

4.1.3.2. Diseño de filtro LCL y amortiguamiento pasivo

Es necesario disponer de un filtro en el lado AC del convertidor para poder obtener señales sinusoidales a partir de señales cuadradas, se opta por el uso de uno tipo LCL dadas las ventajas de estos sobre los tipo L explicadas en el capítulo de antecedentes (sección 2.5.5).

El diseño de los parámetros se basa en la metodología descrita en [27, 28], en donde estos son seleccionados considerando la minimización de pérdidas en los componentes, la reducción de la distorsión armónica total (THD) de las señales obtenidas, al igual que la atenuación y resonancia.

Para el diseño del filtro, es necesario considerar algunas restricciones;

- (a) El valor de la capacitancia del filtro debe estar limitado por las pérdidas en potencia reactiva, este valor no debería superar el 5% de la capacitancia de base del sistema.
- (b) El valor total de la inductancia del filtro no debería superar los 0.1 [p.u.], de esta manera se evitan caídas considerables de voltaje AC entre el convertidor y la red.
- (c) La frecuencia de resonancia debe ubicarse entre el ancho de banda del controlador de corriente (lazo externo) y la mitad de la frecuencia de *switching* del convertidor (frecuencia de onda *carrier* en el modulador PWM).
- (d) El amortiguamiento pasivo o activo que se utilice debe ser lo suficientemente efectivo para evitar oscilaciones de las señales generadas.

Los pasos a seguir para el diseño corresponden a los siguientes:

1. Selección del rizado del lado del convertidor deseado para determinar inductancia L, alternativamente seleccionarla de tal manera que esta posea aproximadamente un 80% del THD total.

$$i_{hl} \approx 0.022 \frac{V_{DC}}{f_{sw} L_r} \quad (4.5)$$

Donde i_{hl} corresponde a la corriente armónica a través de la inductancia L (a elección), V_{DC} el voltaje en el lado DC del convertidor y f_{sw} la frecuencia de *switching* del inversor. Luego $L = L_b \cdot L_r$ con L_b la inductancia base del sistema.

La selección de la inductancia L_g se hace a partir de una constante de proporción “ r ”, relacionado con la variación de la frecuencia de resonancia. Típicamente se escoge $r \gg 1$ para dar robustez al sistema.

$$\frac{df_{res}/f_{res}}{dL_g/L_g} = -\frac{1}{2} \frac{1}{1+r} \quad (4.6)$$

- Selección de absorción de potencia reactiva en el filtro para determinar capacitancia *shunt* C_f .

$$C_f = xC_b \quad (4.7)$$

Con C_f la capacitancia del filtro, C_b la capacitancia base del sistema y “ x ” un porcentaje igual o menor a 5% dada la restricción (a).

- Verificar el nivel de atenuación con el valor de r seleccionado:

$$Atenuacion = \frac{i_g(j\omega_{sw})}{i(j\omega_{sw})} = \frac{1}{|1+r(1-ax)|} \quad (4.8)$$

Con $a = LC_b\omega_{sw}^2$, luego $L_g = L \cdot r$. La inductancia equivalente $L_{eq} = L + L_g$, debe ser tal que se cumpla la restricción (b).

- Verificar el cumplimiento de la restricción (c) de la frecuencia de resonancia, en caso de no cumplirla, se puede cambiar el porcentaje de absorción de potencia activa del condensador (paso 2) o la atenuación (paso 3).
- En caso de que la atenuación no sea la adecuada, se repiten los pasos 2 y 3 con nuevos valores.

Para elegir un valor adecuado de resistencia para el amortiguamiento activo, primero se calcula el valor mínimo de esta de tal forma que los efectos sean notables, para esto se utiliza la ecuación descrita en [28];

$$R_{dmin} = \frac{1}{3} f_{sw} \frac{L_g^2}{(L + L_g)} \quad (4.9)$$

Una vez obtenido este valor, se opta por una valor superior o igual, considerando que a mayor nivel de resistencia, mayor es la pérdida de potencia activa del sistema.

Los valores obtenidos para cada parámetro corresponden a los de la tabla 4.5, adicionalmente en el anexo (A) se puede encontrar una implementación en código para el diseño del filtro.

Tabla 4.5: Parámetros del filtro LCL

| Parámetro | Valor |
|--|------------|
| Inductancia lado convertidor (L) | 1.9 [mH] |
| Inductancia lado red (L_g) | 2.9 [mH] |
| Capacitancia del filtro (C_f) | 4.822 [uF] |
| Resistencia del filtro (R) | 0.1 [ohm] |
| Resistencia de amortiguamiento (R_d) | 11.5 [ohm] |

4.1.3.3. Ganancias de controladores PI

Los parámetros de los controladores internos del sistema (corriente), se diseñan con el objetivo de lograr un factor de amortiguamiento típico $\zeta_{lf} = 0.707$ para un 4% de *overshoot*, en [28] se establecen las siguientes ecuaciones:

$$K_p = \frac{L_{eq}}{3T_{sw}} \quad (4.10)$$

$$T_i = \frac{L_{eq}}{R_{eq}} \quad (4.11)$$

Donde $T_s = \frac{1}{f_{sw}}$ corresponde al periodo de *switching* y $R_{eq} = R + R_g$ la resistencia equivalente del convertidor, considerando las resistencias del filtro (despreciables en algunos casos). La ganancia integral se determina a partir de la proporcional según la relación $K_i = \frac{K_p}{T_i}$. Cabe mencionar que el factor $\frac{1}{3}$ en la ganancia proporcional es modificable en caso de que no se obtengan los resultados deseados a costo de una variación en el *overshoot*.

El ancho de banda del controlador corresponde a $\omega_{bw} = \frac{K_p}{L_{eq}}$.

En cuanto a los parámetros de los controladores del lazo externo (voltaje AC y bus DC), se establecen de tal manera de que la acción controladora sea más lenta que la del lazo interno, para el caso de este estudio, se considera 100 veces más lenta ($K/100$).

La tabla 4.6 a continuación muestra los valores de las ganancias utilizadas, los valores corresponden tanto para la componente directa como la de cuadratura.

Tabla 4.6: Ganancias PI de controlador STATCOM

| Ganancia | Valor |
|-----------------------------------|--------|
| Proporcional interna (K_{pi}) | 11.86 |
| Integral interna (K_{ii}) | 400 |
| Proporcional externa (K_{pe}) | 0.1186 |
| Integral externa (K_{ie}) | 4 |

Cabe mencionar que los valores que se utilicen para el modelo pueden ser modificados en medidas pequeñas de tal forma de corregir o mejorar las respuestas del sistema.

4.1.4. Cortador de corriente/*Chopper*

El sistema *chopper* que se utiliza para este caso, consiste en la replicación del trabajo realizado en [24], donde se dispone de una resistencia de desahogo en serie a un interruptor IGBT en paralelo al bus DC del compensador tipo STATCOM.

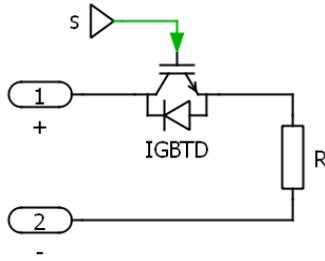


Figura 4.9: Esquema básico de *chopper* con IGBT.

4.1.4.1. Diagrama de control

El esquema de control que se muestra en la figura 4.10 se basa en generar una corriente promedio en la resistencia de desahogo y de esta manera consumir parte de la potencia del sistema. A partir de una referencia de potencia, se genera una señal de error que es controlada por un controlador PI en conjunto con un bloque PWM para generar los pulsos en el interruptor IGBT y en consecuencia obtener una corriente discontinua que genera el consumo deseado. Se puede utilizar un controlador PI adicional para generar la referencia anterior a partir de un nivel de generación deseado en el generador, de esta manera se puede controlar la generación total.

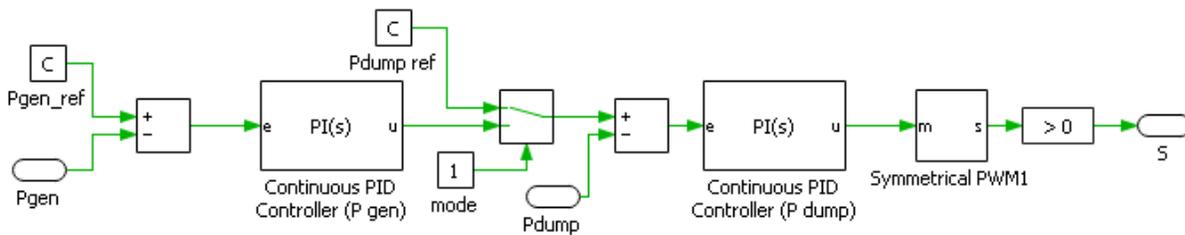


Figura 4.10: Controlador del *chopper* en sistema estable.

El bloque interruptor del esquema mostrado en la figura 4.10 permite elegir si el control es sobre el consumo en la resistencia o sobre la potencia generada total.

La siguiente tabla muestra las ganancias PI utilizadas en este controlador para las simulaciones.

Tabla 4.7: Ganancias PI de controlador del *chopper*.

| Ganancia | Valor |
|--------------------------|-------|
| Proporcional P. desahogo | 0.1 |
| Integral P. desahogo | 50 |
| Proporcional P. generada | 0.1 |
| Integral P. generada | 10 |

4.2. Escenarios de simulación

Para poder montar correctamente el controlador electrónico, se verifica el correcto funcionamiento de las distintas partes del sistema eléctrico por separado, en particular es necesario corroborar

el correcto funcionamiento de sus 3 componentes principales de forma aislada, de esta manera, resulta más sencillo detectar problemas y corregirlos. por una parte está generador cuando no se encuentra sujeto a ningún tipo de control que afecte a su comportamiento, por otro el compensador estático de reactivos o STATCOM ante un sistema eléctrico estable, y por último el sistema *Chopper* con resistencia de desahogo ante una generación de potencia estable.

4.2.1. PMSG sin controlador

Para esta simulación se considera un generador de imanes permanentes con características constructivas similares a las del generador real del laboratorio, el objetivo de esta simulación es verificar el correcto funcionamiento del governor ante distintas cargas resistivas además de el análisis de los niveles de voltaje efectivo que se obtienen cuando no existe ningún tipo de compensación.

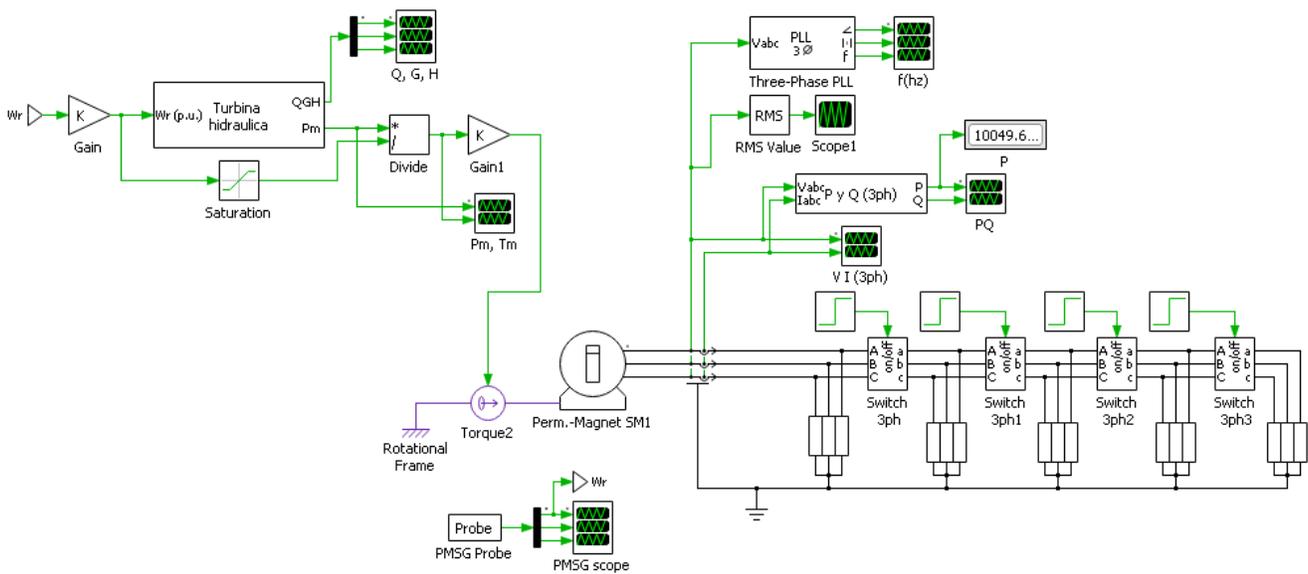


Figura 4.11: Escenario de simulación: PMSG sin controlador.

La figura 4.11 muestra el escenario de simulación construido para este estudio, consta del sistema hidráulico, compuesto por la turbina y el governor, el PMSG del laboratorio y varias cargas resistivas conectadas en paralelo mediante switches activados en distintos instantes.

El medidor trifásico permite obtener los voltajes y corrientes instantáneas en bornes del generador y con estas la potencia, frecuencia, amplitud y ángulo de voltaje usando un bloque PLL.

4.2.2. STATCOM en sistema eléctrico estable

Esta simulación pretende verificar el correcto funcionamiento del sistema de control del compensador ante un alza o baja del voltaje, para esto se hace uso de un sistema eléctrico trifásico con un generador ideal de voltaje controlable, se busca que la tensión del punto de acople del compensador se mantenga en los niveles nominales de $220 [V_{rms}]$.

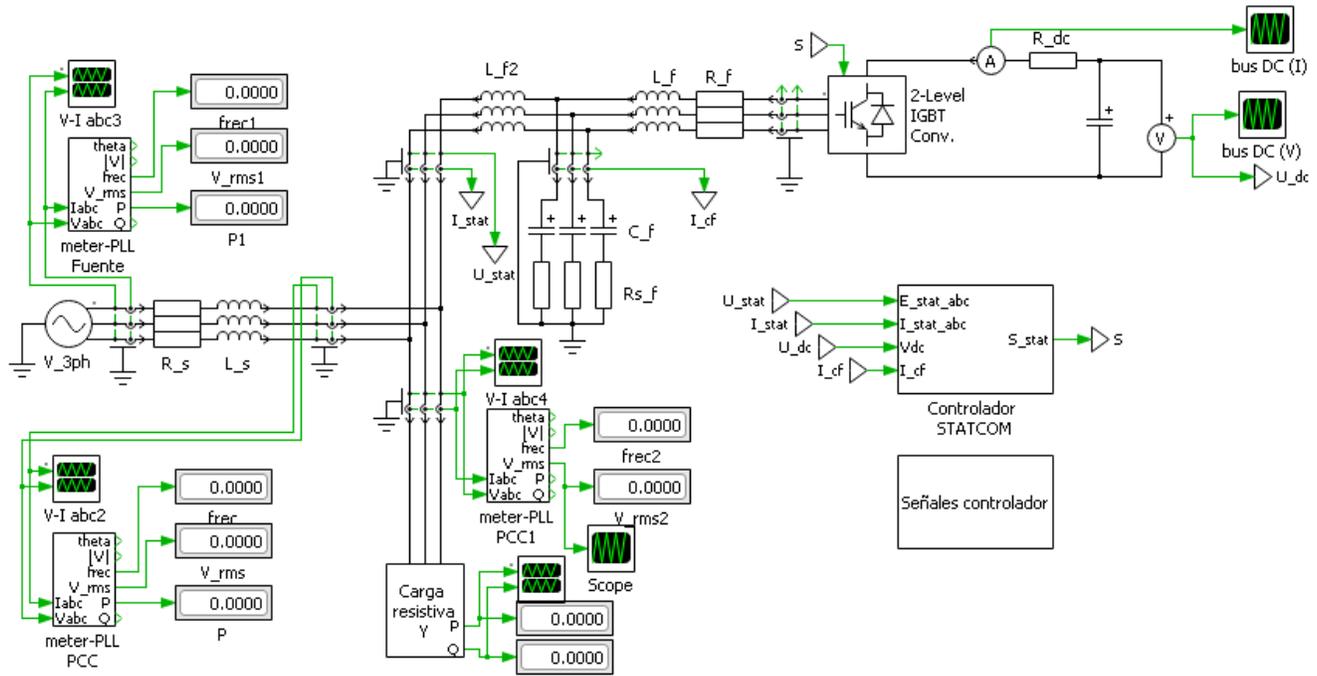


Figura 4.12: Escenario de simulación: STATCOM en sistema estable.

La figura 4.12 muestra el esquema de conexiones que se utiliza, una parte de este consta en una fuente ideal atrás de resistencias e inductancias lo que permite modelar un generador real, el cual tiene una potencia de inyección limitada y es susceptible a cambios en sus niveles de voltaje a causa de las cargas del sistema.

Para encontrar un punto de operación adecuado, es necesario configurar tanto los voltajes de referencia como los parámetros de los controladores PI, específicamente las ganancias proporcionales y integrales de cada uno, con el objetivo de que se restablezca el voltaje nominal en un tiempo relativamente corto y con poca oscilación (se busca que el voltaje converja amortiguadamente a 1[p.u]). También se analiza el funcionamiento del compensador al variar los niveles de referencia, es decir los niveles de tensión del bus DC y del PCC en AC para establecer cuales son las limitaciones del dispositivo, a partir de esto es posible establecer un rango de voltajes donde el STATCOM funciona adecuadamente.

Existen además otras variables de interés en este estudio, en particular, se puede analizar la potencia activa y reactiva proveniente del STATCOM para corroborar que la inyección de reactivos al sistema se refleja en la tensión de este, se pueden estudiar los niveles de corriente de los dispositivos y ajustar el control de tal manera de que no se alcancen valores muy altos, los cuales podrían comprometer componentes del dispositivo, por último, se puede estudiar la contaminación armónica de las tensiones resultantes, ya que está también puede poner en riesgo al dispositivo cuando se alcanzan valores muy altos.

4.2.3. *Chopper* de potencia activa en sistema eléctrico estable

En este escenario se busca obtener un adecuado funcionamiento del controlador del puente IGBT del recortador, este se encuentra conectado en paralelo al condensador del bus DC del STATCOM, y permite que los excesos de potencia generados en la turbina hidráulica puedan ser evacuados a

través de la resistencia de desahogo y no de la carga primaria.

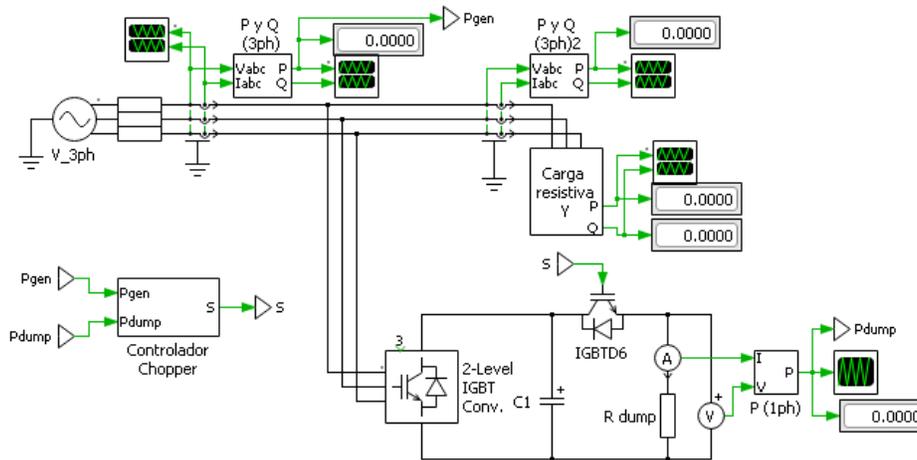


Figura 4.13: Escenario de simulación: *Chopper* en sistema estable.

La figura 4.13 muestra el esquema de conexiones que se usa para la prueba, consta de una conexión de una carga resistiva trifásica a una red firme que simula el comportamiento de un PMSG funcional, en paralelo se dispone un puente IGBT, el cual no recibe ninguna señal de modulación para operar como inversor, por lo que funciona como un rectificador trifásico de onda completa. En el lado DC se conecta la configuración de componentes del *chopper* en paralelo a un condensador que mantiene el voltaje DC en sus terminales (el cual corresponde al del STATCOM en el modelo final).

Se busca lograr que se alcancen los niveles de potencia deseados en la resistencia a partir de la modulación PWM y así analizar la distribución de potencia total proveniente del generador. Es importante analizar también los niveles de corriente que se obtengan en el *Chopper* dado que valores muy altos pueden comprometer el equipo.

4.2.4. PMSG con ELC

Este escenario corresponde a la prueba conceptual de la implementación real del dispositivo en el laboratorio, consiste en la combinación de los escenarios anteriores. El objetivo es verificar la correcta regulación de voltaje en el punto de conexión del controlador ELC al igual que el control sobre la potencia de desahogo para excesos de potencia. La figura 4.14 muestra el esquema general de conexión de los componentes

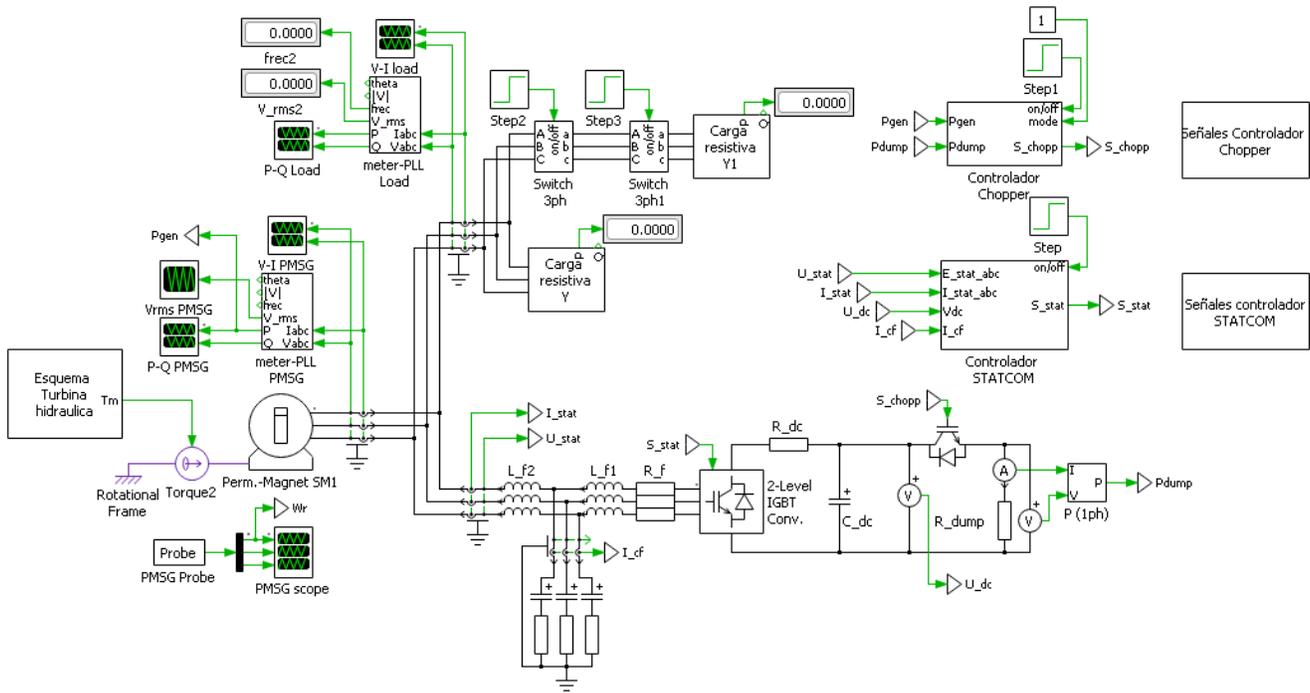


Figura 4.14: Escenario de simulación: PMSG con controlador de voltaje y carga.

Para determinar si el controlador funciona de manera apropiada, se estudian los niveles de voltajes y potencia alcanzados en regímenes permanentes de la máquina y ante cambios en los niveles de carga primaria y referencias del esquema de control. Además de las señales anteriores, también se determinan los aportes reactivos del compensador, los efectos en la frecuencia del sistema y la operación del generador junto a la turbina hidráulica.

Una consideración a tener en cuenta en este escenario es que los parámetros de componentes y ganancias de controladores pueden diferir en medidas pequeñas con los de los modelos independientes, esto a causa de algunas correcciones para la compatibilidad de los modelos (ver anexo B).

Capítulo 5

Resultados y análisis

5.1. PMSG sin controlador

En primera instancia, se verifica la correcta inyección de potencia activa del generador a las cargas que se conectan a él, se busca que exista una generación constante y que sea capaz de alimentar distintos tipos de carga que se encuentren dentro de su rango de operación (menor a 11 [kW] nominales). La figura 5.1 muestra los niveles de potencia generados cuando se conectan y desconectan cargas de 1 [kW] (a 220 [V]), en particular, se conecta una carga al segundo 20, luego se conectan 3 cargas al segundo 40 y finalmente se desconecta una carga al segundo 60 y 80.

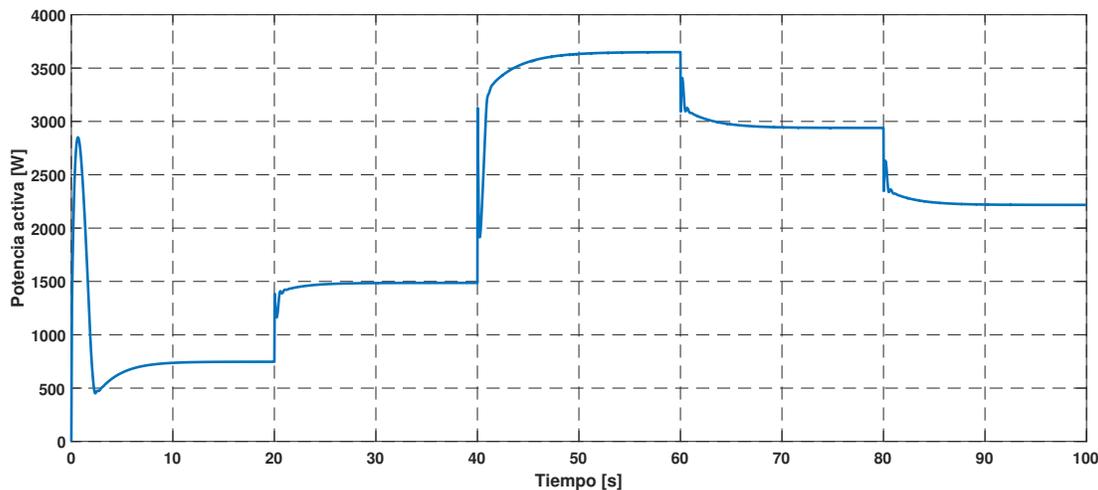


Figura 5.1: Potencia activa del PMSG ante variación de carga.

Ante los cambios en los niveles de la carga, es esperable que la máquina reaccione para suplir dichos consumos, por lo que se espera que los valores de caudal y apertura de las válvulas de la turbina eléctrica cambien para generar más o menos torque eléctrico según se necesite. la figura 5.2 muestra dichos cambios en valores normalizados (de 0 a 1 en sistema por unidad, con valor 1 siendo el máximo).

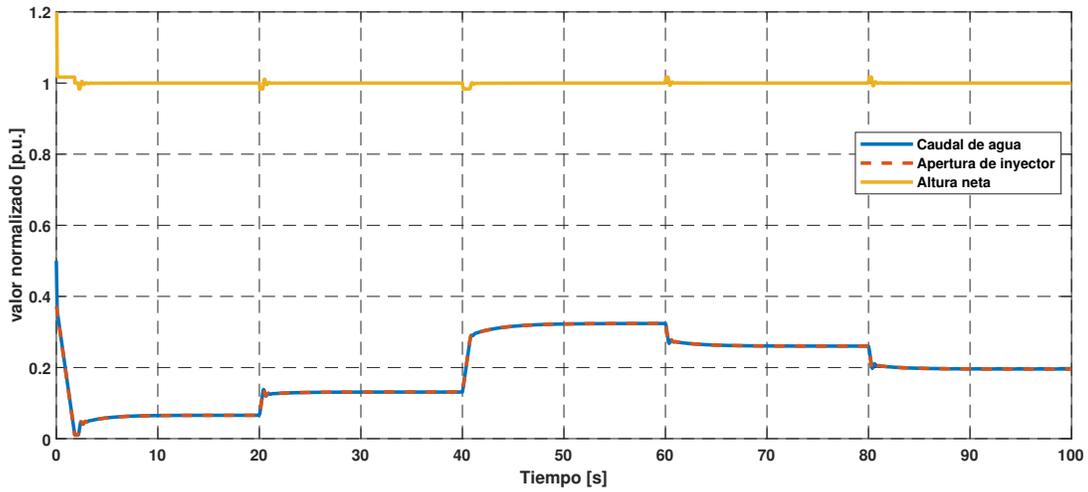


Figura 5.2: Niveles de caudal, altura neta y apertura de inyector de la turbina hidráulica ante variación de carga.

De los gráficos se desprende que para los valores de potencia con los que se está trabajando, la turbina es capaz de moverse dentro de sus rangos de operación, sin alcanzar ningún nivel máximo o de saturación, lo que se traduce en una entrega de potencia adecuada.

En cuanto a los niveles de tensión y frecuencia que se obtienen en este escenario, se puede apreciar su evolución en la figura 5.3 a continuación.

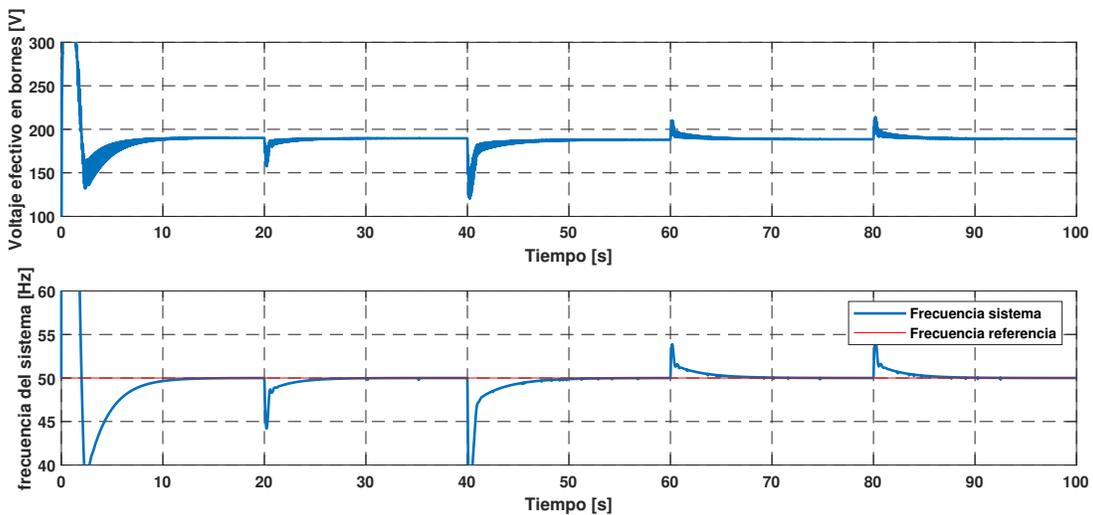


Figura 5.3: Tensión y frecuencia del sistema ante variación de carga.

Se observan una tensión y frecuencia estable durante los regímenes permanentes del sistema (20 segundo entre la desconexión/conexión de una carga) y una variación de relativamente corta duración en los transitorios, que se asocia a los cambios de la turbina para regular la velocidad del rotor. Si bien la frecuencia llega al valor nominal de 50 [Hz], la tensión no alcanza los 220 [V] de una red típica de bajo voltaje, por lo que la acción reguladora del compensador que se emplea debe ser mayoritariamente de subida de voltaje.

Posteriormente se estudia el comportamiento del generador y la red cuando los niveles de carga aumentan hasta superar la potencia nominal del PMSG, es necesario considerar que la potencia a la que se someterá la carga dependerá de los niveles de voltaje del sistema dada la relación $P = \frac{V^2}{R}$.

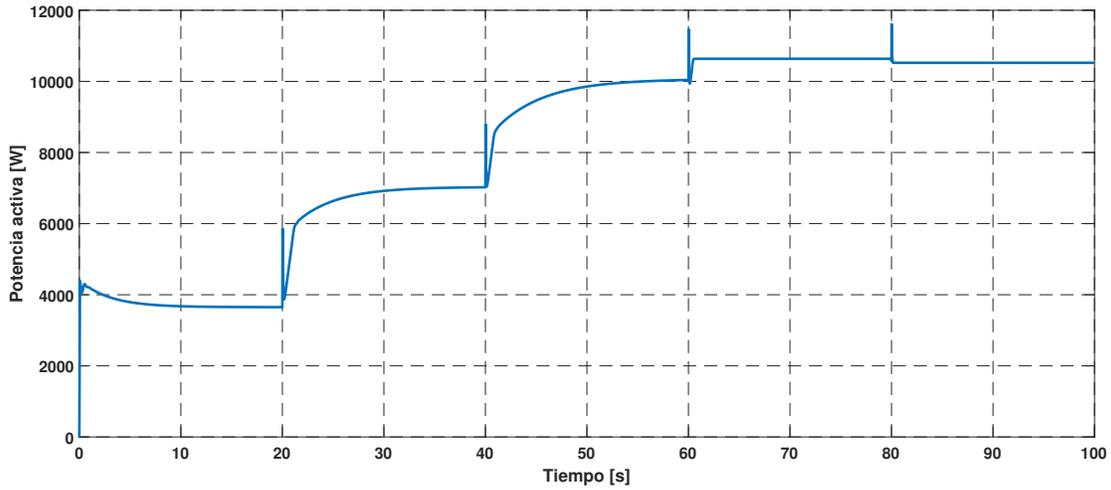


Figura 5.4: Potencia activa del PMSG ante variación de carga, incremento hasta saturación.

En la figura 5.4 se puede ver como el incremento de potencia del generador es proporcional a los valores de resistencia de las cargas a medida que se agregan a la red, sin embargo cuando se llegan a valores cercanos a los 11 [kW] nominales del PMSG, la adición de carga no provoca un aumento en la generación, se observa además que si se sigue aumentando la carga, la generación se ve disminuida.

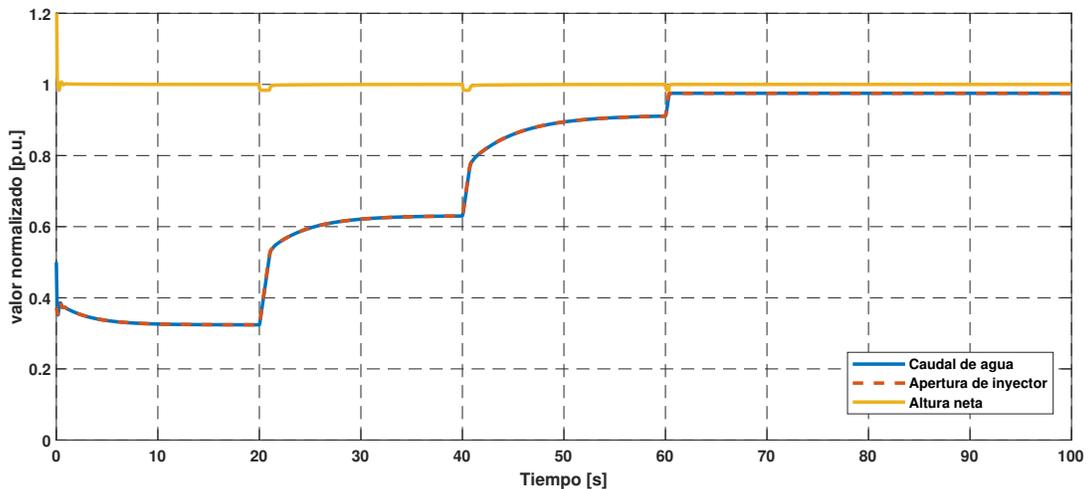


Figura 5.5: Niveles de caudal, altura neta y apertura de inyector de la turbina hidráulica, incremento hasta saturación.

La figura 5.5 señala que ante este escenario, los niveles de caudal y apertura del inyector alcanzan sus valores máximos, por lo que no se puede seguir aportando torque mecánico para generar la

potencia eléctrica necesaria para alimentar las cargas resistivas.

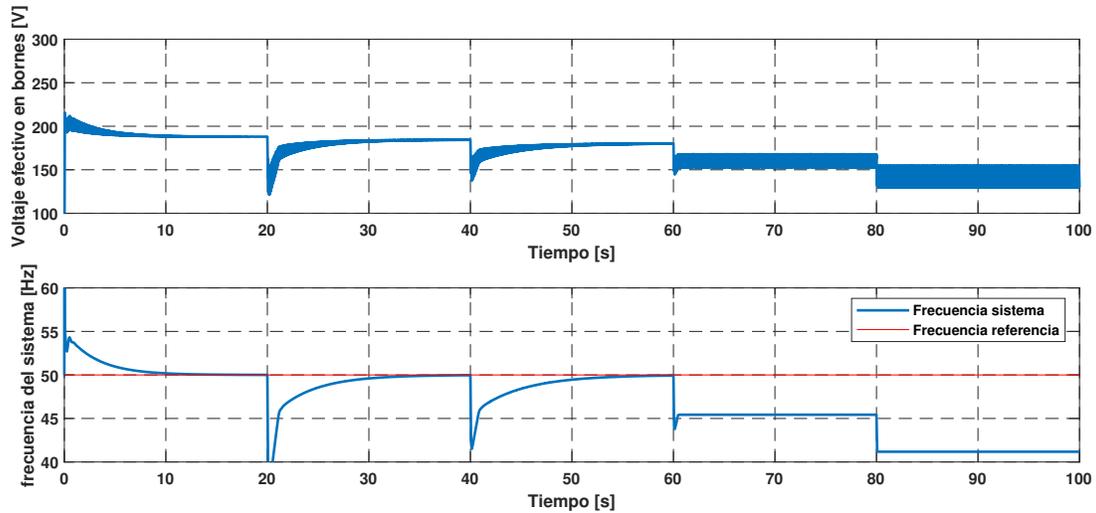


Figura 5.6: Tensión y frecuencia del sistema ante PMSG saturado.

Las curvas de la figura 5.6 indican que tanto el voltaje como la frecuencia del sistema caen cuando se superan los niveles nominales, la caída de tensión se ve reflejada en la caída de potencia eléctrica generada y la caída de frecuencia indica que la máquina pierde velocidad rotacional.

Estos comportamientos se deben principalmente a 2 factores, en primer lugar a relación de potencia y frecuencia dada por la ecuación del Swing (ecuación 2.14), que explica el frenado de la máquina a causa del fallo del sistema del gobernador para regular el giro del rotor y en segundo lugar a la expresión característica del generador de imanes permanentes (ecuación 2.3 y 2.4), como existe una reducción en la velocidad del rotor de la máquina, la variación del flujo magnético $\frac{d\Psi}{dt}$ también se ve reducida y en consecuencia el voltaje del que se genera en bornes disminuye, efecto que explica la disminución en la potencia activa vista en curva de la figura 5.4.

5.2. STATCOM en red firme

El correcto funcionamiento del compensador se determina por su capacidad para llevar la tensión del PCC a 220 [V], que corresponde al nivel nominal en un sistema de baja tensión. La figura 5.7 indica el nivel de voltaje en el punto de conexión ante una disminución del voltaje de la fuente ideal.

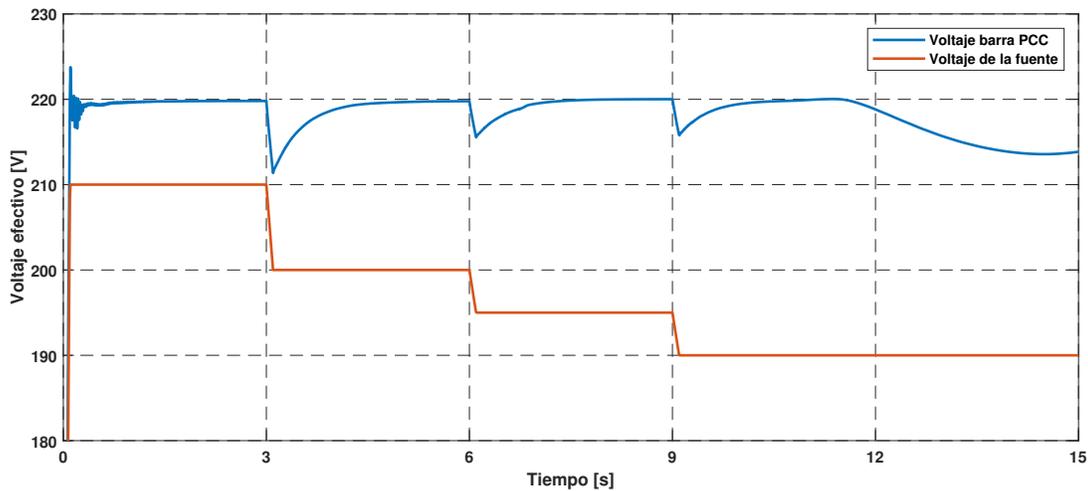


Figura 5.7: Voltaje efectivo en barra de conexión del compensador.

De la curva del voltaje en el PCC se desprende que el restablecimiento se logra hasta ciertos niveles de voltaje de manera controlada, se observa que si la tensión cae 30[V] el convertidor comienza a ser insuficiente. Otro aspecto a notar es que mientras mayor sea la variación en la tensión, el tiempo de restablecimiento incrementa en medidas pequeñas, para variaciones entre 10 y 5 [V], se observa un periodo de estabilización de aproximadamente 1[s]

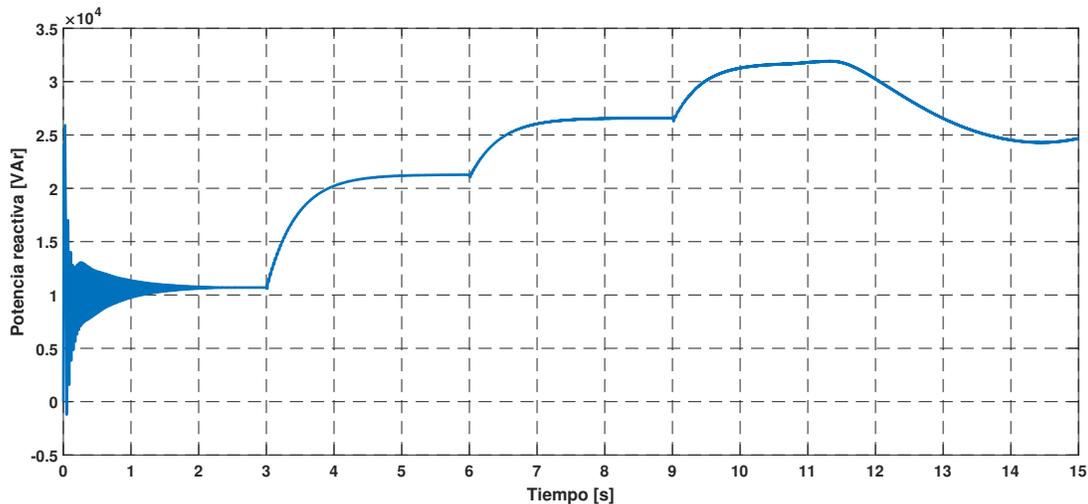


Figura 5.8: Potencia reactiva generada/consumida por el compensador.

Como se trata de una caída de tensión, el comportamiento del STATCOM debe ser tal que este inyecte una cantidad específica de potencia reactiva a la red, lo que se puede apreciar en la curva de la figura 5.8, donde se observan valores positivos del orden de 10^4 [VAr], o 10 [KVAR] (los valores positivos corresponden inyección de potencia dado el sentido de los medidores de corriente hacia afuera del compensador).

Para poder inyectar una cantidad de reactivos adecuada, es necesario que la tensión en el lado DC del conversor sea estable, de esta manera, el modulador del sistema de control puede generar

el nivel necesario de voltaje en el lado AC y mediante la relación 2.11 regular la transferencia de potencia.

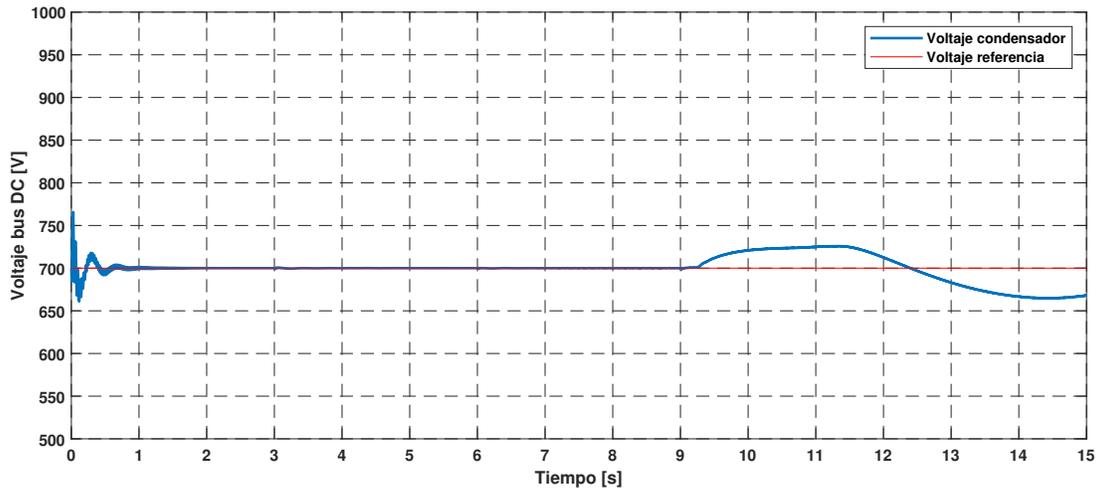


Figura 5.9: Voltaje en condensador del bus DC.

La curva de la figura 5.9 muestra la evolución temporal del voltaje en el condensador, el cual se mantiene estable hasta que se alcanza la diferencia de 30 [V] mencionada anteriormente, se observa un incremento y luego una disminución.

Es útil analizar las señales de referencia que se obtienen en el controlador al momento que falla la regulación, las figuras 5.11 y 5.10 a continuación muestran las referencias de corriente y voltaje de los lazos de control externo e interno respectivamente.

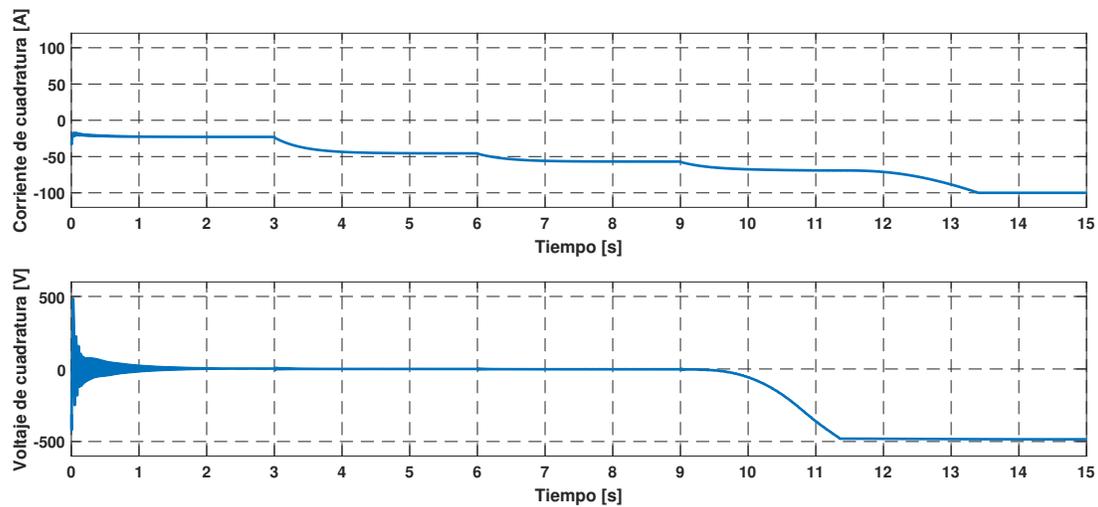


Figura 5.10: Voltaje y corriente de referencia en eje de cuadratura (controlador).

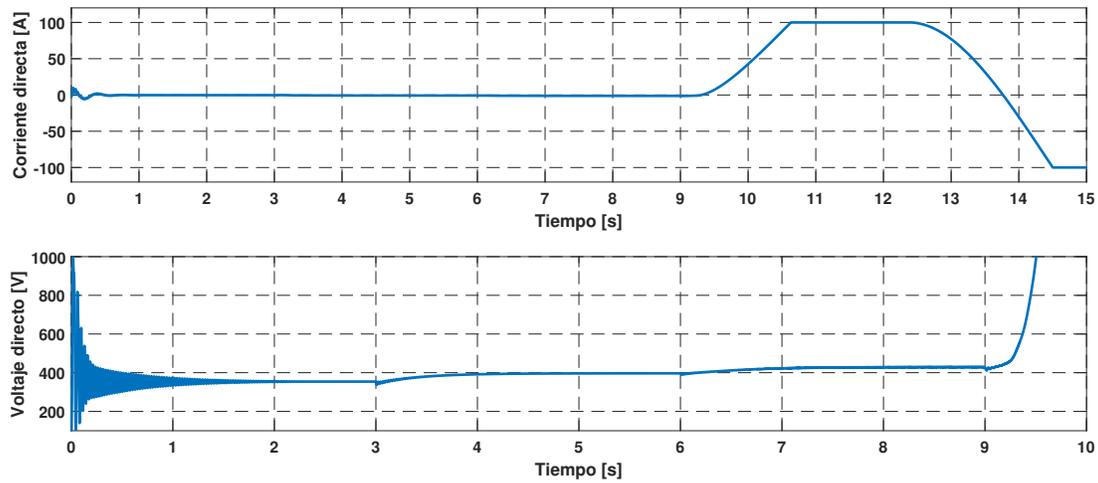


Figura 5.11: Voltaje y corriente de referencia en eje directo (controlador).

La desestabilización del voltaje DC puede ser explicado por el cambio de la corriente i_d en el controlador, esta es la encargada de generar los niveles de corriente directa de referencia para la carga o descarga del condensador, ante la repentina subida de este último surge la necesidad de descargarlo, para esto se comanda reducir los niveles de corriente directa hasta llegar a la saturación del PI (establecido en 100 [A]), sin embargo, la componente directa no es la única que afecta, el esquema del lazo interno considera un acople entre las componentes de la transformada de Park, por lo que un efecto en la corriente i_d , puede verse reflejado en el voltaje de cuadratura V_d (de la misma manera con la corriente de cuadratura en el voltaje directo).

Una de las características de los compensadores estáticos síncronos es su capacidad de inyección y absorción de reactivos, por lo que además de restablecer una baja de voltaje, también debería ser capaz de restablecer un alza, a continuación se muestran las curvas anteriormente descritas cuando el voltaje de la fuente ideal aumenta.

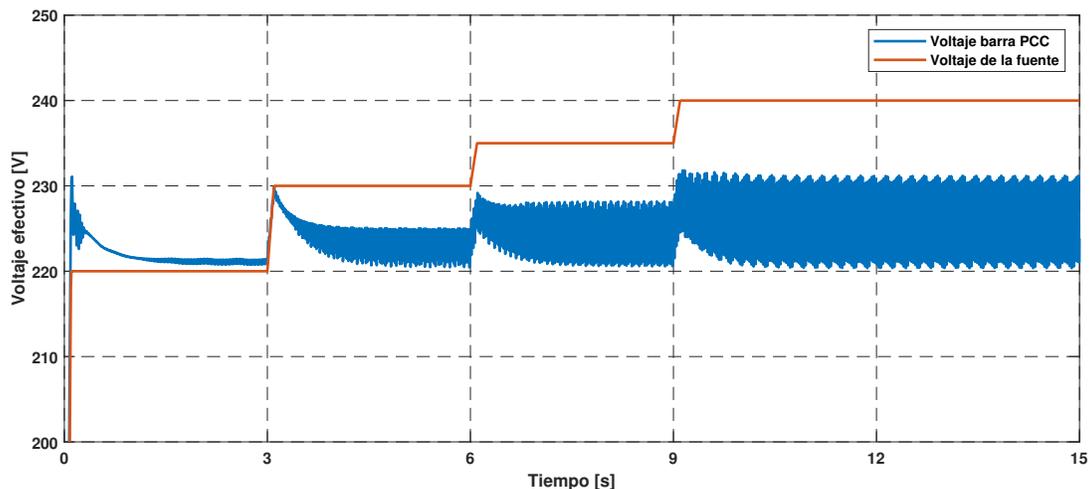


Figura 5.12: Voltaje efectivo en barra de conexión del compensador.

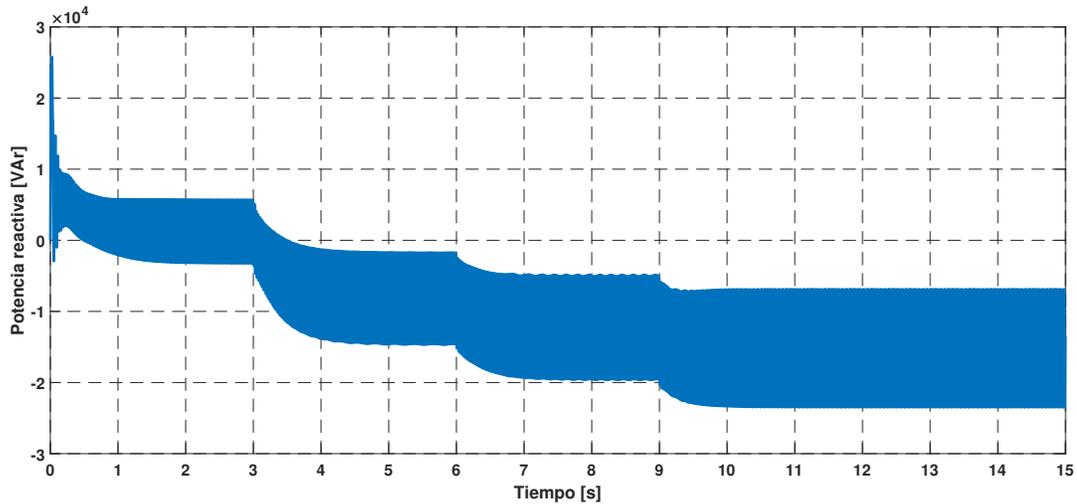


Figura 5.13: Potencia reactiva generada/consumida por el compensador.

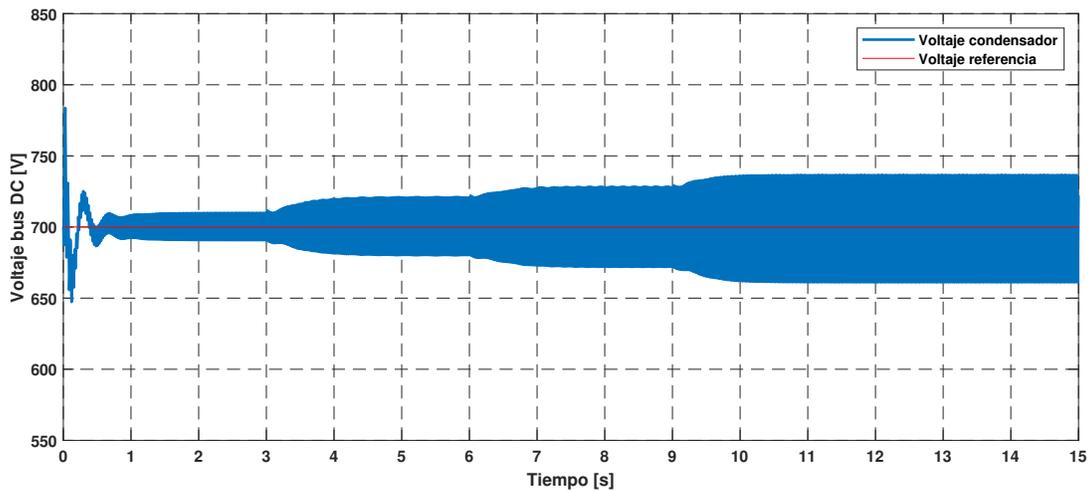


Figura 5.14: Voltaje en condensador del bus DC.

En contraste al caso anterior, se observa un sistema mucho más oscilante cuando el compensador debe reducir la tensión. la forma de la curva que se observa en la figura 5.12 indica que la onda sinusoidal aumenta y disminuye su magnitud frente a la acción del compensador, comportamiento que se ve más pronunciado a medida que la fuente se aleja cada vez más del valor nominal. El comportamiento de la curva de potencia reactiva de la figura 5.13 es similar, lo que explica el efecto en la tensión, por otro lado, se puede corroborar que el compensador absorbe reactivos dado los valores negativos que se obtienen a la salida del dispositivo.

Las oscilaciones vistas en las curvas anteriores, son un efecto de la inestabilidad del voltaje del bus DC en el compensador (figura 5.14), el cual es necesario para una correcta síntesis de la señal alterna.

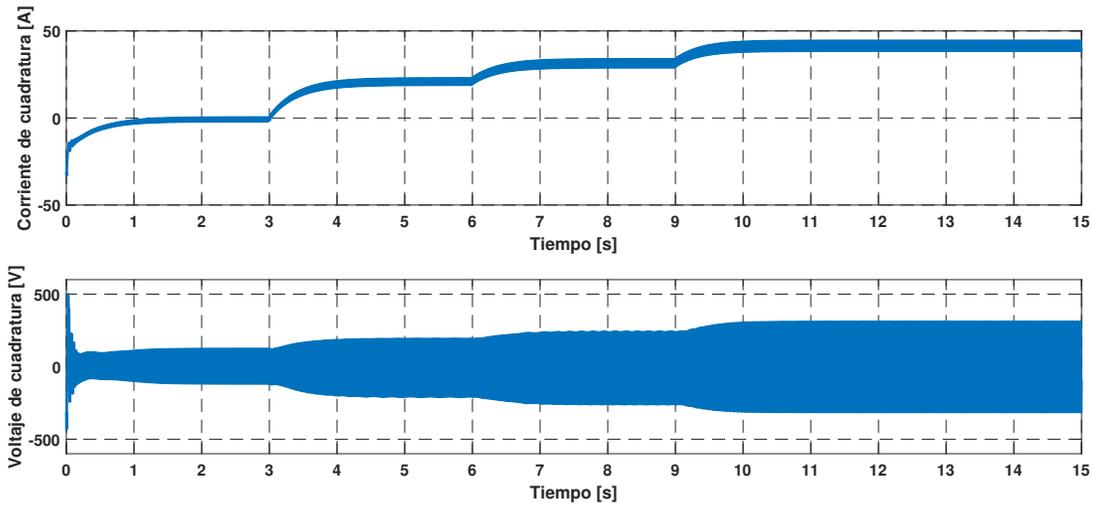


Figura 5.15: Voltaje y corriente de referencia en eje de cuadratura (controlador).

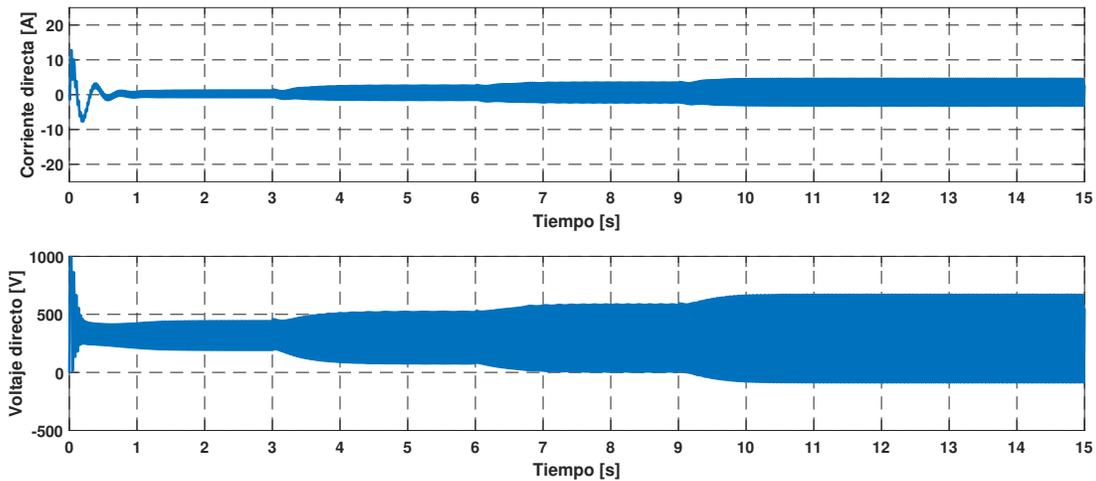


Figura 5.16: Voltaje y corriente de referencia en eje directo (controlador).

La misma inestabilidad se encuentra en los niveles de referencia generados en el controlador del STATCOM visto en las figuras 5.15 y 5.16, al tratarse de salidas de los controladores PI, se puede asociar el problema a las ganancias proporcionales e integrales de ellos.

Como los resultados del escenario anterior indican que los voltajes del PMSG son menores a 220 [V] cuando no hay regulación, el STATCOM utilizado puede ser un dispositivo aplicable para resolver la problemática presentada. En cuanto a las inestabilidades observadas, estas son causadas principalmente por la elección de los valores de ganancias proporcionales e integrales, por lo que una reevaluación de la metodología de selección de estos valores podría solucionarlas.

5.3. *Chopper* en red firme

El criterio para determinar el correcto funcionamiento del dispositivo *Chopper* corresponde al control de potencia en la resistencia de desahogo, se busca poder controlar los niveles de generación controlando parte de la carga total del generador.

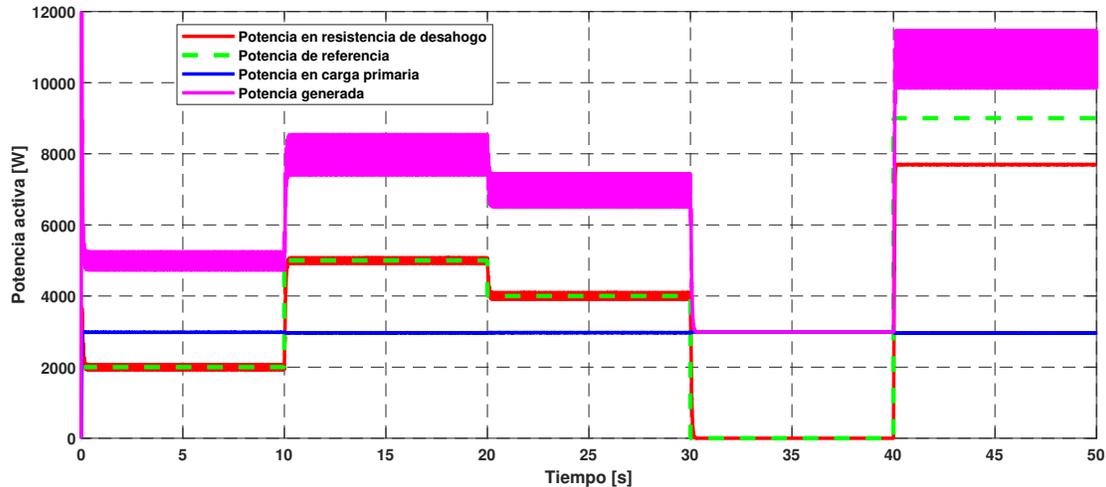


Figura 5.17: Niveles de potencia en componentes del sistema.

La figura 5.17 indica los valores de potencia activa que se alcanzan en la carga y resistencia de desahogo, al igual que la potencia generada total por la fuente ideal, la cual, considerando los componentes del sistema relevantes, debería ser aproximadamente una suma de las dos anteriores.

Se observa que los niveles de referencia son alcanzados por la resistencia dentro de un rango de potencia, en particular, se logra generar hasta alrededor de 7800 [W]. Otra observación importante es que la potencia generada tiende a oscilar en torno a los valores de carga total, comportamiento que puede ser explicado debido al encendido y apagado rápido del interruptor IGBT del *chopper*, el cual distorsiona la señal de corriente.

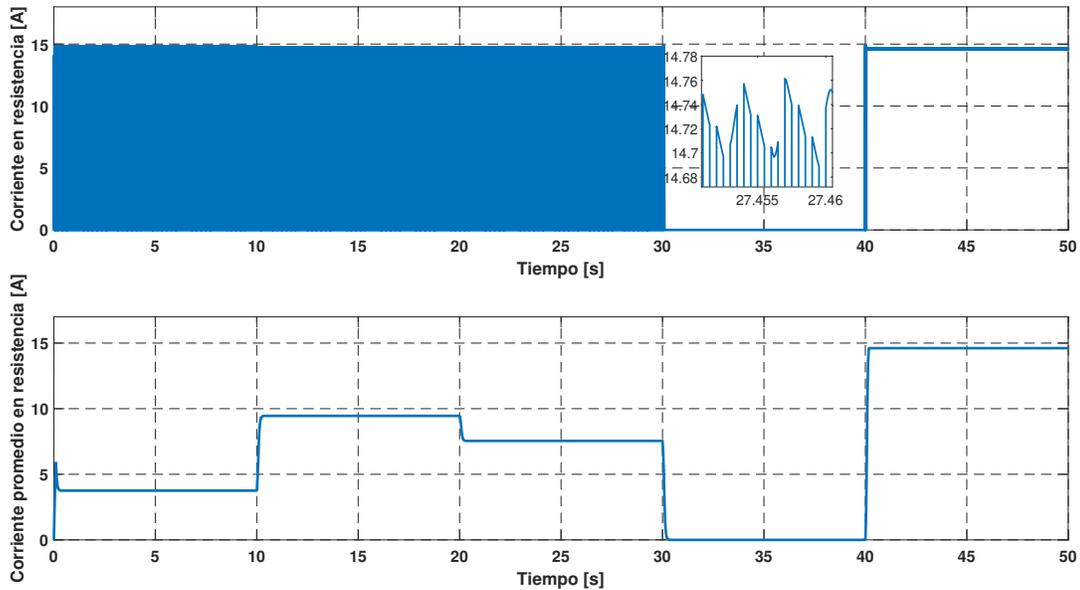


Figura 5.18: Corriente en resistencia de desahogo.

La figura 5.18 señala los niveles de corriente reales y promedio medidas en la resistencia (usando un promedio móvil con intervalo de 0.1 [s]), se observan corrientes *peak* de aproximadamente 15 [A], la cual se obtiene a partir de el voltaje del bus DC según la ley de Ohm. Haciendo una acercamiento, se puede observar el “recorte” que genera niveles de corriente promedio más bajos.

Se puede apreciar que cuando la referencia de potencia es nula, no hay corriente, lo que indica que el IGBT se encuentra permanentemente apagado, por otro lado, cuando la referencia supera la potencia máxima de la resistencia, el IGBT se encuentra permanentemente encendido.

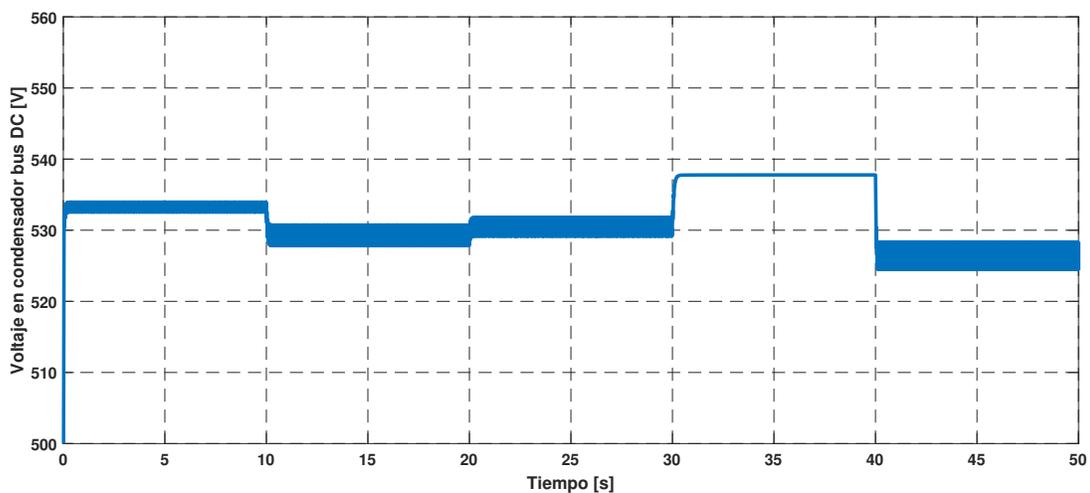


Figura 5.19: Voltaje del bus DC.

La figura 5.19 indica el voltaje en el condensador del bus DC, se puede notar que los niveles de

tensión se distorsionan en medidas pequeñas bajo la acción de los IGBT.

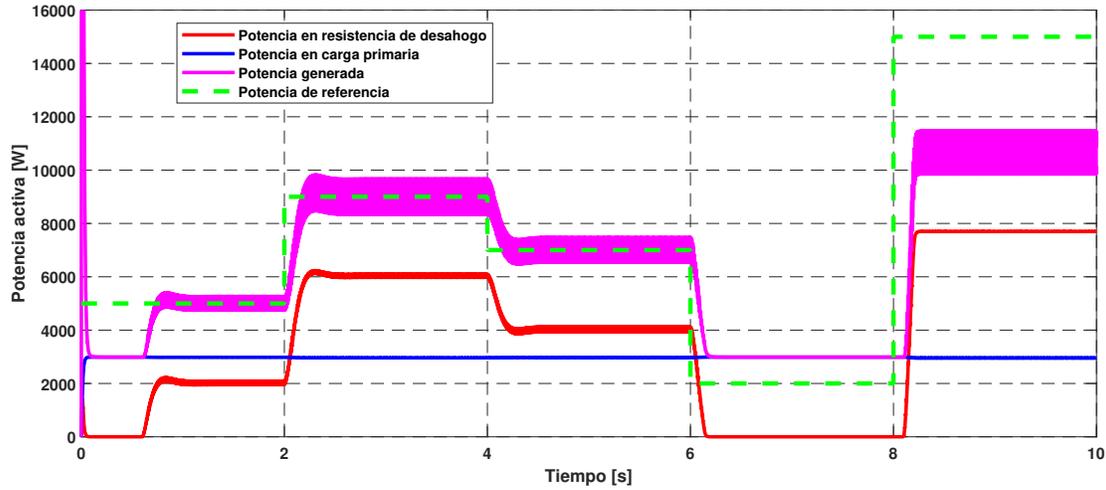


Figura 5.20: Niveles de potencia en componentes del sistema (modo referencia de generación).

La figura 5.20 muestra los resultados de potencia obtenidos cuando se cambia el modo de operación del controlador, es decir, estableciendo la referencia como el nivel de generación total del generador. Se puede observar que existe control sobre la potencia generada cuando la referencia se encuentra entre el consumo de la carga primaria y el nivel nominal del generador.

5.4. PMSG con ELC

A continuación se muestran los resultados del dispositivo final, los resultados se dividen según el tipo de prueba que se haya realizado en la simulación, la primera prueba consiste en el estudio del comportamiento del sistema ante distintos valores de carga primaria, la segunda consiste en la variación del voltaje de referencia del punto de conexión del ELC y el tercero en la variación de la referencia de potencia del *chopper*.

5.4.1. Variaciones de carga primaria

Las siguientes figuras muestran los resultados obtenidos cuando se dispone de una carga de 6 [kW] a la que se le conecta una nueva de 2 [kW] momentáneamente para luego desconectarse. Las referencias de voltaje en el PCC y potencia en el *chopper* son 220 [V] y 500 [W] respectivamente. La figura 5.21 muestra los niveles de generación y la potencia en la resistencia de desahogo.

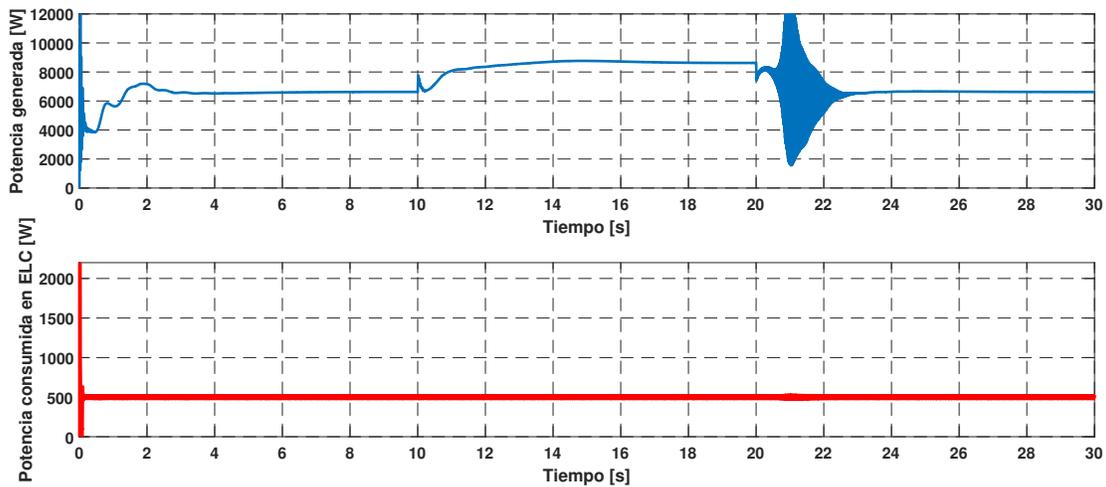


Figura 5.21: Potencia total generada por PMSG y potencia consumida en resistencia de desahogo.

Se puede notar que la potencia generada corresponde aproximadamente a la suma entre la carga y la consumida en el ELC.

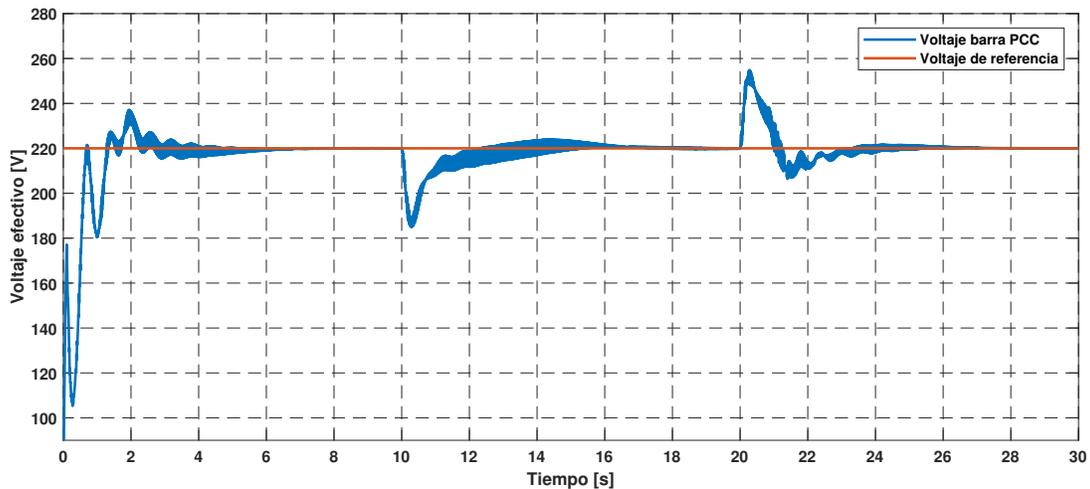


Figura 5.22: Voltaje efectivo en punto de conexión de ELC.

A partir de lo observado en la figura 5.22, es posible afirmar que la regulación de voltaje se logra para estos niveles de carga, ante saltos de potencia de 2 [kW], el tiempo de estabilización es de 6 [s] aproximadamente, con una variación cercana a los 40 [V]. Los gráficos de frecuencia y velocidad del PMSG de la figura 5.23, muestran cambios similares al del voltaje.

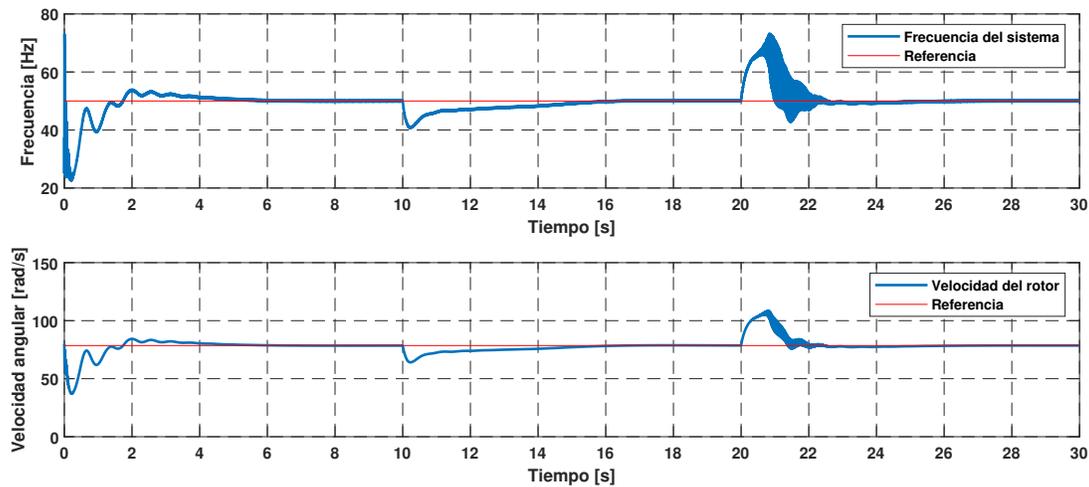


Figura 5.23: Frecuencia del sistema y velocidad rotacional del PMSG.

Las perturbaciones en la frecuencia y velocidad del generador se explican por la ecuación del Swing (ec. 2.14), existe un frenado momentáneo de la máquina ante el aumento de carga y una aceleración ante la disminución. Dado que en los PMSG el voltaje y la frecuencia están acoplados, se observan perturbaciones similares en ambos.

5.4.1.1. Carga nominal o mayor

Las siguientes curvas corresponden a las obtenidas cuando se somete el sistema a una carga resistiva de 11[kW], considerando esta y potencia que consume el ELC por el *chopper*, se supera la capacidad nominal del generador.

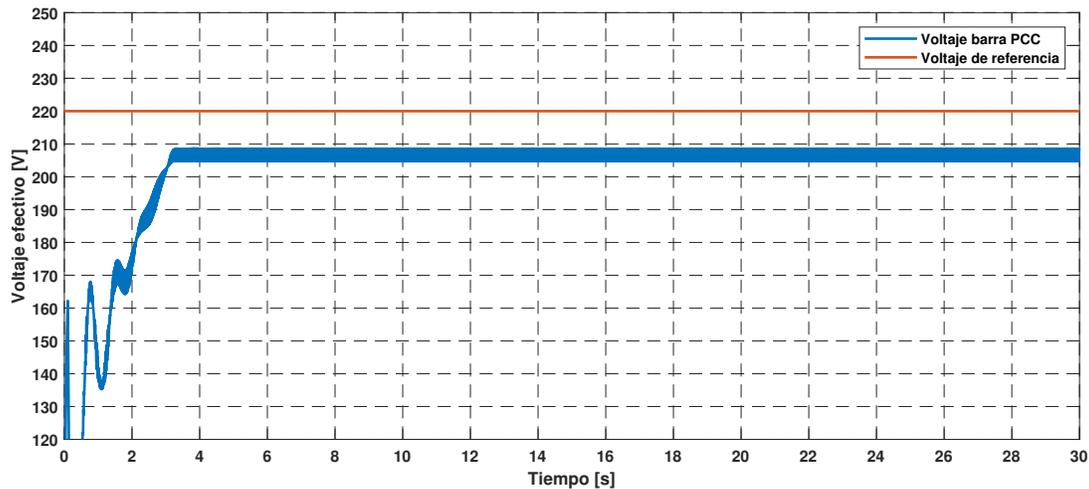


Figura 5.24: Voltaje efectivo en punto de conexión de ELC.

A partir de la figura 5.24 se puede afirmar que al superar la carga nominal, la regulación de voltaje del ELC es insuficiente para alcanzar los 220 [V] nominales de los sistemas eléctricos de baja tensión, sin embargo la tensión alcanzada es mayor al caso en que no se dispone de un compensador (figura 5.6)

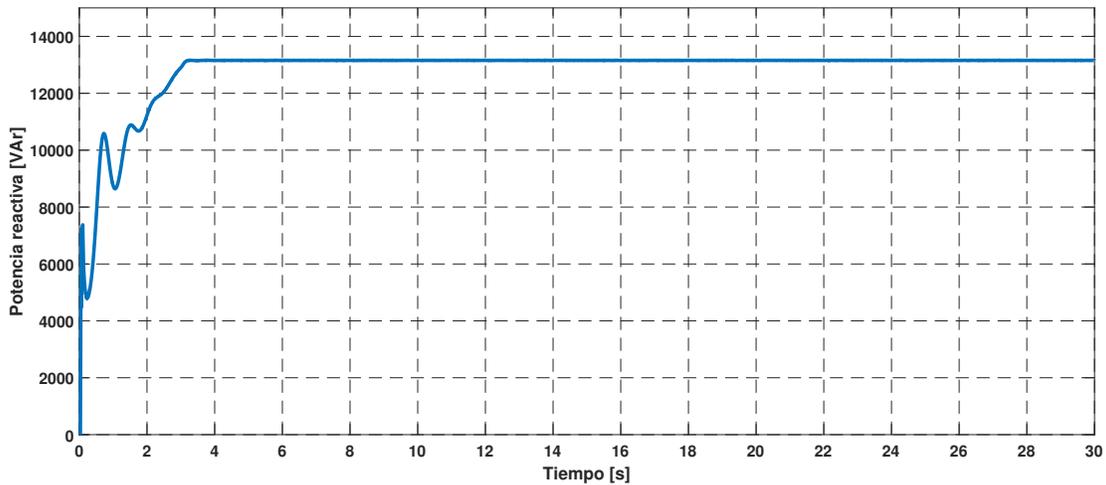


Figura 5.25: Aporte de potencia reactiva de STATCOM.

La curva de la figura 5.25 muestra los niveles de inyección de reactivos en este escenario, los cuales se saturan alrededor de los 13 [kVAr] por las limitaciones impuestas en los controladores PI del lazo externo del controlador del STATCOM (± 30 [A]).

Como se explicó anteriormente, la caída de voltaje se debe a la pérdida de velocidad rotacional del PSMG y frecuencia en la red a causa de la saturación del sistema mecánico del gobernador de la turbina hidráulica, caso similar al que se ve en el escenario del PMSG saturado sin regulación (figuras 5.5 y 5.6)

5.4.1.2. Carga baja

Se observa un comportamiento indeseado cuando los niveles de potencia de la carga primaria son bajos, se manifiesta una oscilación permanente alrededor de los niveles nominales del sistema. A continuación se muestran los resultados obtenidos cuando la carga primaria es de 1 [kW].

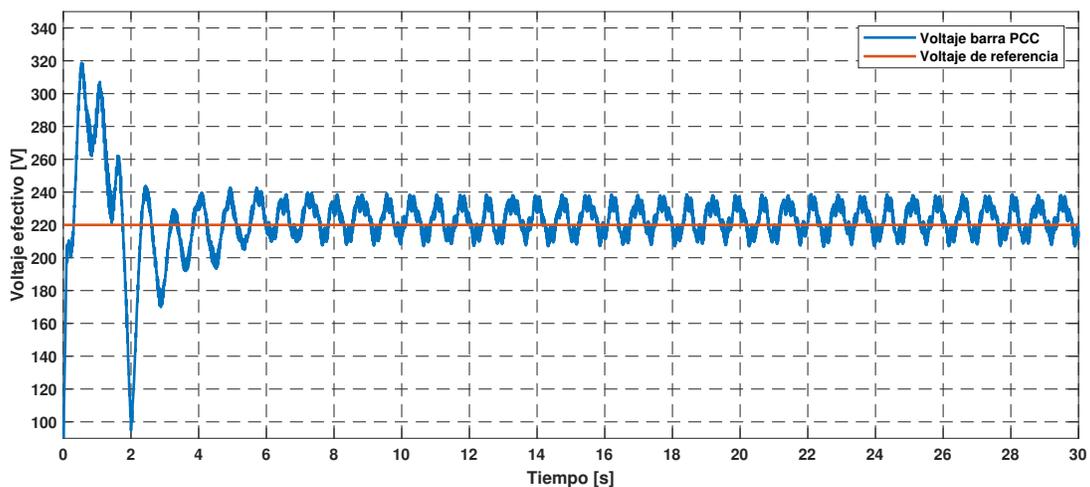


Figura 5.26: Voltaje efectivo en punto de conexión de ELC.

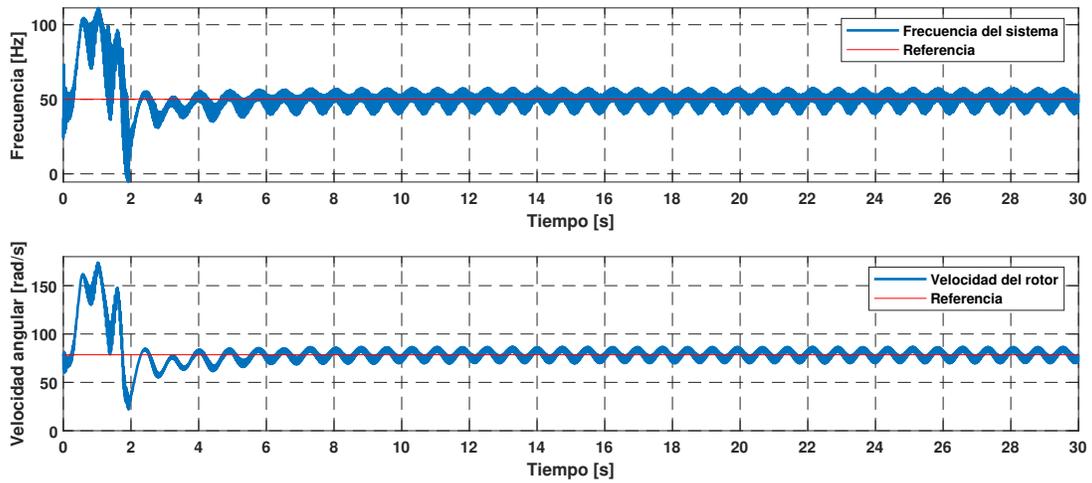


Figura 5.27: Frecuencia del sistema y velocidad rotacional del PMSG.

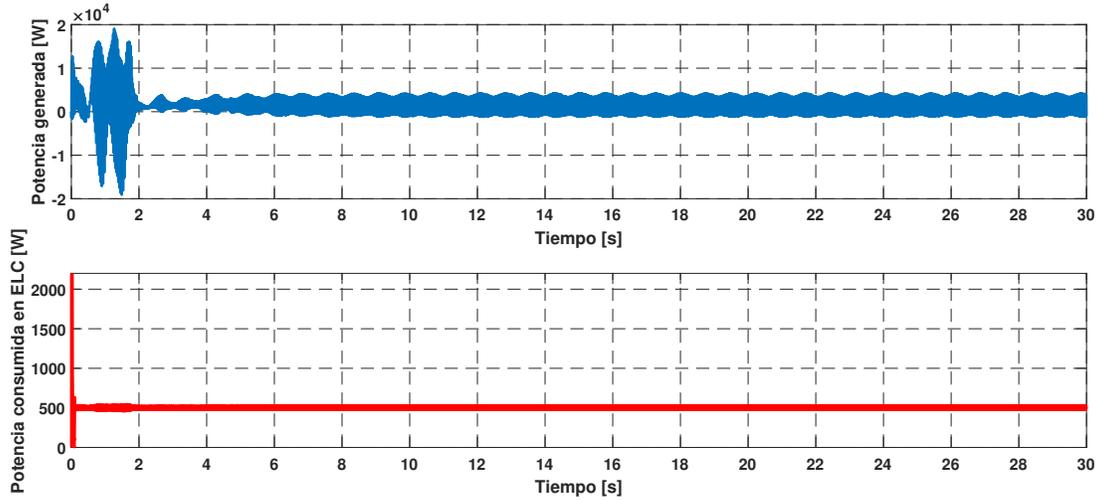


Figura 5.28: Potencia total generada por PMSG y potencia consumida en resistencia de desahogo.

La figura 5.28 indica que a pesar de las oscilaciones presentes, la potencia en la resistencia de desahogo permanece estable, esto se debe a que esta se encuentra en el lado DC del convertidor.

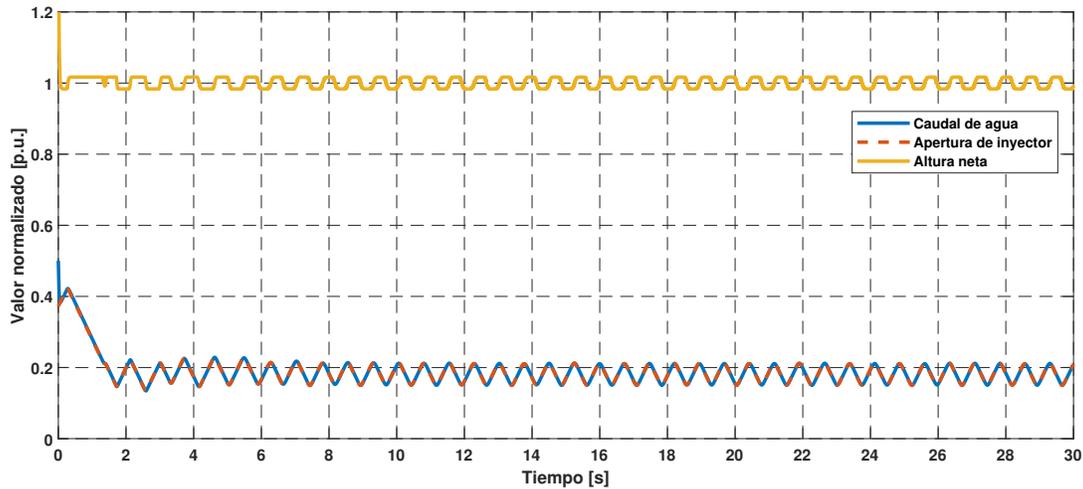


Figura 5.29: Parámetros de turbina hidráulica.

La figura 5.29 indican que las perturbaciones también son observadas en los parámetros de la turbina hidráulica, lo que se traduce en una inestabilidad en el sistema de control del governor de la máquina.

Este comportamiento se puede apreciar en cargas menores a 4.5 [kW], siendo más pronunciado mientras menor sea esta, lo cual corresponde a un rango de operación amplio.

En una primera instancia de este trabajo, no fue posible identificar las causas de este fenómeno, el cual no es despreciable considerando que existen experiencias de laboratorio y situaciones en las que se somete el generador real a cargas de estas magnitudes.

5.4.2. Variación en referencia de voltaje

Los siguientes resultados corresponden a los obtenidos al modificar el voltaje de referencia en el controlador del STATCOM, en particular se varía la referencia en ± 10 [V] en torno al valor nominal mientras la carga se mantiene constante en 6[kW] y el consumo en la resistencia de desahogo en 500 [W].

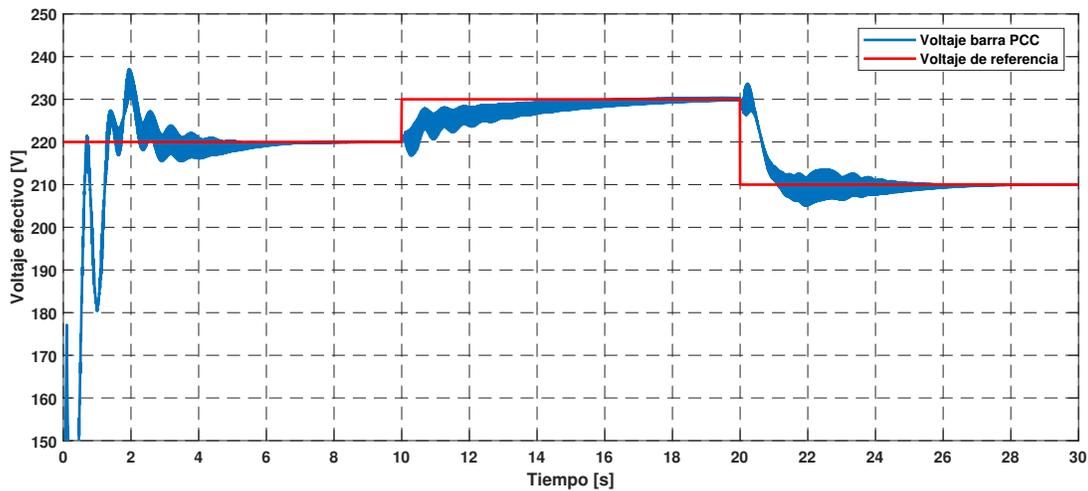


Figura 5.30: Voltaje efectivo en punto de conexión de ELC.

En la figura 5.30 se puede apreciar que la tensión es capaz de estabilizarse en los valores de referencia que se configuren en el STATCOM, por lo que se puede afirmar que al menos para un rango, existe un control efectivo en el voltaje en bornes de la máquina.

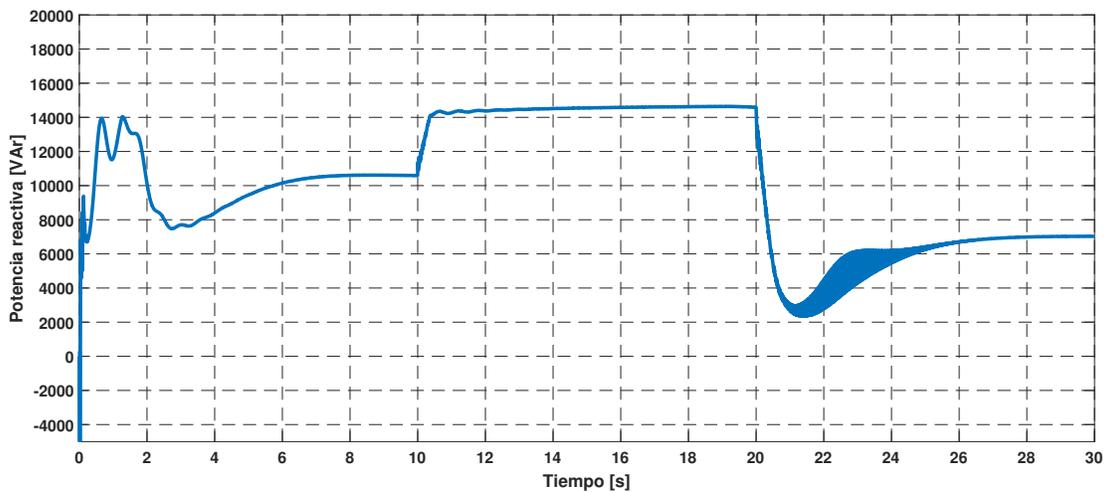


Figura 5.31: Aporte de potencia reactiva de STATCOM.

En la figura 5.31 se pueden ver los valores de potencia reactiva que inyecta el compensador para alcanzar los voltajes deseados, se puede apreciar que existe cierta proporcionalidad entre el incremento o disminución de voltaje y la cantidad de reactivos inyectados.

Tabla 5.1: Inyección de reactivos según voltaje en PCC.

| Voltaje en PCC | Potencia reactiva inyectada |
|----------------|-----------------------------|
| 210 [V] | 6.88 [kVAr] |
| 220 [V] | 10.43 [kVAr] |
| 230 [V] | 14.29 [kVAr] |

La tabla 5.1 muestra las cantidades aproximadas de reactivos que se alcanzan para cada nivel de voltaje, a partir de ella se puede determinar un factor de influencia ($\frac{\Delta Q}{\Delta V}$) aproximado, el cual tiene un valor $[355.1 \ 385.8] \left[\frac{VAr}{V}\right]$ para este rango de voltajes.

5.4.3. Variación en referencia de potencia

Los siguientes gráficos corresponden a los obtenidos cuando se deja fijo el valor de la carga primaria en 6 [kW], en voltaje de referencia en 220 [V] y se incrementa la referencia de potencia consumida en el *chopper*.

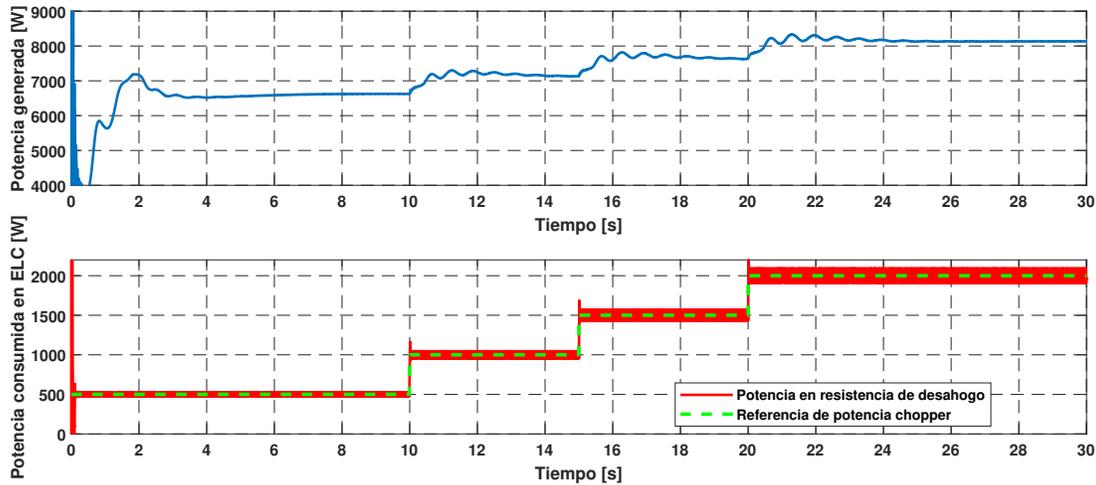


Figura 5.32: Potencia total generada por PMSG y potencia consumida en resistencia de desahogo.

Como se puede apreciar en las curvas de potencia de la figura 5.32, la potencia consumida en la resistencia de desahogo sigue los niveles de referencia impuestos en el controlador, sin embargo se puede apreciar que los valores reales de la potencia oscilan en torno a este valor, efecto que se produce debido al encendido y apagado del interruptor IGBT para hacer un “recorte” en la corriente, estas oscilaciones se ven más pronunciadas a medida que incrementa el consumo deseado en el ELC.

Al ver el gráfico de la potencia generada, se aprecia que los valores alcanzados no corresponden a la suma del consumo del ELC y la carga, sino que es un valor un poco mayor, lo que podría explicarse por las pérdidas de los componentes resistivos en el filtro (resistencia interna y resistencia de amortiguamiento pasivo).

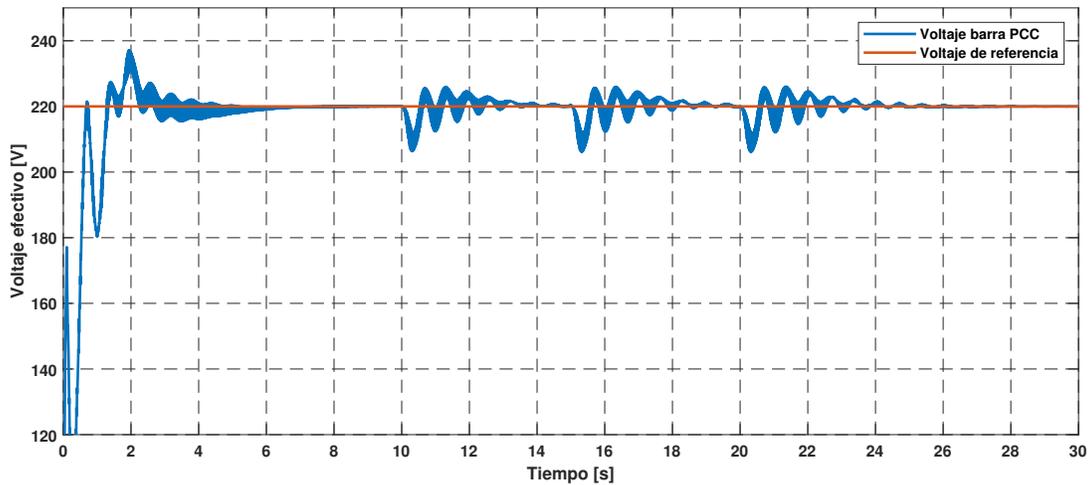


Figura 5.33: Voltaje efectivo en punto de conexión de ELC.

En cuanto al voltaje del PCC, se observan algunas perturbaciones en los momentos que cambia la referencia de potencia, comportamiento esperado considerando las perturbaciones en la frecuencia por las momentáneas diferencias entre generación y consumo de estos instantes.

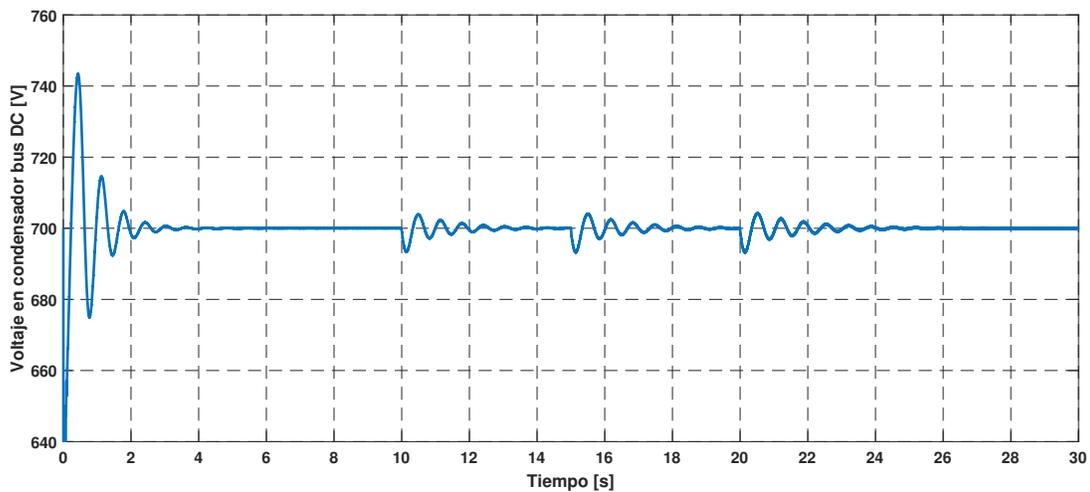


Figura 5.34: Voltaje del condensador del bus DC en el ELC.

En la figura 5.34 se puede apreciar la tensión del capacitor del ELC, se observan algunas perturbaciones similares a las anteriores, las cuales logran ser mitigadas en un periodo aproximado de 4 [s]. Con el voltaje del bus DC estable, tanto la modulación del voltaje AC del STATCOM como la corriente en el *chopper* pueden ser controladas de manera adecuada.

Capítulo 6

Conclusiones

En este trabajo de título se ha logrado llevar a cabo el diseño e implementación virtual de un dispositivo capaz de regular la tensión en bornes de un generador tipo PMSG con características similares al generador real ubicado en el laboratorio de máquinas hidráulicas del Departamento de Ingeniería Mecánica, a partir de los resultados obtenidos en las diversas pruebas realizadas se puede afirmar que el regulador ELC tipo STATCOM es una solución viable para la problemática presentada.

Fue posible llevar a cabo los experimentos virtuales debido a la comprensión teórica de las relaciones matemáticas y eléctricas de los generadores sincrónicos, al igual que conceptos clave de compensación reactiva y electrónica de potencia en general. Se pudo traducir expresiones matemáticas dinámicas a sus equivalentes en diagramas de bloques, lo que permitió obtener modelos representativos de los equipos eléctricos reales.

Conceptos como la transformada de Park, lazos de control PI, resonancia y filtros son de suma utilidad y fueron reforzados para facilitar la manipulación de las distintas señales obtenidas en proyectos eléctricos como el que se presenta en este trabajo.

Se comprendió la relevancia de los distintos factores que afectan la operación de un generador de imanes permanentes, se destaca particularmente el acople entre la frecuencia y el voltaje, aspecto que obliga a la consideración de ambos para un control adecuado, lo que presenta una desventaja si se compara con el control de los generadores sincrónicos convencionales de electroimanes. A pesar de esta diferencia, se pudo comprobar que existen estrategias válidas y aplicables para poder utilizar este tipo máquina.

A partir de las pruebas realizadas, se establecieron algunas de las condiciones en las que el dispositivo deja de funcionar adecuadamente, como lo es por ejemplo las condiciones de carga mínima, estos aspectos son importantes ya que los rangos de operación de los dispositivos permiten evitar las exposiciones a niveles peligrosos de corriente que pueden reducir la vida útil de los equipos o incluso comprometerlos. Los rangos de operación del dispositivo podrían ser ampliados si se identifican las razones para los comportamientos indeseados de la regulación y se corrigen.

El hecho de contar con una regulación adecuada en bornes del generador en cuestión, amplía las opciones en cuanto a experiencias y experimentos que se quieran realizar, tanto en el ámbito de investigación como en el ámbito docente, con una aplicación real del dispositivo propuesto se po-

dría complementar la formación del ingeniero eléctrico de la Universidad de Chile con experiencias de laboratorio relacionadas con la regulación de tensión y operación de máquinas eléctricas sincrónicas. La formación del ingeniero mecánico también puede salir beneficiada de este trabajo, dando a entender la importancia del control de las variables que definen la potencia eléctrica y su relación con los cambios que se observan en los componentes mecánicos de las turbinas y generadores.

Además de ser un aporte para la universidad, esta propuesta de dispositivo de compensación flexibiliza el uso que se le puede dar a generadores eléctricos con un control de tensión pobre, lo que presenta una oportunidad para el desarrollo y aplicación de más tecnologías limpias y renovables en el país y de esta manera acelerar el proceso de des carbonización de la matriz energética para un futuro más sustentable.

6.1. Trabajo futuro

Existen distintos ámbitos del trabajo en donde una investigación más profunda podría complementar a lo expuesto en este documento. En el caso que se decida implementar esta solución, se podría comenzar considerando las siguientes indicaciones:

- Como prioridad, se debería corregir el comportamiento del regulador ante cargas bajas, es necesario identificar la causa de las oscilaciones que se producen para poder eliminarlas ya que no es poco común someter generadores eléctricos a consumos pequeños, particularmente en el caso del generador del laboratorio, donde se varía ampliamente la operación de la máquina.
- Es posible reducir los tiempos de respuesta y regulación del compensador para optimizar su funcionamiento, para esto es necesaria la investigación de una mejor metodología para diseñar los parámetros del filtro, STATCOM y ganancias para el esquema de control.
- Existen distintos esquemas de control además del tradicional utilizado, algunos autores han propuesto algunos más eficientes y capaces de lidiar con distintas problemáticas como distorsiones armónicas o desbalances en la red. Un cambio del esquema de control podría flexibilizar los usos del compensador.
- El modelo mecánico considera algunas suposiciones que no necesariamente podrían ser ciertas y utiliza valores aproximados en cuanto a las características físicas del generador, las cuales pueden haber sido modificadas durante el proceso de elaboración de esta memoria. Un trabajo en conjunto con un estudiante o profesor especializado en mecánica sería enriquecedor para este proyecto.

Se busca que el dispositivo propuesto en este trabajo de título puede ser implementable físicamente, por lo que una vez el modelo virtual se encuentra optimizado y con las correcciones sugeridas, el trabajo siguiente consistirá en la traducción de los diagramas de bloques a código interpretable por un DSP y microcontrolador. Además de lo anterior, es probable que se necesite hacer manufacturas de componentes con valores particulares o elegir los más cercanos dentro del mercado.

Bibliografía

- [1] de Energía, M., “Agenda de energía 2022-2026,” 2022, <https://energia.gob.cl/documentos/agenda-energia-2022-2026>.
- [2] “Revista electricidad n274, tecnologías solar y eólica consolidan su liderazgo,” 2022, <https://www.revistaiei.cl/revistas/proyectos-energeticos-en-2023-tecnologias-solar-y-eolica-consolidan-su-liderazgo/>.
- [3] Energía, M., “Mapa de vulnerabilidad energética,” 2019.
- [4] Abierta, E., “Pequeños medios de generación en Chile,” 2020, <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/pequenos-medios-de-generacion-en-chile/>.
- [5] Guardiola, M., “Diseño del sistema de control de micro-generador hidráulico de uso académico,” memoria de título, Universidad de Chile, Santiago, 2021.
- [6] Zamora, C., “Desarrollo y pruebas de un controlador electrónico para una microturbina hidráulica de uso académico,” memoria de título, Universidad de Chile, Santiago, 2019.
- [7] Ítalo Campodónico, “Montaje y caracterización de una instalación de generación de potencia de uso docente mediante una micro-turbina hidráulica,” memoria de título, Universidad de Chile, Santiago, 2019.
- [8] Arís, J. C., “Diseño, construcción y pruebas de turbina pelton para microgeneración hidráulica,” tesis de magíster, Universidad de Chile, Santiago, 2014.
- [9] Gonzalez, J. M., “Apunte del curso máquinas m5300,” 2020.
- [10] Nityanand y Pandey, A. K., “Performance analysis of pmsg wind turbine at variable wind speed,” en 2018 5th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON), pp. 1–6, 2018, [doi:10.1109/UPCON.2018.8597081](https://doi.org/10.1109/UPCON.2018.8597081).
- [11] Mora, M. O., “Sensorless vector control of pmsg for wind turbine applications,” tesis de magíster, Institute of Energy Technology Aalborg University, 2009.
- [12] Busca, C., Stan, A.-I., Stanciu, T., y Stroe, D. I., “Control of permanent magnet synchronous generator for large wind turbines,” en 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 3871–3876, 2010, [doi:10.1109/ISIE.2010.5637628](https://doi.org/10.1109/ISIE.2010.5637628).
- [13] Quéval, L. y Ohsaki, H., “Back-to-back converter design and control for synchronous generator-based wind turbines,” en 2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), pp. 1–6, 2012, [doi:10.1109/ICRERA.2012.6477300](https://doi.org/10.1109/ICRERA.2012.6477300).
- [14] Hassanzadeh, F., Sangrody, H., Hajizadeh, A., y Akhlaghi, S., “Back-to-back converter control of grid-connected wind turbine to mitigate voltage drop caused by faults,” en 2017 North American Power Symposium (NAPS), pp. 1–6, 2017, [doi:10.1109/NAPS.2017.8107205](https://doi.org/10.1109/NAPS.2017.8107205).

- [15] Cetin, A. y Ermis, M., “Vsc-based d-statcom with selective harmonic elimination,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 45, no. 3, pp. 1000–1015, 2009, doi:[10.1109/TIA.2009.2018926](https://doi.org/10.1109/TIA.2009.2018926).
- [16] Giroux, P., Sybille, G., y Le-Huy, H., “Modeling and simulation of a distribution statcom using simulink’s power system blockset,” en *IECON’01. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat. No.37243)*, vol. 2, pp. 990–994 vol.2, 2001, doi:[10.1109/IECON.2001.975905](https://doi.org/10.1109/IECON.2001.975905).
- [17] Wang, S., Li, L., Wang, X., Zheng, Y., y Yao, G., “Direct output voltage control of a statcom using pi controller based on multiple models,” en *2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, pp. 2203–2208, 2011, doi:[10.1109/ICIEA.2011.5975956](https://doi.org/10.1109/ICIEA.2011.5975956).
- [18] Wang, L. y Truong, D.-N., “Stability enhancement of a power system with a pmsg-based and a dfig-based offshore wind farm using a svc with an adaptive-network-based fuzzy inference system,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 7, pp. 2799–2807, 2013, doi:[10.1109/TIE.2012.2218557](https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2218557).
- [19] Gawande, S., Porate, K., Thakre, K., y Bodhe, G., “Synchronization of synchronous generator and induction generator for voltage & frequency stability using statcom,” en *2010 3rd International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology*, pp. 407–412, 2010, doi:[10.1109/ICETET.2010.154](https://doi.org/10.1109/ICETET.2010.154).
- [20] Mendoza-Araya, P., Munoz Castro, J., Cotos Nolasco, J., y Palma-Behnke, R. E., “Lab-scale tcr-based svc system for educational and dg applications,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 3–11, 2011, doi:[10.1109/TPWRS.2010.2050154](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2050154).
- [21] Cornejo, M., “Diseño y construcción de un compensador estático de reactivos para laboratorio,” memoria de título, Universidad de Chile, Santiago, 2009.
- [22] Diaz, C., “Modelación de un compensador estático para el control de generación distribuida con energías renovables,” memoria de título, Universidad de Chile, Santiago, 2009.
- [23] Murthy, S., Jose, R., y Singh, B., “A practical load controller for stand alone small hydro systems using self excited induction generator,” en *1998 International Conference on Power Electronic Drives and Energy Systems for Industrial Growth, 1998. Proceedings.*, vol. 1, pp. 359–364 Vol.1, 1998, doi:[10.1109/PEDES.1998.1330042](https://doi.org/10.1109/PEDES.1998.1330042).
- [24] Singh, B., Murthy, S., y Gupta, S., “An improved electronic load controller for self-excited induction generator in micro-hydel applications,” en *IECON’03. 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IEEE Cat. No.03CH37468)*, vol. 3, pp. 2741–2746 Vol.3, 2003, doi:[10.1109/IECON.2003.1280681](https://doi.org/10.1109/IECON.2003.1280681).
- [25] Morfín-Garduño Onofre Amador, Zavala-Rubio Luis Ari, O.-T. F. y Reymundo, R.-B., “Compensación de potencia reactiva mediante el control robusto de un statcom en un sistema de potencia,” 2021, doi:<https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2021.22.3.020>. Ingeniería, investigación y tecnología, 22(3)Epub.
- [26] Aguilera, R. P., Acuna, P., Konstantinou, G., Vazquez, S., y Leon, J. I., “Chapter 2 - basic control principles in power electronics: Analog and digital control design,” en *Control of Power Electronic Converters and Systems (Blaabjerg, F., ed.)*, pp. 31–68, Academic Press, 2018, doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805245-7.00002-0>.
- [27] Sangwongwanich, A., Abdelhakim, A., Yang, Y., y Zhou, K., *Control of Single-Phase and Three-Phase DC/AC Converters*, pp. 153–173. Academic Press, 2018, doi:[10.1016/B978-0-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-1)

2-805245-7.00006-8.

- [28] Peña-Alzola, R. y Blaabjerg, F., “Chapter 8 - design and control of voltage source converters with lcl-filters,” en *Control of Power Electronic Converters and Systems* (Blaabjerg, F., ed.), pp. 207–242, Academic Press, 2018, doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805245-7.00008-1>.
- [29] Montes, L. M. F., “Capítulo iv el compensador estático síncrono statcom.”, <https://docplayer.es/60634220-Capitulo-iv-el-compensador-estatico-sincrono-statcom.html>.
- [30] Pudur, R. y Srivastava, V. K., “Performance study of electronic load controller for integrated renewable sources,” en *2018 2nd International Conference on Electronics, Materials Engineering & Nano-Technology (IEMENTech)*, pp. 1–6, 2018, doi:[10.1109/IEMENTECH.2018.8465144](https://doi.org/10.1109/IEMENTECH.2018.8465144).
- [31] Auwal Abubakar Usman, R. A. A., “Modelling and simulation of micro hydro power plant using matlab simulink,” 2015. In *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science (IJATES)*, vol. 3.

Anexos

Anexo A. Código de diseño

Código A.1: Diseño filtro LCL

```
1  %PARAMETROS DEL SISTEMA
2  Vnom_rms = 220;          % Voltaje nominal de la red [V rms]
3  Vnomff_rms=Vnom_rms*sqrt(3); % Voltaje nominal de la red fase-fase[V rms]
4  fnom     = 50;          % Frecuencia nominal [Hz]
5  wnom     = fnom*2*pi;   % Frecuencia nominal [rad/s]
6  Vdc      = 220*sqrt(2)*2; % Voltaje DC [V]
7  fs       = 10e3;       % Frecuencia switching/carrier [Hz]
8  ws=fs*2*pi;           % Frecuencia nominal switching [rad/s]
9  Ts=1/fs;              % Periodo switching [s]
10 Pnom=11e3;             % Potencia nominal
11
12 %VALORES BASE
13 Zb=(Vnomff_rms^2)/Pnom; % Impedancia base
14 Cb=1/(wnom*Zb);        % Capacitancia base
15 Lb=Zb/wnom;           % Inductancia base
16
17 %DISEÑO DEL FILTRO
18 %(1)
19 L_r=0.022*Vdc/(fs*0.03);
20 L=Lb*L_r;
21 %(2)
22 x=0.02;
23 Cf=x*Cb;
24 %(3)
25 r=1.5;
26 Lg=L*r;
27 a=L*Cb*ws^2;
28 %verificaciones
29 aten=1/(abs(1+r*(1-a*x))); % Atenuacion
30 Leq=L+Lg;              % Inductancia equivalente
31
32 %RESISTENCIAS FILTRO LCL
33 R=0.1;                 % Resistencia lado conversor
34 Rg=0.1;                % Resistencia lado red
35 Req=R+Rg;              % Resistencia equivalente
36
37 %RESISTENCIA PARA AMORTIGUAMIENTO PASIVO
```

```

38 Rdmin=(1/3)*fs*(Lg^2)/(L+Lg); % Resistencia minima de amortiguamiento
39 Rd=Rdmin*2; % Resistencia de amortiguamiento
40
41 %PARAMETROS CONTROLADOR
42 Kp=(Leq/(5*Ts));
43 Ti=Leq/Req;
44 Ki=(Kp/Ti);
45
46 %FRECUENCIAS (verificaciones)
47 wres=sqrt(Leq/(L*Lg*Cf)); % Frecuencia de resonancia
48 wbw=(Kp/Leq); % Ancho de banda

```

Anexo B. Parámetros modelo ELC final

Tabla B.1: Parámetros de componentes del ELC

| Parámetro | Valor |
|--|-------------------|
| Capacitor bus DC (C_{DC}) | 8 [mF] |
| Resistencia bus DC (R_{DC}) | 0.1 [Ω] |
| Resistencia de desahogo (R_{dump}) | 50 [Ω] |
| Inductancia filtro, lado conversor (L) | 2 [mH] |
| Inductancia filtro, lado red (L_g) | 3.2 [mH] |
| Capacitor filtro (C_f) | 4.82 [μF] |
| Resistencia interna filtro (R_f) | 0.1 [Ω] |
| Resistencia de am. pasivo (R_d) | 12.9 [Ω] |

Tabla B.2: Ganancias PI de controlador STATCOM (ELC)

| Ganancia | Valor |
|-----------------------------------|-------|
| Proporcional interna (K_{pi}) | 20 |
| Integral interna (K_{ii}) | 400 |
| Proporcional externa (K_{pe}) | 0.067 |
| Integral externa (K_{ie}) | 1.333 |

Tabla B.3: Ganancias PI de controlador *Chopper* (ELC)

| Ganancia | Valor |
|--------------------------|-------|
| Proporcional P. desahogo | 0.1 |
| Integral P. desahogo | 50 |
| Proporcional P. generada | 0.1 |
| Integral P. generada | 10 |