



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

DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE MICRO-GENERADOR HIDRÁULICO DE  
USO ACADÉMICO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

MAXIMILIANO JOAQUÍN GUARDIOLA OVIEDO

PROFESOR GUÍA:  
PATRICIO MENDOZA ARAYA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
JUAN CARLOS ELICER CORTÉS  
RODRIGO PALMA BEHNKE

SANTIAGO DE CHILE  
2021

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO  
POR: MAXIMILIANO JOAQUÍN GUARDIOLA OVIEDO  
FECHA: 2021  
PROF. GUÍA: PATRICIO MENDOZA ARAYA

## DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE MICRO-GENERADOR HIDRÁULICO DE USO ACADÉMICO

La generación distribuida se presenta como un tema de gran interés para la comunidad científica producto de la capacidad que tiene ésta de romper con los paradigmas tradicionales de la generación, ya que ésta se logra instalar cercana a la demanda, a su vez esto permite que pequeños centros de consumo y localidades aisladas puedan autoabastecerse de energía eléctrica, sin tener que realizar una obra de expansión de líneas de transmisión para tener un punto de conexión a la red.

En Chile la generación distribuida está liderada por la energía solar, seguida por las centrales mini-hidráulicas, sin embargo la mayor parte de las viviendas sin acceso a energía eléctrica se encuentra en las regiones más australes del país, donde las centrales mini-hidráulicas podrían servir como solución para energizar dichas viviendas.

Es debido a lo anterior, que el objetivo de este trabajo es diseñar un controlador para un micro-generador hidráulico de uso académico ubicado en laboratorio de máquinas hidráulicas de la Universidad de Chile, a modo que este pueda ser implementado en el laboratorio para así impulsar el uso de esta máquina en nuevas experiencias de laboratorio e investigaciones para así comprender los desafíos y oportunidades asociados a el uso de esta tecnología.

Para lograr este objetivo se seleccionaron los métodos de control más adecuados para este tipo de máquinas, siendo estos el esquema de control de flujo orientado (FOC) y el control directo al torque (DTC), se modeló una serie de componentes necesarios, no solo para la representación de la micro-central, sino que también componentes asociados a los sistemas de control. Luego se crearon casos de estudio y se establecieron una serie de indicadores para poder comparar los resultados obtenidos cuando se ocupa cada una de las estrategias, ya sea de forma aislada o conectada a la red.

Como conclusión principal del trabajo se tiene que de acuerdo a los resultados obtenidos a partir de los casos de estudio, tanto el esquema FOC como el DTC son capaces de controlar la máquina, sin embargo cuando se ocupa la estrategia FOC, la respuesta frente a las perturbaciones resulta más rápida, por lo cual considerando los indicadores seleccionados, el diseño del controlador que ocupa esta estrategia sería el ideal para ser posteriormente implementado en el laboratorio.



*Para mis padres,  
Gracias por siempre apoyarme.*



# Agradecimientos

Quisiera agradecer, en primer lugar, a mi familia, por ser un lugar donde podía escapar cuando todo iba mal y también un lugar donde celebrar cuando todo sale bien. Un lugar lleno de cariños, risas y con muchos chistes internos. Me siento privilegiado de formar parte de este maravilloso grupo humano y de poder descubrir el mundo junto a ustedes.

Agradezco a mis padres, Rodolfo y Ximena, no solo por darme siempre su cariño, sino por darme las herramientas necesarias para poder convertirme en una mejor persona. Gracias también por apoyarme en los desafíos que he decidido tomar y por ayudarme en los momentos cuando yo creía que era imposible salir adelante. Les agradezco de corazón y les dedico cada uno de mis logros.

Quisiera agradecer a mis amigos del colegio, Kike, Frijol, Cox, Pancho, Borda, Mono, Gringo y Gonza, quienes han siempre estado ahí, en las buenas y las malas, por los viajes, fiestas y recuerdos que he formado junto a ustedes.

Agradezco a mis amigos de plan común, los Kasuals, Queso, Ditto, Martin, Ponce y Max, por apoyarme cuando me iba mal, por todas las tardes de estudio, por todos los partidos de taca taca, por todos los carretes y por hacer mas amenos esos primeros años en la U.

Agradecer también a mis amigos del DIE, los Sumaria2, Pollito, Cata, Francys y Pato, por todos los almuerzos, tardes de estudio, celebraciones de cumpleaños, carretes, pero por sobre todo las risas. Ustedes hicieron que el paso por eléctrica fuese realmente especial.

Por último, agradecer al profesor Mendoza por ayudarme y guiarme en esta última etapa dentro de la universidad, por confiar en mis habilidades para poder sacar este trabajo adelante, por cada una de las recomendaciones que me dio y por responder a todas mis consultas, por más absurdas que estas fuesen.



# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Objetivo general . . . . .	2
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	2
1.3. Alcances . . . . .	2
1.4. Estructura del documento . . . . .	2
<b>2. Antecedentes</b>	<b>4</b>
2.1. Generación hidráulica . . . . .	4
2.1.1. Clasificación de centrales hidroeléctricas . . . . .	5
2.2. Recurso hídrico . . . . .	5
2.3. Turbinas hidráulicas . . . . .	5
2.4. Generador eléctrico . . . . .	8
2.4.1. Generador síncrono de imanes permanentes . . . . .	8
2.5. Micro-generador FCFM . . . . .	10
2.5.1. Experiencias de laboratorio . . . . .	11
2.6. Conversor AC-DC-AC . . . . .	11
2.7. Estrategias de control para PMSG . . . . .	12
2.7.1. Control de flujo orientado (FOC) . . . . .	13

2.7.2. Control directo de torque (DTC) . . . . .	14
<b>3. Metodología</b>	<b>16</b>
3.1. Implementación . . . . .	17
3.1.1. Turbina y regulador de velocidad . . . . .	17
3.1.2. PMSG . . . . .	19
3.1.3. Control del GSC . . . . .	20
3.1.4. Control FOC del MSC . . . . .	21
3.1.5. Control DTC del MSC . . . . .	22
3.1.6. Casos de estudio . . . . .	23
<b>4. Resultados y análisis</b>	<b>25</b>
4.1. Caso 1 . . . . .	25
4.1.1. Caso 1.a aislado de la red . . . . .	25
4.1.2. Caso 1.b conectado a la red . . . . .	27
4.2. Caso 2 . . . . .	29
4.2.1. Caso 2.a aislado de la red . . . . .	29
4.2.2. Caso 2.b conectado a la red . . . . .	31
<b>5. Conclusiones</b>	<b>34</b>
5.1. Trabajo futuro . . . . .	35
<b>Bibliografía</b>	<b>37</b>
<b>6. Anexos</b>	<b>38</b>
6.1. Parámetros PMSG . . . . .	38
6.2. Parámetros Governor . . . . .	38
6.3. Parámetros control FOC . . . . .	39
6.4. Parámetros control DTC . . . . .	39

6.5. Parámetros control GSC . . . . .	39
6.6. Parámetros filtro y condensador bus DC . . . . .	39
6.7. Parámetros crowbar . . . . .	40

# Índice de Tablas

6.1. Parámetros PMSG. . . . .	38
6.2. Parámetros Governor. . . . .	38
6.3. Parámetros control FOC. . . . .	39
6.4. Parámetros control DTC. . . . .	39
6.5. Parámetros control GSC. . . . .	39
6.6. Parámetros filtro y condensador bus DC. . . . .	39
6.7. Parámetros crowbar. . . . .	40

# Índice de Ilustraciones

2.1. Diagrama de central hidroeléctrica con sus principales componentes. <sup>1</sup> . . . . .	4
2.2. Diagrama de selección de turbinas [6]. . . . .	6
2.3. Diagrama turbina Pelton. <sup>2</sup> . . . . .	7
2.4. Diagrama del inyector [3]. . . . .	8
2.5. Diagrama SPMSG (izquierda) e IPMSG (derecha). . . . .	9
2.6. Esquema de micro-central hidráulica (vista superior) [4]. . . . .	10
2.7. Diagrama de convertor BTB. . . . .	12
2.8. Clasificación de métodos de control de PMSG. . . . .	12
2.9. Esquema general del control FOC. . . . .	13
2.10. Esquema general del control DTC. . . . .	14
3.1. Diagrama de flujo de la metodología empleada. . . . .	16
3.2. Esquema Turbina. . . . .	18
3.3. Esquema gobernador. . . . .	19
3.4. Esquema cálculo de corriente $I_{ds}$ . . . . .	19
3.5. Esquema cálculo de corriente $I_{qs}$ . . . . .	20
3.6. Esquema cálculo de torque eléctrico. . . . .	20
3.7. Esquema cálculo de velocidad y ángulo del rotor. . . . .	20
3.8. Esquema control GSC. . . . .	21
3.9. Esquema control FOC. . . . .	22

3.10. Esquema control DTC. . . . .	23
3.11. Esquema sistema. . . . .	23
4.1. Voltaje DC, Potencia en barra de consumo, Velocidad de rotor, Torque de referencia, mecánico y eléctrico y Altura, caudal y apertura inyector para el caso 1 desconectado de la red ocupando la estrategia FOC. . . . .	26
4.2. Voltaje DC, Potencia en barra de consumo, Velocidad de rotor, Torque de referencia, mecánico y eléctrico y Altura, caudal y apertura inyector para el caso 1 desconectado de la red ocupando la estrategia DTC. . . . .	27
4.3. Voltaje DC, Potencia en barra de consumo, Velocidad de rotor, Torque de referencia, mecánico y eléctrico y Altura, caudal y apertura inyector para el caso 1 conectado de la red ocupando la estrategia FOC. . . . .	28
4.4. Voltaje DC, Potencia en barra de consumo, Velocidad de rotor, Torque de referencia, mecánico y eléctrico y Altura, caudal y apertura inyector para el caso 1 conectado de la red ocupando la estrategia DTC. . . . .	29
4.5. Voltaje DC, Potencia en barra de consumo, Velocidad de rotor, Torque de referencia, mecánico y eléctrico y Altura, caudal y apertura inyector para el caso 2 desconectado de la red ocupando la estrategia FOC. . . . .	30
4.6. Voltaje DC, Potencia en barra de consumo, Velocidad de rotor, Torque de referencia, mecánico y eléctrico y Altura, caudal y apertura inyector para el caso 2 desconectado de la red ocupando la estrategia DTC. . . . .	31
4.7. Voltaje DC, Potencia en barra de consumo, Velocidad de rotor, Torque de referencia, mecánico y eléctrico y Altura, caudal y apertura inyector para el caso 2 conectado a la red ocupando la estrategia FOC. . . . .	32
4.8. Voltaje DC, Potencia en barra de consumo, Velocidad de rotor, Torque de referencia, mecánico y eléctrico y Altura, caudal y apertura inyector para el caso 2 conectado a la red ocupando la estrategia DTC. . . . .	33

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

La generación distribuida (GD) se presenta como uno de los temas de investigación con mayor relevancia durante los últimos años, ya que rompe con los paradigmas tradicionales asociados a la generación de energía al tener los centros de generación cercanos a los centros de consumos. Este tipo de generación cuenta con otras características relevantes, como el hecho que puedan ser instaladas y operadas por cualquier tipo de consumidor, que la venta de la energía puede hacerse a costo marginal o por un precio estabilizado, o la libertad de inyectar sus excedentes de energía en el momento que les sea conveniente.

Pero estas tecnologías toman aún más importancia al momento de electrificar zonas aisladas, debido al alto costo de instalación de un tendido eléctrico, ya que se tendría que instalar una gran cantidad de estructuras y conductores para alimentar un numero pequeño de clientes, en cambio, si se instala generación distribuida este problema se reduce considerablemente debido a que la generación se encontraría cercana al consumo.

En Chile, la generación distribuida esta ampliamente liderada por la tecnología solar, con 880 MW instalados a nivel país, seguida por las centrales mini-hidráulicas con 263 MW instalados. Al observar la distribución geográfica de estas tecnologías se puede ver que la generación distribuida solar está instalada en la zona centro norte del país (proyectos más australes ubicados en la Región de Ñuble), mientras que los proyectos mini-hidráulicos se encuentran fuertemente desarrollados en la zona sur de Chile (Región de Los Lagos con la mayor capacidad instalada de esta tecnología) [1].

Según el Mapa de Vulnerabilidad Energética, en Chile hay 24.556 viviendas sin acceso a energía eléctrica, lo que representa a un 0.4 % de la población a nivel nacional. Cabe destacar que entre las seis regiones mas australes del país se tiene casi un 60 % de las viviendas sin suministro, siendo la Región de Los Lagos la zona con mas casos [2].

Debido a lo anterior, los proyectos mini-hidráulicos toman gran importancia no solo como una manera de fomentar el autoconsumo mediante generación distribuida, sino que también como un método de proveer de energía eléctrica a viviendas ubicadas en zonas remotas. Es

por esto que se debe fomentar el estudio de esta tecnología, no solo de manera teórica sino que también de forma práctica, de esta forma conseguir un mayor entendimiento de los desafíos que se presentan al utilizar este tipo de tecnología ya sea de manera conectada a la red como también de forma aislada.

En virtud de lo anterior, este trabajo busca fomentar el estudio de esta tecnología al diseñar un nuevo sistema de control para el micro-generador hidráulico ubicado en el laboratorio de máquinas hidráulicas del Departamento de Ingeniería Civil Mecánica de la FCFM, el cual no solo permita crear nuevas experiencias de laboratorio para los alumnos sino que también impulse la investigación sobre el uso de esta tecnología y los impactos que esta pueda tener sobre el sistema.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

El objetivo principal de este trabajo es el realizar el diseño de un sistema de control para un micro-generador hidráulico de uso académico, ubicado en el laboratorio de máquinas hidráulicas del Departamento de Ingeniería Civil Mecánica de la Universidad de Chile.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

1. Reconocer las metodologías de control orientadas para este tipo de máquinas y selección de aquellos esquemas que más se alinean con los requerimientos esperados.
2. Crear una plataforma de simulación para poner a prueba los algoritmos previamente seleccionados.
3. Evaluar en base a indicadores el desempeño de los esquemas escogidos y selección el algoritmo con la mejor evaluación general.

## **1.3. Alcances**

El siguiente trabajo tiene como finalidad el diseñar un esquema de control para el micro-generador hidráulico del laboratorio de máquinas hidráulicas del Departamento de Ingeniería Civil Mecánica de la Universidad de Chile a partir de simulaciones de este equipo, a modo de que posteriormente este pueda ser implementado para así impulsar el uso de esta máquina en nuevas experiencias de laboratorio como también en investigaciones sobre las implicancias que tiene el uso de esta tecnología dentro de los diferentes sistemas.

## **1.4. Estructura del documento**

Este documento consta de 6 capítulos, los cuales se presentan a continuación:

El primer capítulo corresponde a la introducción del tema de trabajo, compuesta por una motivación donde se presenta el problema, el objetivo general, los objetivos específicos, los alcances de la memoria y la estructura del presente informe.

El segundo capítulo contiene el marco teórico, el cual tiene por finalidad ser una base conceptual y así facilitar el entendimiento de este trabajo para el lector.

En el tercer capítulo se presenta la metodología utilizada a lo largo del trabajo y la modelación de los casos de estudio y de los componentes mas importantes para la simulación de estos casos.

En el capítulo cuatro se exponen los resultados de los esquemas de control en cada uno de los casos de estudio, así como también el análisis de los resultados obtenidos.

En el quinto capítulo se muestran las conclusiones obtenidas a partir del trabajo realizado, en conjunto con la sección de trabajo futuro.

Por último, en el Anexo se exponen los parámetros de los elementos usados en las simulaciones.

# Capítulo 2

## Antecedentes

En este capítulo se explican los conceptos teóricos más relevantes para poder entender el trabajo realizado sin dificultades. También se mostrarán las características principales del micro-generador hidráulico ubicado en el laboratorio de máquinas hidráulicas del Departamento de Ingeniería Civil Mecánica.

### 2.1. Generación hidráulica

Esta tecnología se basa en el aprovechamiento de la energía almacenada en el recurso hídrico para transformarla en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica. Para realizar estos procesos de transformación de energía, las centrales hidráulicas poseen un sistema de captación de agua, una turbina hidráulica y un generador eléctrico, entre su gran cantidad de componentes.



Figura 2.1: Diagrama de central hidroeléctrica con sus principales componentes. <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Imagen obtenida de [www.areatecnologia.com](http://www.areatecnologia.com)

### 2.1.1. Clasificación de centrales hidroeléctricas

Las centrales hidroeléctricas se pueden clasificar según diversos criterios, por ejemplo por el tipo de turbina hidráulica usada, la cantidad de potencia que producen o según las características del cuerpo de agua que ocupan para su funcionamiento. Sin embargo para los motivos de este trabajo, la clasificación que más nos interesa es según la potencia, donde se encuentra la siguiente lista [3] [4]:

- Centrales grandes: Las cuales poseen una potencia superior a los 100 MW.
- Centrales medianas: Con potencias entre los 15 MW y los 100 MW.
- Centrales pequeñas: Con potencias entre 1 MW y 15 MW.
- Mini centrales: Con potencias entre los 100 kW y los 1000 kW.
- Micro centrales: Con potencias entre los 5 kW y los 100 kW.
- Pico centrales: Con potencias menores a los 5 kW.

## 2.2. Recurso hídrico

La generación hidráulica se basa en el aprovechamiento de la energía almacenada en los cuerpos de agua, los cuales tienen las siguientes propiedades:

- Caudal ( $Q$ ): Volumen de agua que fluye por una sección determinada por unidad de tiempo.
- Altura neta equivalente ( $H_n$ ): Corresponde a la diferencia vertical entre la superficie del agua y la turbina, considerando las pérdidas asociadas al circuito hidráulico que guía el agua hasta la turbina.

Debido a que para la generación de energía eléctrica la energía cinética es despreciable al compararla con el valor de la energía potencial, la potencia del recurso hidráulica viene dada por la siguiente ecuación [5] [4]:

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

Donde,

- $\rho$ : corresponde a la densidad del fluido
- $g$ : corresponde a la aceleración de gravedad.

En condiciones normales se debe tener en consideración las variaciones de caudal y la cantidad de material particulado dentro del fluido, pero para este caso particular se tiene que el caudal está controlado y por ende las variaciones de caudal son despreciables y al ocupar agua desde un estanque se supone que el material en suspensión dentro del fluido también es despreciable.

## 2.3. Turbinas hidráulicas

La turbina es uno de los elementos esenciales en cualquier central hidroeléctrica, su función es transformar la energía del fluido en energía mecánica. La transferencia de energía ocurre

cuando el fluido impacta a los alabes del rotor de la turbina, produciendo un torque en la turbina generando así la rotación de esta.

Dependiendo de la altura y caudal del recurso hídrico se utilizará alguno de los siguientes tipos de turbinas [6] [4]:

- Turbina Kaplan: Utilizadas en casos de alto caudal y baja altura neta.
- Turbina Pelton: Utilizadas en casos de bajo caudal y gran altura neta.
- Turbina Francis: Utilizadas en casos donde el caudal y la altura neta no son ni muy altos o muy bajos.

En la Figura 2.2 se puede apreciar un gráfico en donde se observa el tipo de turbina más adecuada dependiendo de la altura neta y el caudal del recurso hídrico:

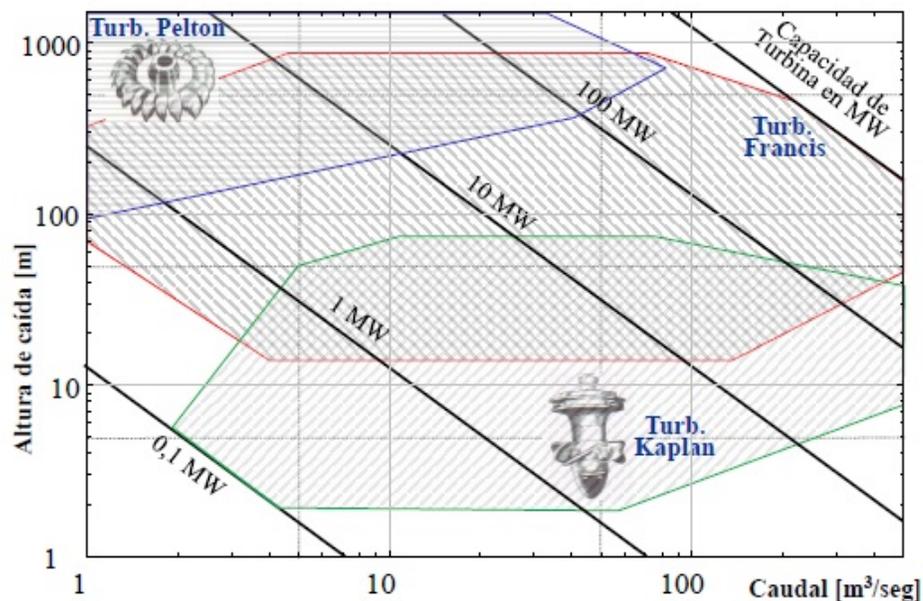


Figura 2.2: Diagrama de selección de turbinas [6].

En este trabajo de memoria, se ocupará la turbina Pelton diseñada y construida en el trabajo de Tesis de Juan Carlos Arís [7], este tipo de turbina tiene un rodete circular montado sobre un eje, este rodete está conformado por alabes de tipo “cuchara” los cuales están equiespaciados en la periferia del rodete y posicionados a la misma distancia del eje de rotación.

Para dirigir el fluido a los alabes de la turbina se ocupa un inyector o distribuidor, el cual puede variar la sección de paso del agua con motivo de regular la cantidad de fluido que impacta con los alabes y así la rotación de esta. En la Figura 2.3 se observa un diagrama de este tipo de turbina.

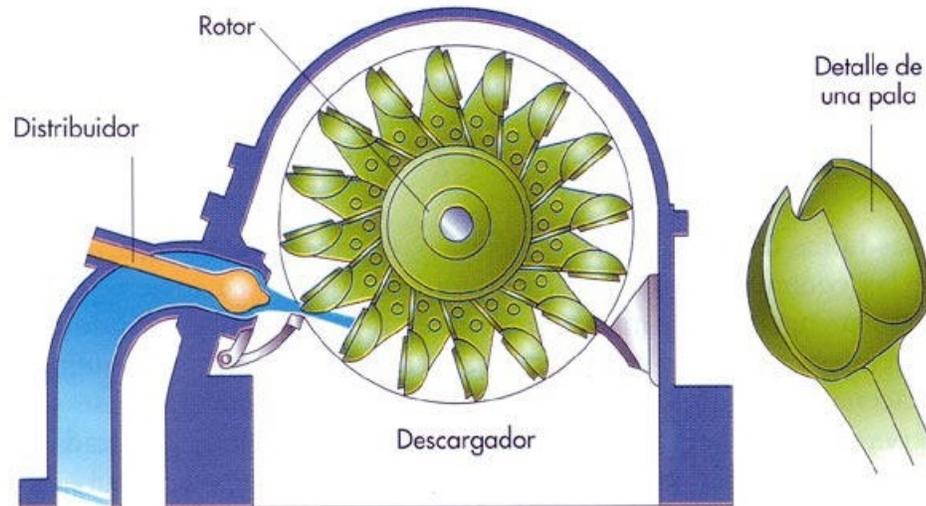


Figura 2.3: Diagrama turbina Pelton.<sup>2</sup>

Conociendo el rendimiento de la turbina se puede obtener la potencia de la turbina según la ecuación 2.2 [3]:

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

Donde,

- $P_m$ : Potencia mecánica de la turbina en  $[kW]$ .
- $P_h$ : Potencia hidráulica del recurso hídrico en  $[kW]$ .
- $\eta_{global}$ : Rendimiento global de la turbina.

Como ya se mencionó anteriormente, en las turbinas Pelton se ocupa un inyector, el cual regula el caudal que impacta a los alabes de la turbina controlando así la potencia mecánica que se puede producir.

La regulación se realiza mediante el movimiento de una válvula aguja, la cual al acercarse a la salida del inyector produce un estrangulamiento del caudal hacia la turbina, esto debido a que la cabeza de la aguja tiene un diámetro mayor a la salida del inyector. Por otra parte, a medida que la aguja se aleja de la salida del inyector, esta crea un espacio mayor para el paso del agua hacia la turbina, permitiendo que un caudal mayor impacte con los alabes de la turbina.

En la Figura 2.4 se observan los principales componentes del inyector:

<sup>2</sup>Imagen obtenida de [www.monografias.com](http://www.monografias.com)

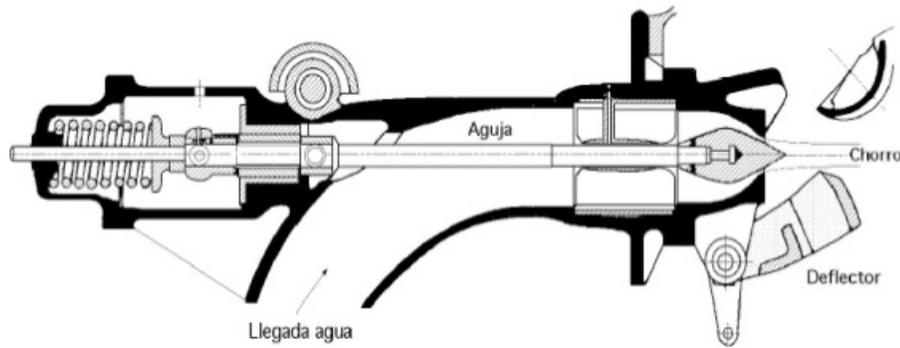


Figura 2.4: Diagrama del inyector [3].

Cabe destacar que dependiendo de las características de la turbina y del inyector puede ser necesario instalar más de un inyector por turbina. En el caso de la micro central hidráulica solo se ocupa un inyector para la alimentación de la turbina.

## 2.4. Generador eléctrico

El generador es el elemento principal dentro de cualquier central generadora de energía, este elemento transforma la energía mecánica, la cual es suministrada por algún tipo de turbina acoplada al eje del rotor de la máquina, en energía eléctrica. Por lo general, se ocupan los siguientes tipos de máquinas [6] [8]:

- Máquinas asincrónicas: También llamadas máquinas de inducción, son máquinas compuestas por un rotor bobinado cortocircuitado y un estator con sus bobinas agrupadas en tres fases que son alimentadas desde la red. El principio que gobierna estas máquinas es la inducción electromagnética (Ley de Faraday-Lenz) entre los enrollados del rotor y estator. Dentro de esta familia de máquinas se encuentran las máquinas de rotor bobinado y las máquinas de rotor de jaula de ardilla.
- Máquinas sincrónicas: Estas máquinas tienen un estator alimentado con corriente alterna mientras que su rotor tiene alimentación continua, ya sea a través de enrollados alimentados por una fuente DC o por un imán permanente. En estas máquinas el rotor genera un campo magnético constante el cual al rotar induce una tensión en el estator debido a que el flujo enlazado varía debido al giro del rotor, esta tensión inducida tiene una frecuencia igual a la velocidad de giro de la máquina, debido a esto se denominan máquinas sincrónicas. Clasificando estas máquinas según la topología de su rotor se pueden encontrar las máquinas de polos salientes, de rotor cilíndrico y de imanes permanentes.

### 2.4.1. Generador síncrono de imanes permanentes

Los generadores de imanes permanentes (PMSG) corresponden a las máquinas sincrónicas más simples, ya que no es necesario el uso de anillos rozantes para la alimentación del rotor.

Esto genera ventajas sobre las otras configuraciones, como bajo mantenimiento y costo debido al menor número de componentes, sin embargo, también crea desventajas como el

limitado uso de estas máquinas para aplicaciones de alta potencia debido a que, por lo general, las densidades de flujo magnético de los imanes son bajas. Adicionalmente, los imanes permanentes crean un campo magnético fijo no controlable a diferencia de los rotores con enrollados de excitación donde se puede controlar la densidad de flujo magnético.

Existe una clasificación de estas máquinas dependiendo de la posición de los imanes permanentes en el rotor, aquí se encuentran las máquinas con imanes montados en la superficie del rotor (SPMSG) y las máquinas con imanes al interior del rotor (IPMSG). En la Figura 2.5 se puede observar la posición de los imanes dentro del rotor.

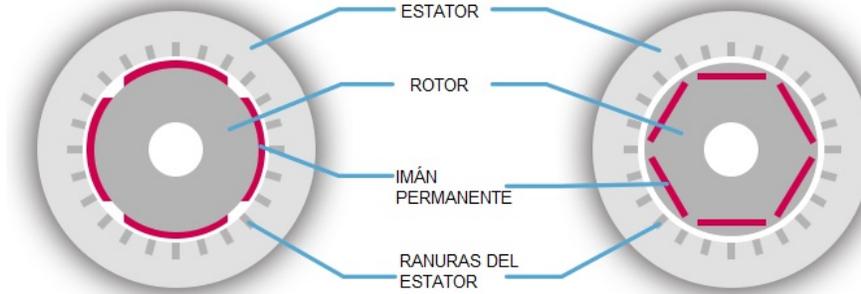


Figura 2.5: Diagrama SPMSG (izquierda) e IPMSG (derecha).

A continuación se muestra la modelación matemática de este tipo de generador en los ejes  $dq$  [9] [10]:

$$u_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_e L_q i_{qs} + L_d \frac{di_{ds}}{dt} \quad (2.3)$$

$$u_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_e L_d i_{ds} + \omega_e \Psi + L_q \frac{di_{qs}}{dt} \quad (2.4)$$

$$T_e = \frac{3P}{2} (\Psi i_{qs} - (L_d - L_q) i_{ds} i_{qs}) \quad (2.5)$$

$$T_e - T_m = J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (2.6)$$

$$\omega_e = P \omega_r \quad (2.7)$$

Donde,

- $u_{ds}$  y  $u_{qs}$  corresponden a los voltajes en ejes  $dq$  en el estator.
- $R_s$  es la resistencia de los enrollados del estator.
- $i_{ds}$  y  $i_{qs}$  corresponden a las corrientes en ejes  $dq$  en el estator.
- $\omega_r$  es la velocidad de giro del rotor.
- $L_q$  y  $L_d$  son las inductancias del generador en los ejes  $dq$ .
- $\Psi$  es el flujo propio del imán permanente.
- $P$  es el número de pares de polos.

- $J$  es el momento de inercia del generador.
- $T_m$  corresponde al torque mecánico en el eje del rotor.
- $T_e$  es el torque electromagnético producido por el generador.

En caso de tratarse de un generador de imanes permanentes montados en la superficie del rotor (SPMSG) se tiene que  $L_q = L_d$ , por lo cual la ecuación 2.5 se reduce a:

$$T_e = \frac{3P}{2} \Psi i_{qs} \quad (2.8)$$

## 2.5. Micro-generador FCFM

A modo de cumplir con el objetivo principal de este trabajo se debe tener en consideración las características de los equipos del micro-generador, para esto en la Figura 2.6 se muestra un esquema del micro-generador hidráulico ubicado en el laboratorio de máquinas hidráulicas del Departamento de Ingeniería Civil Mecánica de la Universidad de Chile.

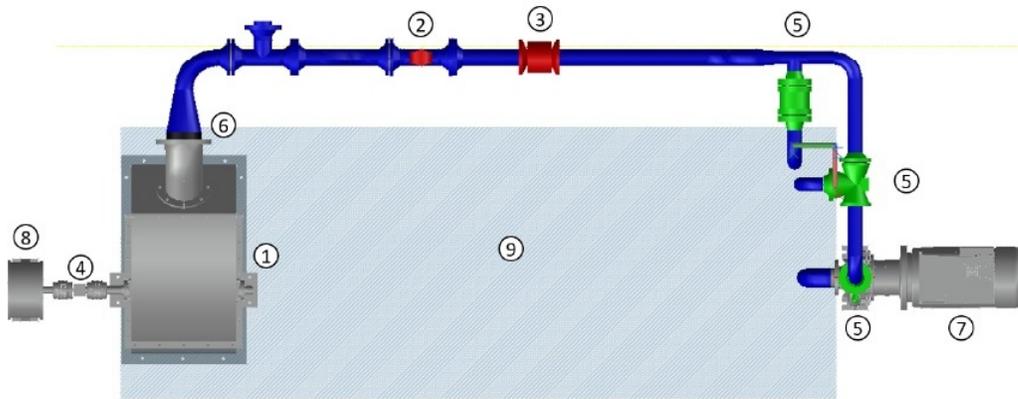


Figura 2.6: Esquema de micro-central hidráulica (vista superior) [4].

Donde,

1. Housing (Diseñado por Jose Moreira [11]) y turbina hidráulica tipo Pelton (Diseñada por Juan Carlos Arís [7]).
2. Medidor de presión.
3. Medidor de caudal.
4. Medidor de torque.
5. Conjunto de válvulas.
6. Inyector (Diseñado por Juan Carlos Arís [7]).
7. Bomba centrífuga y variador de frecuencia.
8. Generador.
9. Pozo con agua.

En la micro-central se tiene un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG) de 8 polos, el cual tiene una potencia nominal de 10 kW, una velocidad nominal de 750 RPM y entrega un voltaje de 380  $V_{AC}$  entre fases.

Cabe destacar que el diseño e implementación del circuito hidráulico fue realizado por Ítalo Campodónico en su trabajo de título [4], y que para simular cargas se ocupa un banco con estufas eléctricas el cual es conectado a la salida del generador.

### 2.5.1. Experiencias de laboratorio

Actualmente existen dos experiencias de laboratorio en las cuales se ocupa la micro-central, estas son:

1. Experiencia n°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.

En este caso se varía la carga eléctrica al conectar y desconectar estufas, lo que producirá una variación en el torque eléctrico de la máquina y por ende a la frecuencia del sistema. Entonces para controlar esta variación de frecuencia se regula el caudal suministrado a la turbina mediante el movimiento de la posición de la aguja del inyector, la cual es controlada mediante un servomotor.

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

En este caso se controlará la altura y caudal del agua que se suministra al circuito hidráulico mediante el variador de frecuencia que alimenta la bomba centrífuga de la micro-central y, al mismo tiempo, se controla el caudal que alimenta la turbina mediante el servomotor.

## 2.6. Conversor AC-DC-AC

Los convertidores AC-DC-AC o *Back to Back* (BTB) son altamente utilizados en casos de interconexiones de sistemas de corriente alterna, ya que permiten controlar de manera independiente los flujos de potencia activa y reactiva entre los sistemas, ya sean de baja o alta potencia, lo que permite que sean usados en un gran número de aplicaciones. Es debido a lo anterior, que el uso de convertidores BTB modulados mediante técnicas de modulación de ancho de pulsos (PWM) se haya incrementado en el último tiempo [12].

En la Figura 2.7 se observa el diagrama de un conversor BTB formado por dos convertidores tipo fuente de tensión (VSC) y un puente de corriente continua que une ambos convertidores el cual permite que los VSC puedan ser controlados independientemente dentro de un cierto rango de potencia.

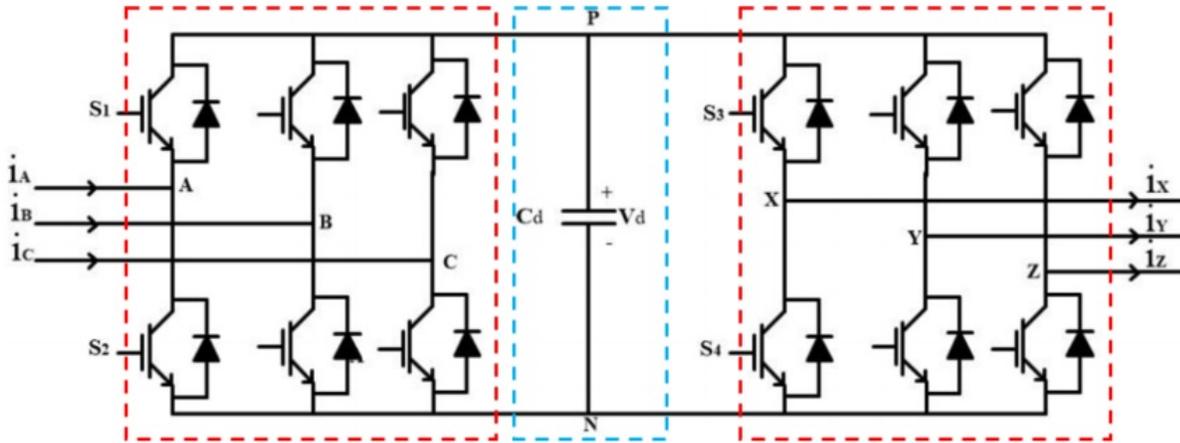


Figura 2.7: Diagrama de convertidor BTB.

Para los alcances de este trabajo se ocupará un convertidor BTB como el mostrado en la Figura 2.7, donde el VSC conectado a la red o carga se llamará Convertidor del Lado de la Red (GSC) y el VSC conectado al PMSG se llamará Convertidor del Lado de la Máquina (MSC), y será justamente sobre este último en el cual se implementarán los métodos de control del PMSG.

## 2.7. Estrategias de control para PMSG

Los algoritmos de control para PMSG se pueden clasificar de forma generalizada en dos grandes grupos, los métodos de control escalar y los métodos de control vectorial [10] [13], tal como se observa en la Figura 2.8. Los métodos de control escalar se basan en relaciones válidas para el estado estacionario, donde la magnitud y frecuencia de los vectores de voltaje, corriente y flujos enlazados son controlados. Por otra parte, los métodos de control vectorial se basan en relaciones dinámicas donde no solo se controla la frecuencia y magnitud de los vectores de voltaje, corriente y flujo, sino que también se controla la posición de estos.

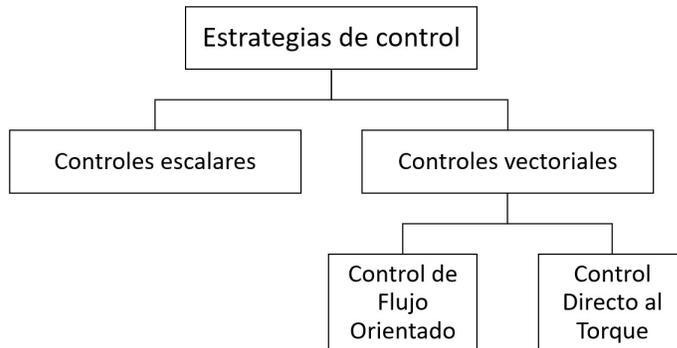


Figura 2.8: Clasificación de métodos de control de PMSG.

Dentro de los métodos de control vectorial se pueden encontrar dos grandes tipos, los de control de flujo orientado y los de control directo al torque. Es necesario mencionar que la

gran mayoría de las veces estos controles se ocupan en conjunto con otros lazos de control para mejorar el rendimiento de los controladores.

### 2.7.1. Control de flujo orientado (FOC)

En este esquema de control las ecuaciones del PMSG son transformadas a un sistema de coordenadas que rota solidariamente con el flujo del imán permanente. Esto permite que mediante un lazo de control de corriente, sea posible controlar indirectamente el torque electromagnético de la máquina, debido a la relación presentada en la ecuación 2.9.

$$T_e = \frac{3P}{2} \Psi i_{qs} \quad (2.9)$$

Para realizar este control existen varias estrategias como [14]:

- Control de ángulo constante.
- Control de maximización del torque por Ampere.
- Control de factor de potencia unitario.
- Control de flujo del estator constante.

Sin embargo por simplicidad se ocupará el control de ángulo constante, el cual se caracteriza por mantener el ángulo del torque de la maquina constante en  $90^\circ$ . Para realizar lo anterior, es necesario mantener la corriente del eje  $d$  en 0, lo cual hace que la corriente del estator este conformada únicamente por corriente del eje  $q$ , y ya que el flujo del imán permanente y el ángulo del torque son constantes, la amplitud del torque depende directamente de la amplitud de la corriente del eje  $q$  ( $i_{qs}$ ).

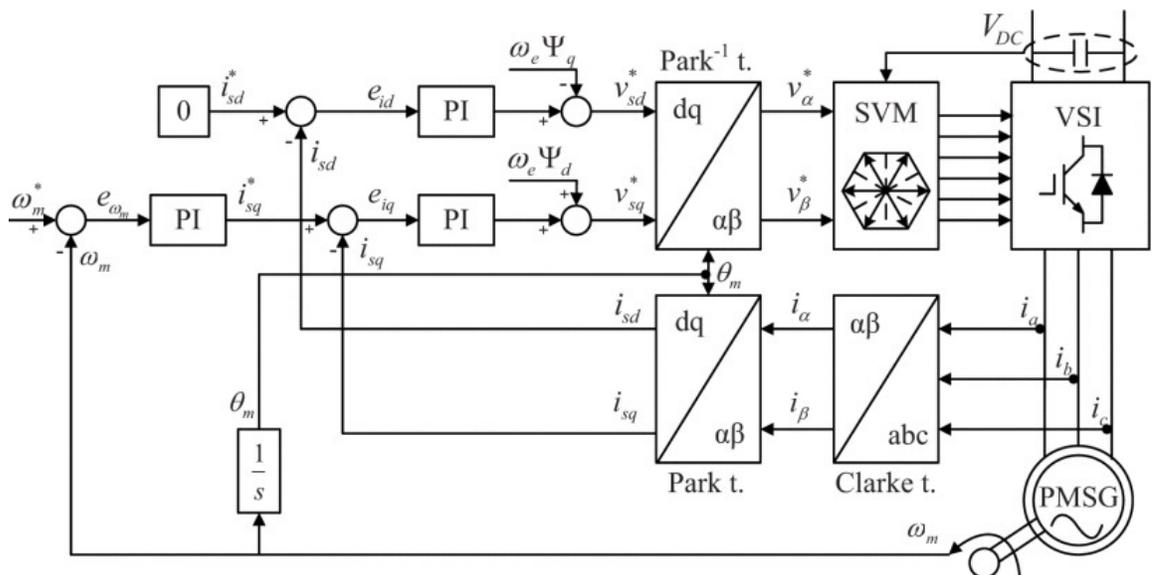


Figura 2.9: Esquema general del control FOC.

## 2.7.2. Control directo de torque (DTC)

El nombre de esta estrategia de control viene dado por el hecho que se puede controlar la maquina sin la necesidad de lazos de corriente (como es el caso para el FOC), sino que mediante la medición del error del torque y flujo de la máquina. Estos errores se obtienen al comparar los valores de referencia contra los valores estimados mediante modelos de generación o curvas de operación del generador.

Sin embargo, este tipo de control tiene algunas desventajas, como el hecho que crea grandes pulsos en el torque de la máquina, para eliminar este fenómeno es común que se ocupe el DTC en conjunto con modulación para vectores espaciales (*Space vector modulation* o SVM), tal como se observa en la Figura 2.10.

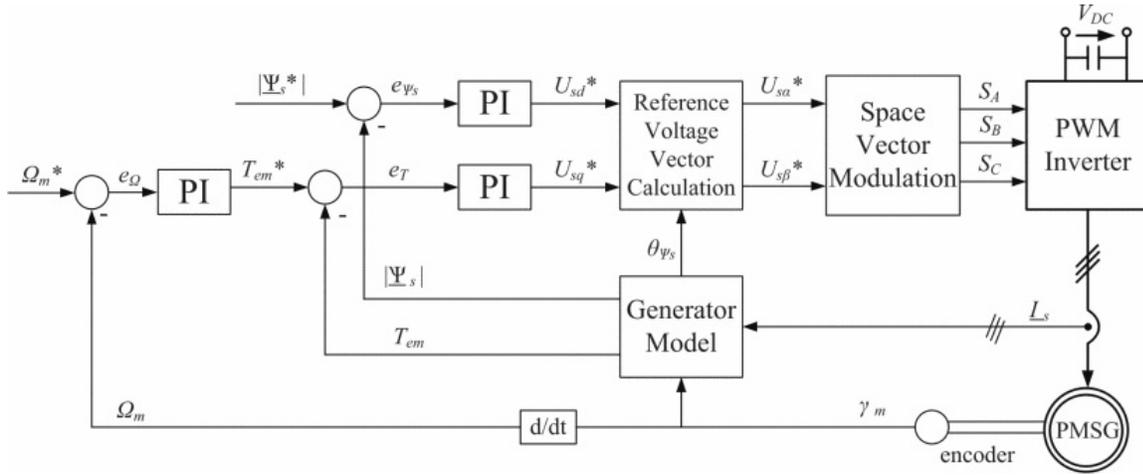


Figura 2.10: Esquema general del control DTC.

Este control se encuentra basado en un análisis de la ecuación del torque electromagnético de la maquina al escribirla de la siguiente manera

$$T_e = \frac{3P}{2} \Psi \frac{|\Psi_s| \sin(\delta_\Psi)}{L_q} \quad (2.10)$$

El reemplazo anterior viene dado por

$$\begin{aligned} \Psi_q &= |\Psi_s| \sin(\delta_\Psi) = i_{sq} L_q \\ \rightarrow i_{sq} &= \frac{|\Psi_s| \sin(\delta_\Psi)}{L_q} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Donde  $\Psi_q$  es el flujo del eje  $q$  del rotor,  $|\Psi_s|$  es la magnitud del flujo del estator y  $\delta_\Psi$  corresponde al ángulo de torque (ángulo entre el vector del flujo del estator y el vector del flujo del imán permanente).

De la ecuación 2.10 se puede apreciar que si  $|\Psi_s|$  es constante entonces es posible controlar el torque de la maquina al variar  $\delta_\Psi$ , y es posible cambiar el ángulo al variar la posición del

vector del flujo del estator con respecto al vector del flujo del imán permanente mediante el vector de voltaje suplido por el inversor.

Cabe destacar que en régimen estacionario  $\delta_\Psi$  permanece constante, mientras que los flujos del estator y rotor giran a velocidad síncrona. Por otra parte, en un régimen transitorio se tiene que  $\delta_\Psi$  varia y el flujo del rotor y estator rotan a velocidades distintas, pero aun así es más fácil de controlar que las corrientes en ejes  $dq$ , por lo cual en general se tiene que el DTC tiene una mejor respuesta que el FOC ante perturbaciones, mientras que el comportamiento en régimen estacionario entre ambos esquemas es similar [15].

# Capítulo 3

## Metodología

En la Figura 3.1 se muestra el esquema de la metodología a utilizar a lo largo del trabajo, el cual permitirá finalmente escoger el mejor sistema de control para el micro generador.

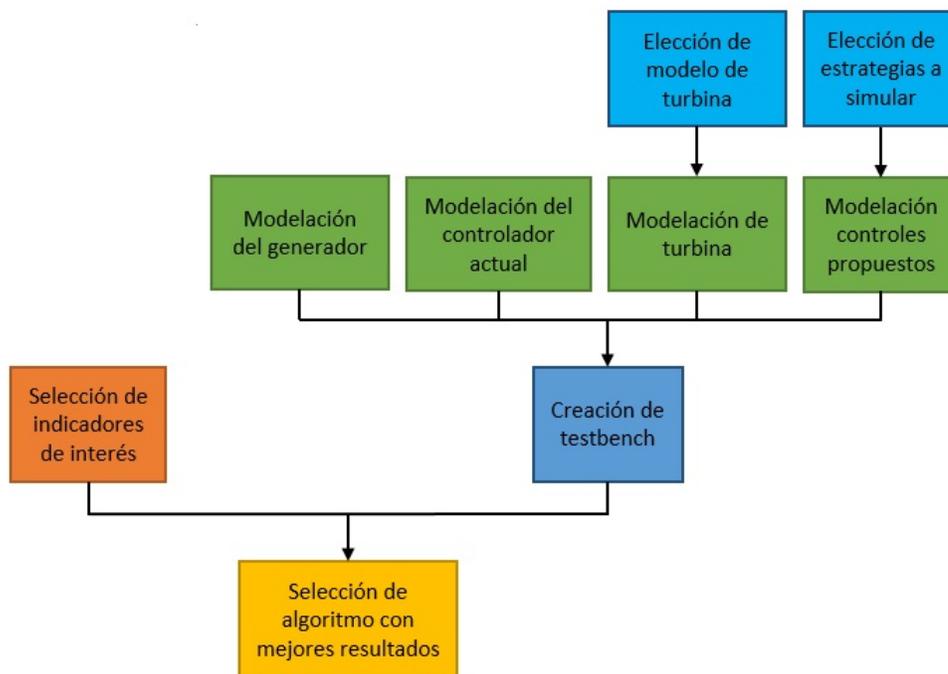


Figura 3.1: Diagrama de flujo de la metodología empleada.

Esta metodología consta de 5 fases las cuales están distinguidas por los distintos colores en la Figura 3.1:

1. Elección de modelos: Se elige tanto el modelo de turbina como de las estrategias de control a simular
2. Modelación de elementos: En esta fase se realizan los modelos de los distintos componentes necesarios para la simulación.

3. Creación de los casos de estudio o testbench: Se crea un entorno de pruebas el cual tenga sentido con las experiencias actuales del laboratorio a modo de comparar los resultados de la simulación con distintos controladores.
4. Selección de indicadores: A modo de comparar las estrategias de control se observarán los valores más relevantes para las simulaciones.
5. Selección de mejor estrategia de control: De acuerdo a los resultados obtenidos y el comportamiento de los valores observados se escoge la estrategia de control que halla presentado un mejor comportamiento en los casos de estudio.

## 3.1. Implementación

A continuación, se procede a mostrar los diferentes esquemas utilizados para la modelación de los distintos componentes, los cuales fueron implementados en Matlab-Simulink. Además de la simulación de componentes se muestra también los esquemas de los casos de estudio para la comparación de los algoritmos de control.

### 3.1.1. Turbina y regulador de velocidad

Para la modelación de la turbina se ocupó un modelo de turbina no-lineal [16] [17] , el cual tiene los siguientes supuestos:

- El roce en las palas de la turbina es despreciable.
- El fluido es incompresible.
- La potencia mecánica de la turbina es proporcional a el producto del caudal y la altura del agua.

Con los supuestos anteriores se obtiene que la relación entre el caudal, la altura neta y la apertura del inyector tiene la siguiente forma:

$$Q = G\sqrt{H} \quad (3.1)$$

Donde  $Q$  es el caudal en  $m^3/s$ ,  $G$  es la apertura en  $rad$  y  $H$  es la altura neta en  $m$ .

La potencia mecánica de la turbina también puede ser descrita por estos términos de la siguiente manera:

$$P_m = A_t H (Q - Q_{nl}) \quad (3.2)$$

En este caso se tiene que  $A_t$  corresponde a la ganancia de la turbina, la cual puede ser expresada por  $A_t = \frac{1}{\bar{g}_{fl} - \bar{g}_{nl}}$ , donde  $\bar{g}_{fl}$  y  $\bar{g}_{nl}$  corresponden a la apertura en p.u. para el caso con carga máxima y sin carga.  $Q_{nl}$  es el caudal para el caso sin carga.

Modificando la ecuación 3.1 se puede describir la velocidad del agua de la siguiente manera:

$$U = K_u G \sqrt{H} \quad (3.3)$$

Donde  $U$  es la velocidad del agua y  $K_u$  es una constante.

Una vez conocida la velocidad del agua, se puede establecer una relación entre el caudal y la velocidad del agua.

$$Q = AU \quad (3.4)$$

Donde  $A$  es el área transversal en  $m^2$ .

La aceleración del agua viene dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{a_g}{L}(H - H_0) \quad (3.5)$$

Donde  $a_g$  es la aceleración de gravedad,  $L$  es el largo de las tuberías y  $H_0$  se asume como una altura estática de altura 1 pu.

Normalizando la ecuación 3.3 y despejando  $H$  se obtiene:

$$\bar{H} = \left(\frac{\bar{U}}{\bar{G}}\right)^2 \quad (3.6)$$

Finalmente la relación entre caudal y altura se puede anotar de la siguiente forma:

$$\frac{\bar{U}}{H - H_0} = \frac{-1}{T_w s} \quad (3.7)$$

Donde  $T_w = \frac{LQ_n}{a_g A H_n}$  corresponde a la constante de tiempo del agua en  $s$ . La implementación de la turbina en Simulink se puede observar en la Figura 3.2:

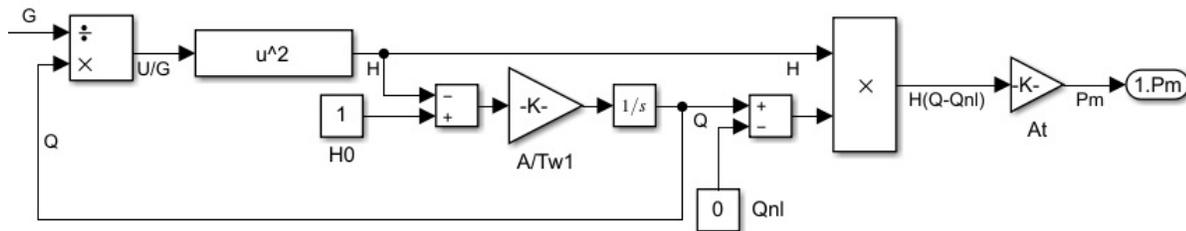


Figura 3.2: Esquema Turbina.

La modelación del regulador de velocidad o governor consta de un control PID el cual recibe el error en la velocidad del rotor y entrega la posición para la compuerta. Esta señal es luego recibida por el servomotor el cual es modelado por su función de transferencia, un saturador que actúa como limitador de velocidad y un integrador limitado el cual entrega la posición final de la compuerta [17] [16]. En la Figura 3.3 se puede ver el esquema implementado en Simulink de estos componentes.

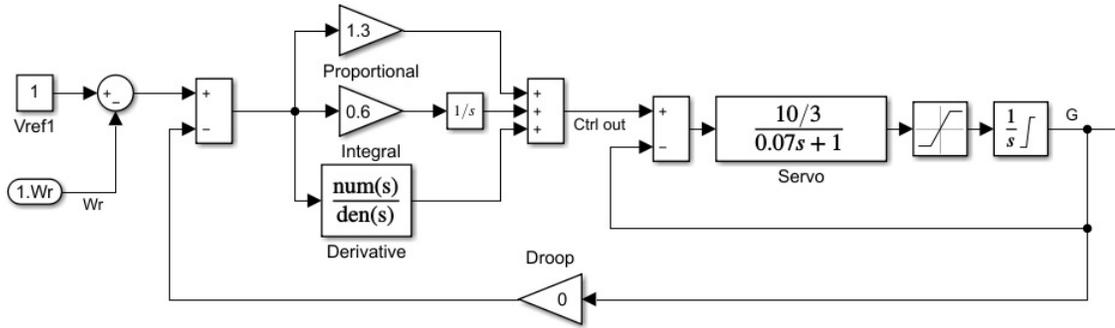


Figura 3.3: Esquema governor.

### 3.1.2. PMSG

Para el modelamiento del PMSG se ocuparon las ecuaciones mostradas en la sección 2.4.1, con la única diferencia que se despejaron las corrientes en las ecuaciones 2.3 y 2.4, las cuales quedan de la siguiente manera:

$$\frac{di_{ds}}{dt} = \frac{u_{ds} - R_s i_{ds} + \omega_e L_q i_{qs}}{L_d} \quad (3.8)$$

$$\frac{di_{qs}}{dt} = \frac{u_{qs} - R_s i_{qs} - \omega_e L_d i_{ds} - \omega_e \Psi}{L_q} \quad (3.9)$$

Tomando lo anterior en consideración la modelación en Simulink de la ecuación 3.8 queda de la siguiente forma:

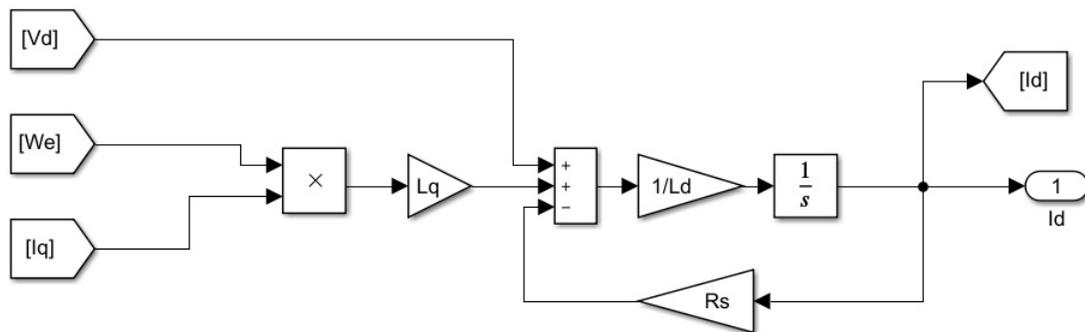


Figura 3.4: Esquema cálculo de corriente  $I_{ds}$ .

De la misma forma la modelación de la ecuación 3.9 queda:

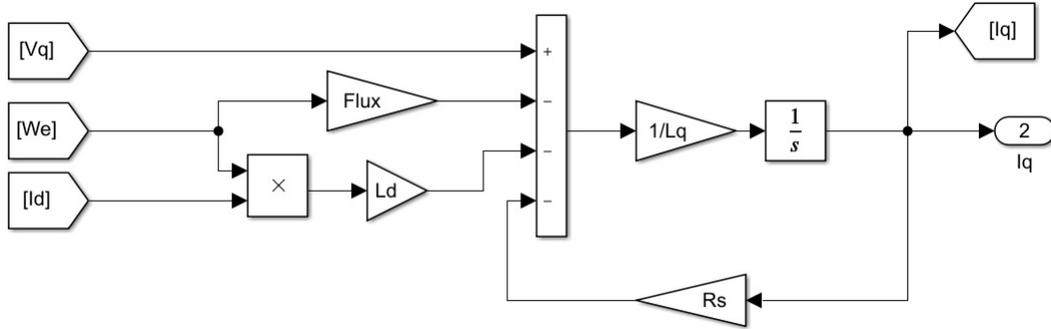


Figura 3.5: Esquema cálculo de corriente  $I_{qs}$ .

Por otra parte para el cálculo del torque eléctrico se implementa la ecuación 2.5 de la siguiente manera:

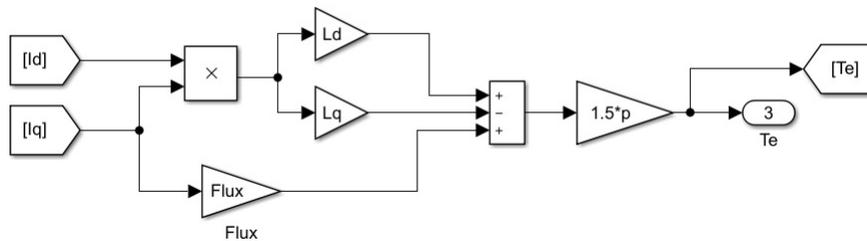


Figura 3.6: Esquema cálculo de torque eléctrico.

Por último, las ecuaciones 2.6 y 2.7 se modelan juntas, como se puede observar en la siguiente imagen:

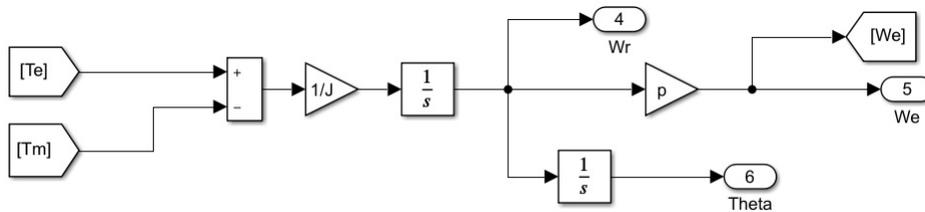


Figura 3.7: Esquema cálculo de velocidad y ángulo del rotor.

### 3.1.3. Control del GSC

Este controlador busca regular el voltaje del link-DC y de esta forma regular también la potencia entregada a la red. En la Figura 3.8, se observa que el lazo del eje  $d$  se ocupa para el control del voltaje DC. Debido a que existe una relación directa entre el voltaje del link-DC,

la potencia activa y la corriente del eje  $d$  del GSC, al usar un control PI se puede considerar la salida del control de voltaje DC como la consigna de corriente de referencia para este lazo.

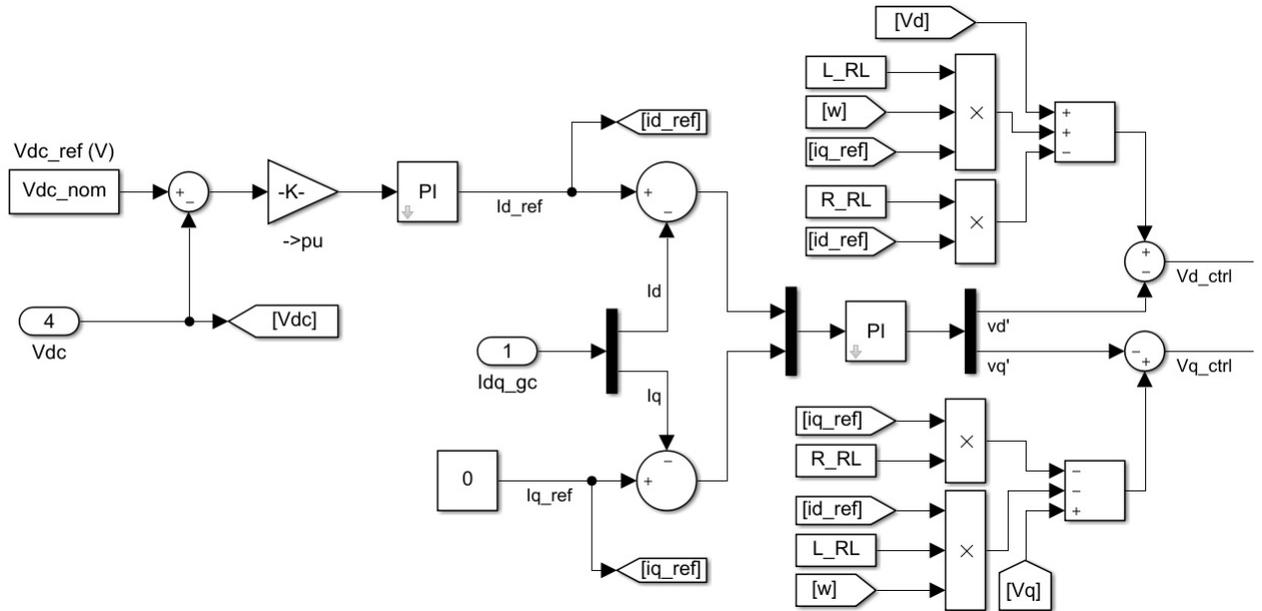


Figura 3.8: Esquema control GSC.

Como se puede ver de la Figura 3.8, al comparar la corriente del eje  $d$  con su referencia y luego de pasar por el control PI se puede obtener la señal de voltaje de referencia del eje  $d$  ( $vd'$ ), esta señal luego es restada con los términos de desacople de los ejes, los cuales vienen dados por el voltaje de la red y las caídas de voltajes de los componentes del filtro del lado de la red.

El proceso en el lazo del eje  $q$  es similar, con la diferencia que la potencia reactiva está asociada a la corriente del eje  $q$ , y en este caso se quiere que el convertidor transfiera la mayor cantidad de potencia activa posible, por lo cual se ocupa una referencia igual a 0 para la corriente de este eje.

Para proteger el condensador del bus DC ante sobre voltajes se instala en paralelo una protección tipo crowbar, la cual consta de una resistencia y un IGBT. Cuando el voltaje del link-DC supera los supera un límite se activa el IGBT permitiendo que se vierta energía por medio de la resistencia hasta que el voltaje sea menor a otro limite, momento donde se deja de enviar la señal a la compuerta o *gate* del IGBT.

### 3.1.4. Control FOC del MSC

Tal como se comentó en la sección 2.7.1 para este controlador es necesario establecer la corriente del eje  $d$  igual a 0, mientras que la corriente del eje  $q$  será establecida según el torque electromagnético de referencia ( $Te\_ref$ ).

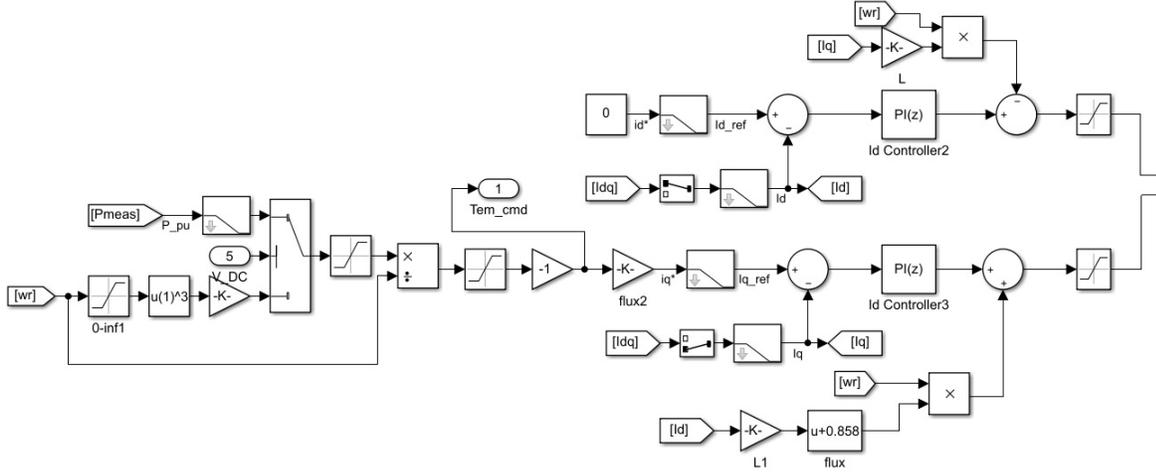


Figura 3.9: Esquema control FOC.

En este caso el cálculo de  $Te_{ref}$  viene dado por un seguidor del punto de máxima potencia (MPPT) cuando el voltaje del link-DC es menor a 720 V, mientras que cuando el voltaje supera este valor se ocupa la potencia entregada por el GSC para el cálculo de  $Te_{ref}$ . Ya obtenido  $Te_{ref}$  se procede a calcular la corriente del eje  $q$  de referencia, esto se realiza despejando  $i_{qs}$  de la ecuación 2.9, luego de esto se procede a comparar las corrientes de referencia con los valores actuales, obteniendo así una señal de error para cada eje las cuales se hacen de pasar por los controles PI de cada lazo de control para obtener los voltajes de referencia de cada lazo.

Sin embargo, cuando se realizan cambios en la corriente de uno de los ejes la corriente del otro eje también se ve afectada, por lo cual es necesario desacoplar estas señales lo cual es realizado mediante las fórmulas 3.10:

$$\begin{cases} Vd_{ctrl} = Vd - w_e L_q i_q \\ Vq_{ctrl} = Vq - w_e L_d i_d + w_e \Psi \end{cases} \quad (3.10)$$

### 3.1.5. Control DTC del MSC

Tal como se mencionó en la sección 2.7.2, para realizar este control es necesario tener un torque y flujo del estator de referencia y a la vez realizar una estimación de los valores actuales de estos términos, los cuales son calculados mediante las siguientes formulaciones realizadas en el sistema estacionario  $\alpha\beta$ .

$$\begin{aligned} \Psi_\alpha &= \int (v_\alpha - i_\alpha R_s) \\ \Psi_\beta &= \int (v_\beta - i_\beta R_s) \end{aligned} \quad (3.11)$$

Donde  $v_\alpha$ ,  $v_\beta$ ,  $i_\alpha$  y  $i_\beta$  son los voltajes y corrientes del estator en los ejes  $\alpha\beta$ ,  $\Psi_\alpha$  y  $\Psi_\beta$  corresponde a el flujo del estator en coordenadas  $\alpha\beta$  y  $R_s$  es la resistencia del estator. Con estos términos se procede a calcular el torque y el flujo total del estator como se muestra en 3.12 y 3.13 respectivamente

$$T_e = \frac{3p}{2}(\Psi_\alpha i_\beta - \Psi_\beta i_\alpha) \quad (3.12)$$

$$\Psi_s = \sqrt{\Psi_\alpha^2 + \Psi_\beta^2} \quad (3.13)$$

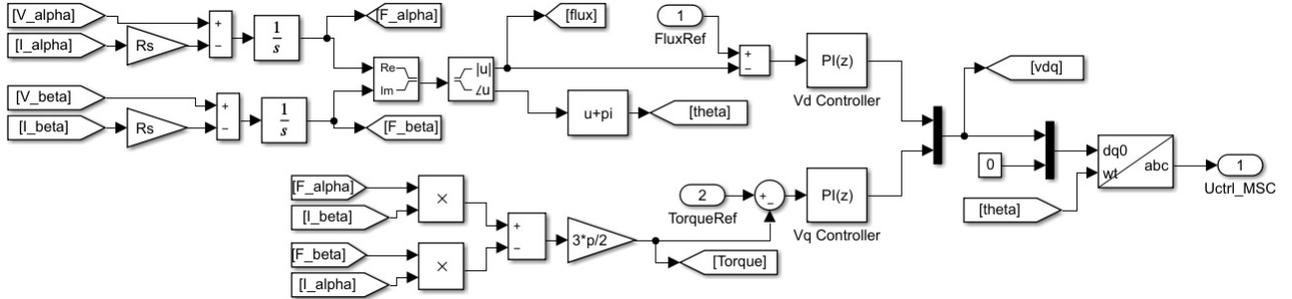


Figura 3.10: Esquema control DTC.

En este caso para proveer el torque de referencia se ocupa el mismo esquema del cálculo mostrado en la Figura 3.9, mientras que para el flujo de referencia se ocupa un valor constante de 0.8693. Luego de comparar los valores de referencia con los estimados estas señales pasan por los controles PI determinando así los voltajes de referencia en ejes  $dq$ , los cuales son convertidos al sistema  $abc$  para ser posteriormente entregados como una entrada al SVM junto con la medición del voltaje del link-DC.

### 3.1.6. Casos de estudio

Para realizar la comparación de los métodos de control se propone realizar dos casos de estudio, los cuales buscan replicar las experiencias de laboratorio mencionadas en la sección 2.5.1. Estas experiencias serán realizadas con el sistema conectado y desconectado de la red, a modo de observar el rendimiento de los controladores en ambos modos de operación. En la Figura 3.11 se muestra el modelo del sistema en el cual se realizarán los casos.

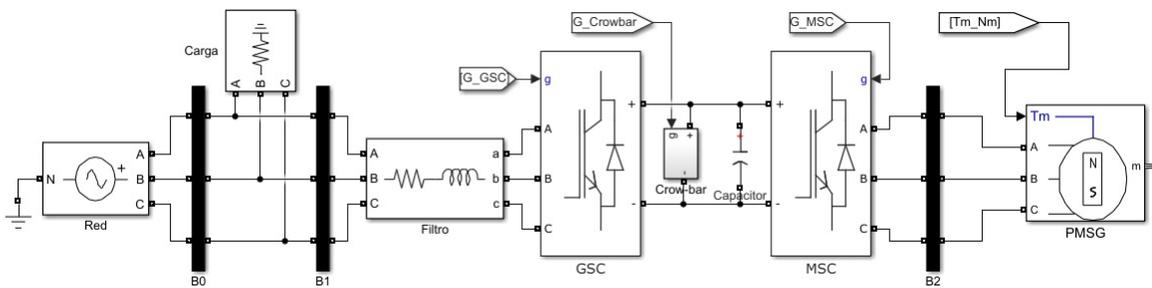


Figura 3.11: Esquema sistema.

Para estos casos de estudio se determinó que los indicadores más relevantes son la potencia entregada a la red por el GSC, el voltaje del bus DC, el torque de referencia del MSC, el torque eléctrico del generador, el torque mecánico de la turbina, el caudal y altura de la alimentación de la turbina y la apertura del inyector.

### **Caso 1**

En el primer caso de estudio se comienza con una carga de 2000 W y luego a los 10, 15, 20 y 25 segundos se conecta una nueva carga de 2000 W, durante la realización de este proceso las consignas de altura y caudal del fluido suministrado a la turbina permanecen constantes.

### **Caso 2**

En el segundo caso mantiene una carga constante de 8000 W y a los 12 y 20 segundos se reduce la altura neta del fluido suministrado a la turbina en un 10 %.

# Capítulo 4

## Resultados y análisis

En esta sección se presentan los resultados de los distintos casos antes mencionados así como también los análisis obtenidos a partir de dichos experimentos.

### 4.1. Caso 1

Tal como se mencionó anteriormente, en este caso se comienza con una carga de 2 kW conectada al sistema y luego a los 10, 15, 20 y 25 segundos se conecta una nueva carga de 2 kW. Durante todo este tiempo se mantiene constante el suministro a la turbina, de altura y caudal nominal.

#### 4.1.1. Caso 1.a aislado de la red

##### MSC con estrategia FOC

De la Figura 4.1 se puede observar que en un comienzo el generador estaría inyectando una mayor cantidad de potencia de la que se está consumiendo, esto hace que el voltaje del bus DC aumente a valores lo suficientemente altos para cambiar el  $T_{e\_ref}$  a la estrategia que realiza este cálculo con la potencia entregada por el GSC, esto hace que sea necesario disminuir el torque mecánico que entrega la turbina para poder igualar la consigna de torque.

Sin embargo cuando se alcanza la igualdad de los torques la máquina está girando a una velocidad superior a la nominal, es por esto que se continúa disminuyendo el torque mecánico, lo que causa que el torque eléctrico sea menor a su referencia, esto produce que se disminuya el voltaje del bus DC y por ende la potencia entregada por el GSC a la carga.

La caída del voltaje DC hace que se cambie la consigna de torque a la estrategia del MPPT, lo cual aumenta significativamente este valor, esto hace que el generador entregue parte de su energía cinética como torque eléctrico para oponerse a la pérdida de carga, esto a su vez hace que el control del inyector permita pasar un mayor caudal para volver a la velocidad nominal entregando la potencia necesaria para poder suplir la carga, tal como se puede ver en la Figura 4.1.

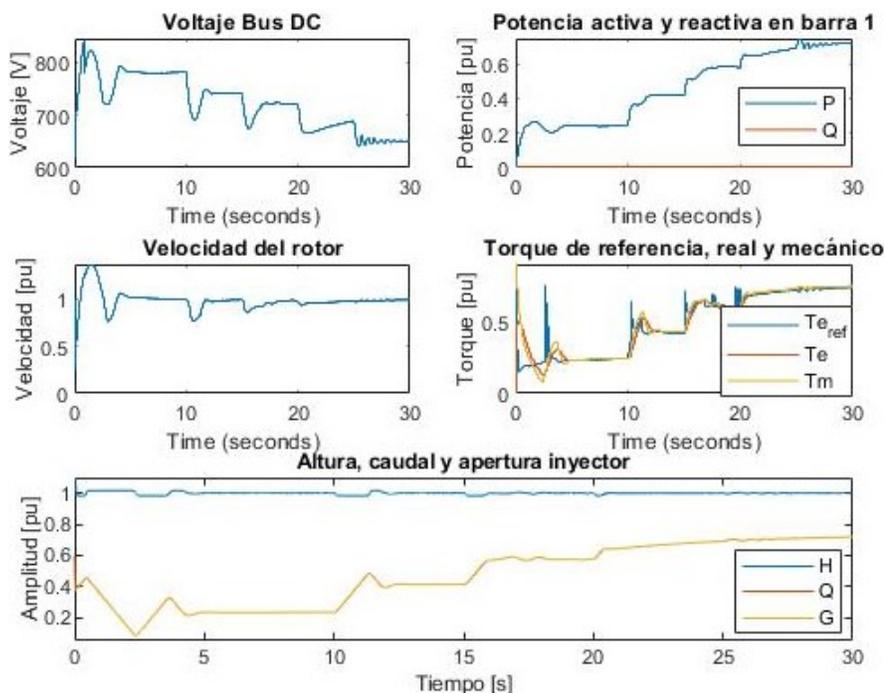


Figura 4.1: Voltaje DC, Potencia en barra de consumo, Velocidad de rotor, Torque de referencia, mecánico y eléctrico y Altura, caudal y apertura inyector para el caso 1 desconectado de la red ocupando la estrategia FOC.

Luego cuando se conectan las cargas a los 10, 15 y 20 segundos sucede algo similar, ya que al conectarse estas cargas el voltaje DC cae, se cambia el método de cálculo de  $Te\_ref$  y el generador entrega parte de su energía cinética para suplir la nueva carga, lo cual hace que la máquina se desacelere necesitando así aumentar el torque mecánico para volver a la velocidad nominal entregando la potencia suficiente para suplir la carga.

Al conectarse la última carga a los 25 segundos sucede algo distinto, ya que luego de conectarse la carga de los 20 segundos se tiene que el voltaje del bus DC es menor a 720 Volts, por lo cual se queda con el método de cálculo de  $Te\_ref$  por el MPPT, entonces al conectar la última carga el voltaje cae por debajo del valor nominal de 650 Volts, lo cual crea una disminución en la corriente de referencia del eje  $q$  en el GSC, lo que a su vez se traduce en una menor potencia entregada por el GSC a las cargas, esto hace que el generador quiera entregar parte de su energía cinética para suplir la carga, pero el MSC no puede entregar más potencia debido a que  $Te\_ref$  está en su máximo valor.

### MSC con estrategia DTC

De la Figura 4.2 se observa un comportamiento similar a los resultados con la estrategia anterior, ya que al momento de conectar una carga el voltaje DC disminuye rápidamente, ya que el GSC intenta suplir la carga con el exceso de potencia almacenada por el bus DC, esto a su vez hace que el cálculo del  $Te\_ref$  cambie a la estrategia del MPPT y el generador entrega parte de su energía cinética para suplir este cambio en la carga, lo que produce un cambio en el torque mecánico mediante el movimiento del inyector, excepto para la última carga donde el MSC no puede entregar más potencia, por lo cual se crea una pequeña oscilación en el

voltaje DC, tal como se explicó en el caso anterior.

Observando los resultados obtenidos se puede ver también que en este caso la respuesta del control es más lenta, debido a esto el voltaje DC alcanza valores más altos a los vistos en los resultados ocupando el FOC, esto se puede ver claramente a los 5 segundos momento en el cual el voltaje aumenta lo suficiente para tener que activar la protección (*crowbar*) para controlar la excursión del voltaje.

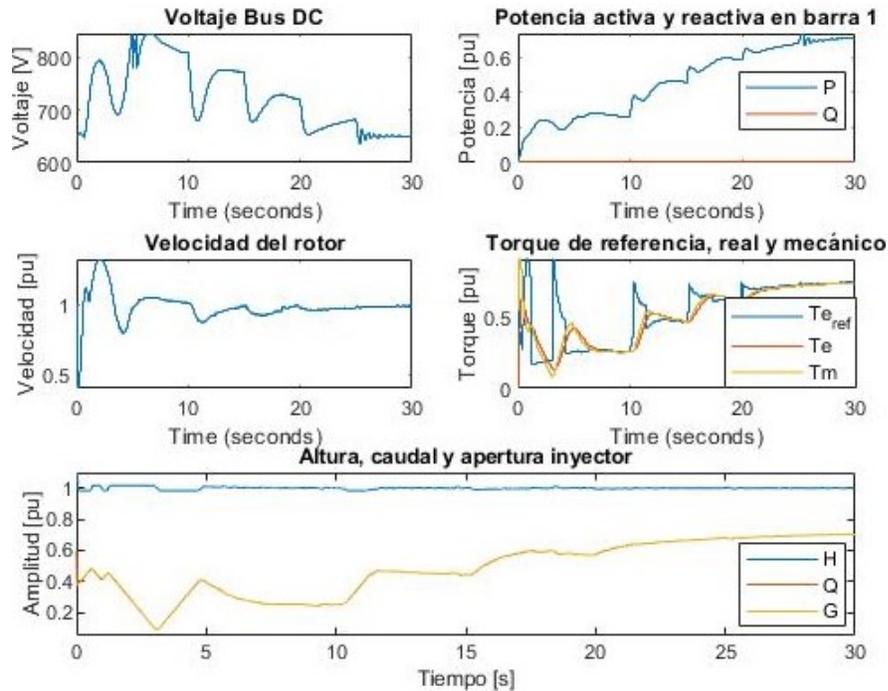


Figura 4.2: Voltaje DC, Potencia en barra de consumo, Velocidad de rotor, Torque de referencia, mecánico y eléctrico y Altura, caudal y apertura inyector para el caso 1 desconectado de la red ocupando la estrategia DTC.

#### 4.1.2. Caso 1.b conectado a la red

##### MSC con estrategia FOC

En este caso la red se encarga de suplir las cargas, por lo cual el control del GSC se encarga de entregar la mayor cantidad de potencia tal de mantener la tensión del bus DC cercana a la nominal, al no haber cambios ni en el voltaje DC ni en la alimentación de la turbina el rotor de la máquina gira a velocidad nominal y por ende el torque de referencia del FOC no cambia, manteniéndose en la estrategia de cálculo por MPPT, por consiguiente  $I_{q\_ref}$  se mantiene constante. De igual manera, al no haber cambios en la velocidad de rotación, la apertura del inyector permanece constante como se ve en la Figura 4.3.

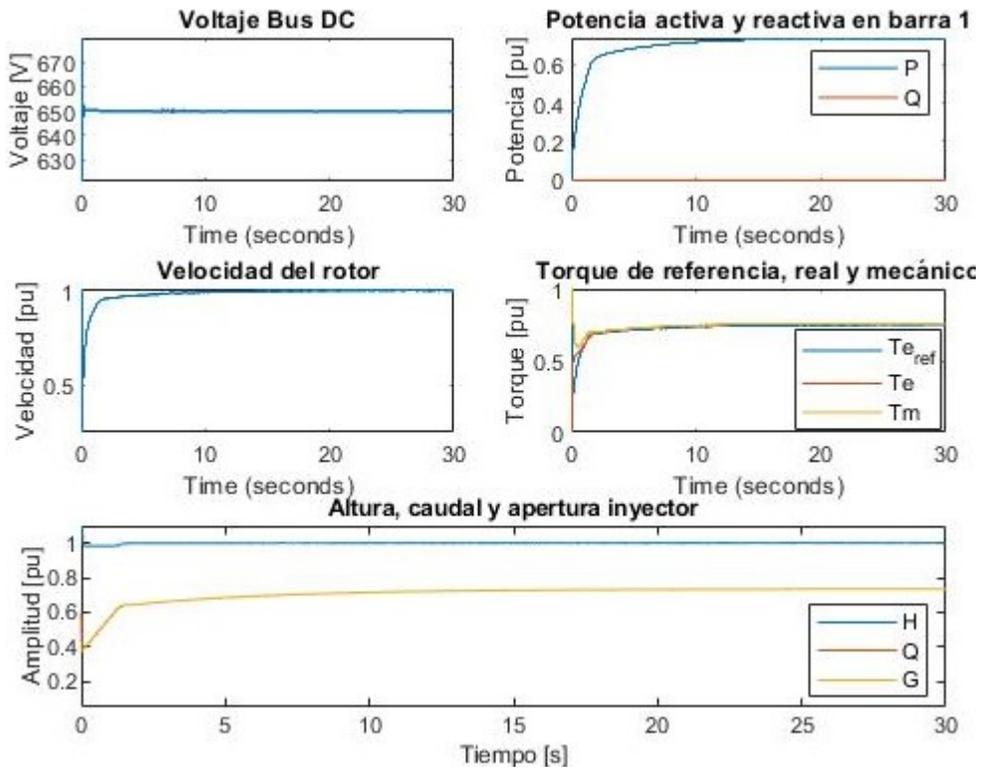


Figura 4.3: Voltaje DC, Potencia en barra de consumo, Velocidad de rotor, Torque de referencia, mecánico y eléctrico y Altura, caudal y apertura inyector para el caso 1 conectado de la red ocupando la estrategia FOC.

## MSC con estrategia DTC

De la Figura 4.4 se observa que debido a que la red está sufriendo la carga, el GSC intenta inyectar la mayor cantidad de energía posible a la red respetando que el voltaje DC no se aleje de su valor nominal, mientras que el MSC busca inyectar la mayor cantidad de energía al bus DC. Debido a que en un comienzo la máquina se acelera es necesario cerrar un poco la válvula del inyector a modo de volver a la velocidad nominal, luego de esto se aumenta la potencia hasta llegar al valor máximo que puede transmitir el MSC.

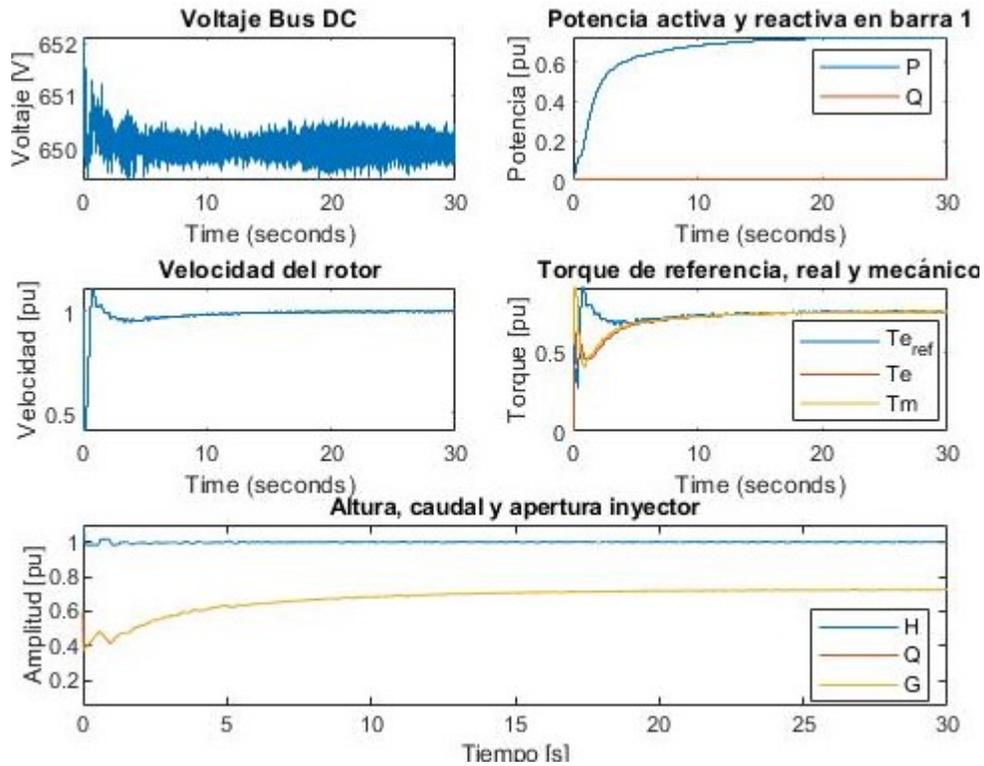


Figura 4.4: Voltaje DC, Potencia en barra de consumo, Velocidad de rotor, Torque de referencia, mecánico y eléctrico y Altura, caudal y apertura inyector para el caso 1 conectado de la red ocupando la estrategia DTC.

## 4.2. Caso 2

Tal como se fue mencionado en la sección anterior, en este caso mantiene una carga de 8 kW constante y se comienza con un suministro a la turbina de altura y caudal constante y a los 12 y 20 segundos se reduce la altura en un 10 %.

### 4.2.1. Caso 2.a aislado de la red

#### MSC con estrategia FOC

Tal como se vio en 4.1.1, cuando se tiene una carga de 8 kW, el control del GSC no es capaz de entregar la energía suficiente para suplir la carga en su totalidad, sino que ésta queda limitada por la energía que el generador es capaz de inyectar a través del MSC, la cual queda limitada por la consigna del  $T_{e\_ref}$ , en este caso como se observa en la Figura 4.5, el voltaje del bus DC no supera los 720 Volts, por lo cual el cálculo del torque de referencia viene dado por la estrategia del MPPT, el cual tiene un valor de 0.7513 p.u. a velocidad nominal.

Al momento de reducir la altura neta de la alimentación de la turbina en 0.1 p.u. cae inmediatamente el torque mecánico, lo que produce una caída en la velocidad de rotación de la máquina, es debido a lo anterior que se envía una señal de apertura al inyector a modo de volver a la velocidad nominal.

La caída en la velocidad también produce que caiga el torque de referencia, por lo cual el MSC inyecta menos energía al bus DC, lo que produce una caída en el voltaje DC y por ende una disminución en la potencia que puede entregar el GSC debido a que el valor de  $I_{q\_ref}$  es menor, sin embargo, al momento de abrir el inyector y volver a la velocidad nominal el  $T_{e\_ref}$ , el voltaje DC y la potencia entregada por el GSC a la carga aumentan nuevamente.

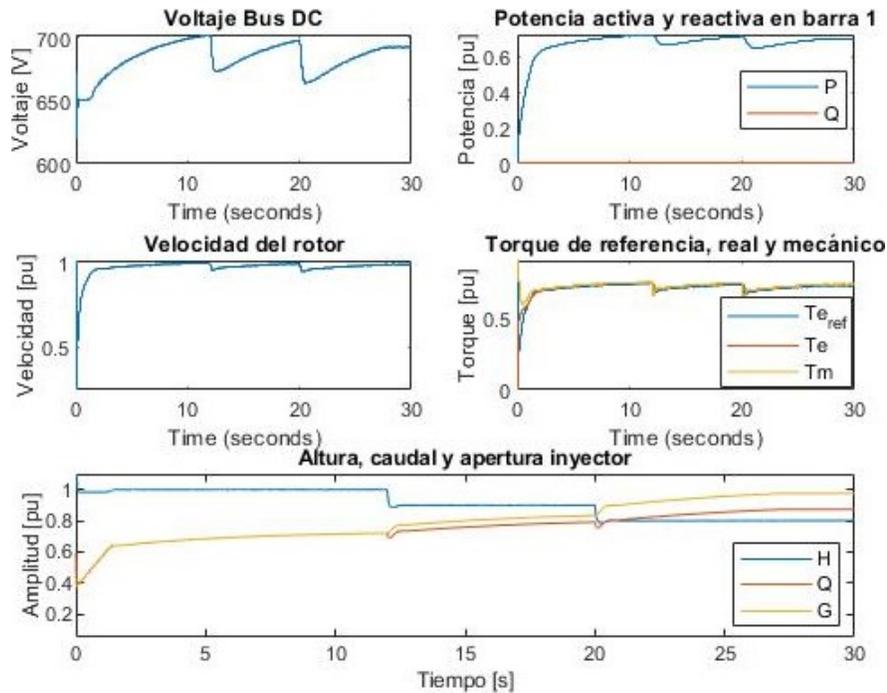


Figura 4.5: Voltaje DC, Potencia en barra de consumo, Velocidad de rotor, Torque de referencia, mecánico y eléctrico y Altura, caudal y apertura inyector para el caso 2 desconectado de la red ocupando la estrategia FOC.

### MSC con estrategia DTC

Como ya se mencionó anteriormente, en este caso el GSC no es capaz de suplir completamente la carga, sino que está limitado a entregar como máximo la energía que puede entregar el MSC al bus DC, la cual está limitada por el valor del torque de referencia, el cual para este caso también será calculado por el método del MPPT, ya que el voltaje DC no supera en ningún punto los 720 Volts.

Al momento de disminuir la altura neta de la alimentación de la turbina cae inmediatamente la velocidad del rotor debido a que el torque mecánico disminuye, debido a esto el control del inyector envía una señal de apertura, logrando así volver a la velocidad nominal.

La disminución de la velocidad de giro del rotor produce también una disminución en el torque de referencia y por ende del voltaje del bus DC y de la potencia entregada por el GSC a la carga, no obstante, al momento de volver a la velocidad nominal el MSC vuelve a entregar más potencia y por ende el voltaje DC y la potencia entregada a las cargas aumentan nuevamente a los valores anteriores al cambio en altura, tal como se observa en la Figura 4.6.

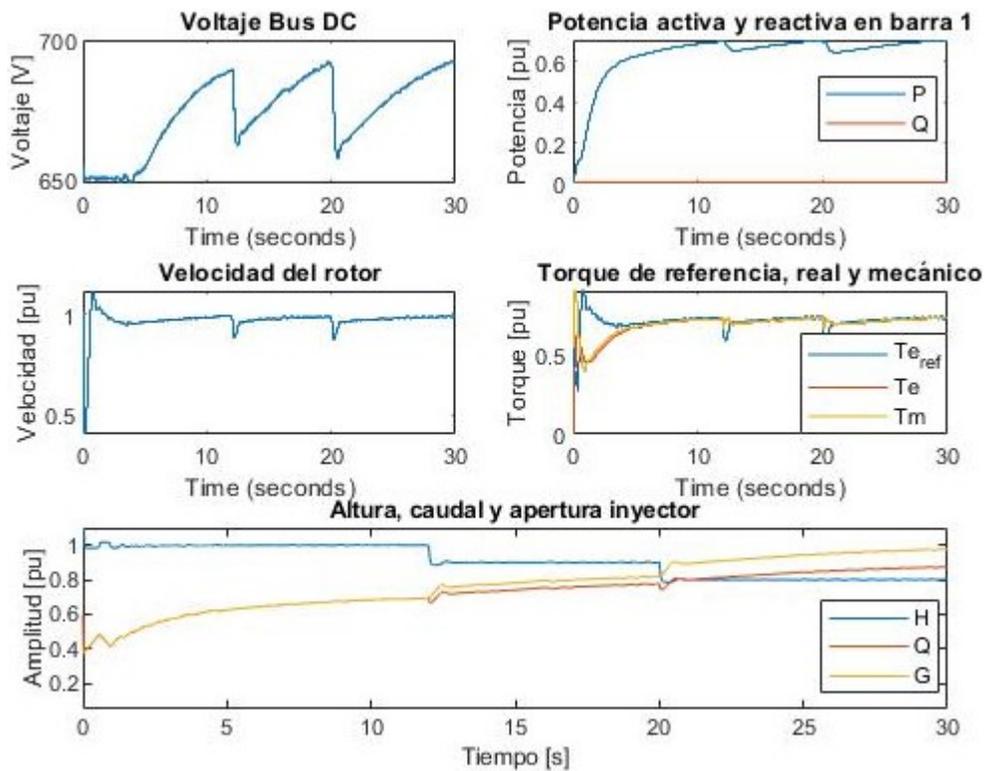


Figura 4.6: Voltaje DC, Potencia en barra de consumo, Velocidad de rotor, Torque de referencia, mecánico y eléctrico y Altura, caudal y apertura inyector para el caso 2 desconectado de la red ocupando la estrategia DTC.

#### 4.2.2. Caso 2.b conectado a la red

##### MSC con estrategia FOC

En este caso la red se encarga de suplir la carga, por ende el GSC busca entregar la mayor cantidad de energía posible hacia la red resguardando el voltaje del link-DC.

Cuando la altura se reduce en 0.1 p.u., al igual que en el caso desconectado de la red, cae instantáneamente el torque mecánico y por ende la velocidad, lo cual activa el control del inyector el que permite que el caudal aumente para volver a la velocidad nominal.

De igual manera cae el torque eléctrico de referencia, por lo cual el MSC transmite menos energía, lo cual hace que la potencia transmitida por el GSC hacia la red también sea menor, siempre resguardando que el voltaje del link-DC no se aleje de su valor nominal, sin embargo al momento de restablecer la velocidad del rotor el torque de referencia aumenta y por ende el GSC puede volver a transmitir más potencia hacia la carga, tal como se observa en la Figura 4.7.

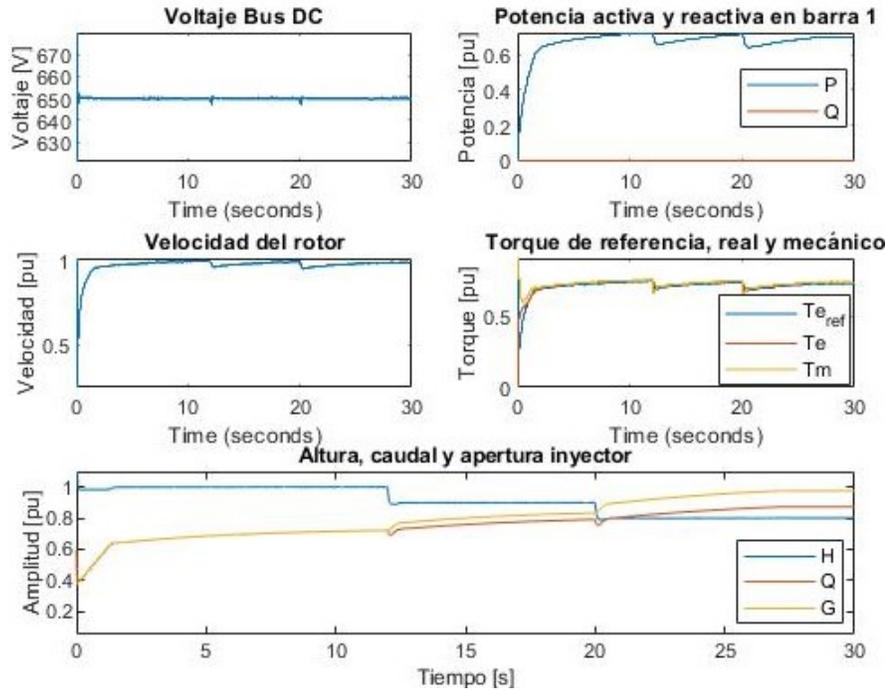


Figura 4.7: Voltaje DC, Potencia en barra de consumo, Velocidad de rotor, Torque de referencia, mecánico y eléctrico y Altura, caudal y apertura inyector para el caso 2 conectado a la red ocupando la estrategia FOC.

## MSC con estrategia DTC

Al igual que en cuando se ocupa la estrategia FOC en el MSC, en este caso la red se encarga de suplir la carga, mientras que el GSC inyecta la mayor cantidad de potencia posible, siempre y cuando esto no implique caídas en el voltaje DC.

Al momento de reducir en 0.1 p.u. la altura de la alimentación de la turbina, el torque mecánico cae instantáneamente lo cual produce una caída en la velocidad de la máquina, esto a su vez produce que el control del inyector de la turbina envíe una señal de apertura para aumentar así el torque mecánico y poder restablecer la velocidad nominal.

Esta caída en la velocidad produce una disminución del torque de referencia, lo que a su vez produce una disminución en la potencia entregada por el MSC, esto hace que el GSC deba transmitir menos potencia a modo de proteger el voltaje del bus DC, sin embargo luego de restablecer la velocidad nominal, tanto el MSC como el GSC vuelven a transmitir la potencia pre-contingencia, tal como se puede ver en la Figura 4.8.

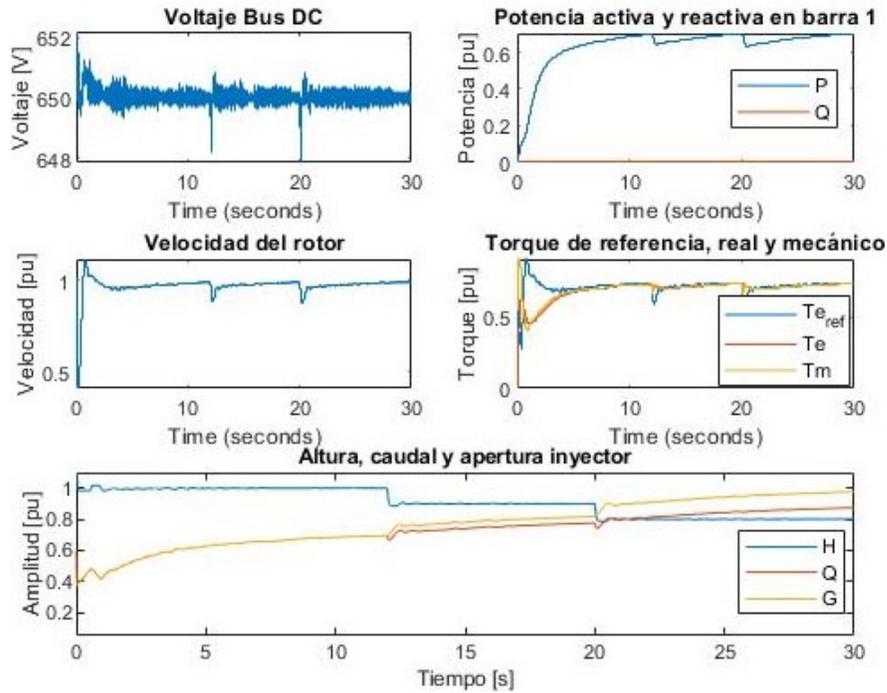


Figura 4.8: Voltaje DC, Potencia en barra de consumo, Velocidad de rotor, Torque de referencia, mecánico y eléctrico y Altura, caudal y apertura inyector para el caso 2 conectado a la red ocupando la estrategia DTC.

Comparando los resultados obtenidos ocupando las distintas estrategias de control para los distintos casos, se puede observar que los resultados son muy similares entre los controladores para todos los casos, sin embargo en todos los casos la estrategia FOC resultó ser más rápida que la estrategia DTC-SVM. Esto implica que en el caso de la estrategia DTC-SVM se tiene un mayor tiempo de convergencia y mayores excursiones de la velocidad de la máquina y voltaje del bus DC frente a las perturbaciones, pero a pesar de esto estas excursiones no resultan críticas para la estabilidad del sistema, por lo cual no representan un riesgo en ninguno de los casos de estudio.

Lo anterior resulta extraño, ya que al revisar la bibliografía se observa que la estrategia DTC-SVM presenta un mejor comportamiento frente a contingencias que la estrategia FOC, mientras que en el régimen permanente los comportamientos entre ambos esquemas son muy similares [15] [10]. Sin embargo, este comportamiento puede ser debido a una sintonización no lo suficientemente fina de los controles PI dentro de los lazos de control del esquema DTC-SVM.

Tomando todo lo anterior en consideración es que se selecciona como mejor algoritmo a la estrategia FOC para el control del MSC.

# Capítulo 5

## Conclusiones

En primer lugar, se comprueba el cumplimiento de los objetivos y alcances propuestos en el capítulo de Introducción, ya que se diseña un sistema de control para el micro-generador hidráulico, se seleccionan los esquemas de control mejor orientados para este tipo de máquinas, se crea una plataforma de simulación para probar los algoritmos y se selecciona el esquema FOC como el mejor algoritmo según los indicadores obtenidos de los resultados de los distintos casos planteados.

Para lograr lo anterior se comienza señalando las características de los componentes de la micro-central y las pruebas que se realizan actualmente con el equipo, luego se muestran los tipos de control asociados a este tipo de máquina y se escogen los esquemas a comparar. Para la modelación se comienza desde las bases matemáticas de cada componente para ser luego representadas en Simulink, al mismo tiempo se construyen casos de estudio relacionados a las pruebas realizadas actualmente con el equipo. A modo de término, se obtienen los resultados de los casos de estudio y se comparan en base a indicadores escogidos con anterioridad, para así elegir el mejor esquema de control.

A partir de los resultados obtenidos para los distintos casos de estudio, se observó que tanto la estrategia FOC como la estrategia DTC-SVM son capaces de controlar la máquina, sin embargo debido a que el esquema FOC presenta menores tiempos de convergencia y menores excursiones de voltaje DC y de velocidad del rotor es que este se elige como el mejor de ambos esquemas.

Cabe destacar también que durante la elaboración de este trabajo se realizó una mejora al modelamiento actual que se tiene del control de la turbina, en específico mediante la integración de las ecuaciones asociadas al servomotor que mueve la aguja del inyector y las limitaciones que este tiene tanto en velocidad de giro como en posición, lo cual trae consigo un cambio en las constantes del control calculadas en [3] a las mostradas en la tabla 6.2 del Anexo.

Por último, se tiene que este trabajo presenta no solo una metodología, sino que también los datos necesarios para la creación de una plataforma de simulación de la micro-central hidráulica, la cual sirve para realizar simulaciones adicionales en caso que se necesiten realizar

cambios a los equipos actualmente usados, pero también sirve como punto de partida para trabajos similares al presentado o aquellos que busquen profundizar sobre los desafíos que presenta el uso de esta tecnología, ya sea por si sola o en conjunto con otras tecnologías de generación.

## 5.1. Trabajo futuro

Durante el desarrollo de este trabajo, se han identificado distintas oportunidades para una mayor investigación que si bien se encuentran fuera del alcance del estudio requieren marcos de tiempo más extensos o un trabajo más experimental.

- Realizar mediciones al generador del laboratorio para obtener los valores reales de la resistencia de armadura y de la inductancia de la maquina al igual que los datos del servomotor (velocidad máxima, ganancia y constante de tiempo), de este modo reemplazar los datos ocupados y así tener un modelo que simule los valores esperados al usar la instrumentaria del laboratorio.
- Actualizar el programa del laboratorio ocupado actualmente [3] con los cambios realizados al controlador del inyector de la turbina, considerando no solo los cambios en las ganancias del controlador sino que también integrando la modelación del servomotor la cual fue obviada anteriormente.
- Para los alcances de este trabajo se realizaron los estudios en un sistema ideal, por lo cual en caso de realizar una implementación de este trabajo en el laboratorio antes se debería realizar un estudio del comportamiento de los esquemas cuando se tienen perdidas en los equipos e integrando retrasos en las mediciones de las distintas señales.
- Otra arista no investigada en este trabajo fue el impacto que distintos esquemas de control del GSC puedan tener sobre el desempeño de los esquemas propuestos y de la máquina en general.
- Por último, este trabajo se centró en el trabajo que actualmente se realiza en el laboratorio con esta máquina, por lo cual tampoco se estudió la interacción que esta máquina pudiese tener con otras tecnologías de generación de energía eléctrica, lo cual podría ser de particular interés en caso de que esta tecnología se inserte dentro de una micro-red con diversas unidades generadoras.

Por último, cabe destacar que el alcance de esta memoria es que pueda ser implementada en el laboratorio, así poder crear nuevas experiencias de laboratorio e investigaciones a modo de poder expandir los horizontes de docencia e investigación sobre este tipo de tecnología en la facultad, junto con los desafíos y oportunidades que se podrían presentar.

# Bibliografía

- [1] E. Abierta, “Pequeños medios de generación en Chile.” <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/pequenos-medios-de-generacion-en-chile/>, 2020.
- [2] M. de Energía, “Mapa de vulnerabilidad energética,” 2019.
- [3] C. Zamora, *Desarrollo y pruebas de un controlador electrónico para una microturbina hidráulica de uso académico*. 2019.
- [4] Ítalo Campodónico, *Montaje y caracterización de una instalación de generación de potencia de uso docente mediante una micro-turbina hidráulica*. 2019.
- [5] K. Hauser, *Caracterización de turbina hidráulica tipo turgo para microgeneración*. 2011.
- [6] L. Vargas, J. Haas, F. Barría, and L. Reyes, *Apunte generación de energía eléctrica con fuentes renovables EL6000*. 2010.
- [7] J. C. Arís, *Diseño, construcción y pruebas de turbina Pelton para microgeneración hidráulica*. 2014.
- [8] W. Brokering and R. Palma, *Atrapando el sol en los sistemas eléctricos de potencia*. 2018.
- [9] R. Ben Ali, H. Schulte, and A. Mami, “Modeling and simulation of a small wind turbine system based on pmsg generator,” in *2017 Evolving and Adaptive Intelligent Systems (EAIS)*, pp. 1–6, 2017.
- [10] C. Busca, A. Stan, T. Stanciu, and D. I. Stroe, “Control of permanent magnet synchronous generator for large wind turbines,” in *2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 3871–3876, 2010.
- [11] J. Moreira, *Evaluación hidráulica de nuevo diseño de housing para prototipo de laboratorio de turbina pelton de microgeneración*. 2017.
- [12] Q. Loic and H. Ohsaki, “Back-to-back converter design and control for synchronous generator-based wind turbines,” pp. 1–6, 11 2012.
- [13] W. D. Cuji and D. Arcos Avilés, “Control directo al par y control de campo orientado para un motor síncrono de imanes permanentes,” *Ingeniería*, pp. 143–158, may 2019.

- [14] M. O. Mora, *Sensorless vector control of PMSG for wind turbine applications*. 2009.
- [15] D. Świerczyński, *Direct Torque Control with Space Vector Modulation (DTC-SVM) of Inverter-Fed Permanent Magnet Synchronous Motor Drive*. 2005.
- [16] R. Abdulkadir and A. Usman, “Modelling and simulation of micro hydro power plant using matlab simulink,” in *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science (IJATES)*, vol. 3, 2015.
- [17] W. G. P. Mover and E. Supply, “Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies,” in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, pp. 167–179, 1992.

# Capítulo 6

## Anexos

### 6.1. Parámetros PMSG

Parámetro	Valor
Frecuencia [Hz]	50
Voltaje nominal [V]	380
Potencia nominal [kW]	11
Resistencia armadura ( $R_s$ ) [ $\Omega$ ]	0.326
Inductancia armadura ( $L$ ) [mH]	6.88
Flujo imán permanente ( $\Psi_s$ ) [Wb]	0.858
Numero de pares de polos	4
Momento de inercia ( $J$ ) [ $Kgm^2$ ]	0.106

Tabla 6.1: Parámetros PMSG.

### 6.2. Parámetros Governor

Parámetro	Valor
Ganancia proporcional	1.3
Ganancia integral	0.6
Ganancia derivativa	0.2
Ganancia servomotor	3.333
Cte de tiempo servomotor (s)	0.07
Velocidad máxima servomotor (p.u.)	0.1
Apertura mínima inyector (p.u.)	0.01
Apertura máxima inyector (p.u.)	0.97518

Tabla 6.2: Parámetros Governor.

### 6.3. Parámetros control FOC

Parámetro	Valor
Ganancia proporcional eje d	0.1361
Ganancia integral eje d	2.7221
Ganancia proporcional eje q	0.1361
Ganancia integral eje q	2.7221

Tabla 6.3: Parámetros control FOC.

### 6.4. Parámetros control DTC

Parámetro	Valor
Ganancia proporcional flujo	15
Ganancia integral flujo	300
Ganancia proporcional torque	1
Ganancia integral torque	50

Tabla 6.4: Parámetros control DTC.

### 6.5. Parámetros control GSC

Parámetro	Valor
Ganancia proporcional	0.83
Ganancia integral	5

Tabla 6.5: Parámetros control GSC.

### 6.6. Parámetros filtro y condensador bus DC

Parámetro	Valor
Resistencia filtro [p.u.]	0.003
Inductancia filtro [p.u.]	0.3
Voltaje nominal condensador [V]	650
Capacitancia condensador [F]	10000e-6

Tabla 6.6: Parámetros filtro y condensador bus DC.

## 6.7. Parámetros crowbar

Parámetro	Valor
Voltaje de activación [V]	845
Voltaje de desactivación [V]	780
Resistencia [ $\Omega$ ]	1

Tabla 6.7: Parámetros crowbar.