



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

# **Control de un sistema de almacenamiento de energía empleando volantes de inercia en regulación de frecuencia**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA**

**ÁLVARO JAVIER SEISDEDOS CANALES**

**PROFESOR GUÍA:  
LUIS VARGAS DÍAZ**

**PROFESOR CO-GUÍA:  
ALEX ALEGRÍA MEZA**

**MIEMBRO DE LA COMISIÓN:  
ARIEL VALDENEGRO ESPINOZA**

**SANTIAGO DE CHILE  
Septiembre 2012**

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA  
POR: ÁLVARO JAVIER SEISDEDOS CANALES  
PROFESOR GUÍA: SR. LUIS VARGAS DÍAZ  
FECHA: 05/09/2012

“CONTROL DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EMPLEANDO  
VOLANTES DE INERCIA EN REGULACIÓN DE FRECUENCIA”

Los dispositivos de almacenamiento de energía permiten mejorar la calidad y seguridad del suministro eléctrico. En este trabajo se presenta el dispositivo basado en una masa girante, denominada volante de inercia, conectada a una máquina eléctrica con el propósito de transformar la energía eléctrica en cinética rotacional y viceversa, sistema denominado FESS (Flywheel Energy Storage System).

Se presenta como objetivo principal modelar, controlar y simular un FESS aplicado a regulación de frecuencia y como objetivo secundario buscar, desarrollar y evaluar posibles aplicaciones de este dispositivo en los sistemas eléctricos chilenos SIC y SING. Para alcanzar los objetivos el trabajo se divide en dos partes.

En la primera parte se realiza un modelo detallado del FESS, diseñando y ajustando para éste un control de potencia activa mediante el programa Matlab Simulink. Se analiza su comportamiento ante distintas condiciones iniciales y perturbaciones, demostrando que el FESS tiene una respuesta rápida, precisa y robusta.

En la segunda parte se programa un modelo simplificado del FESS junto con su control en Digsilent PowerFactory, se verifica que el comportamiento del FESS modelado es comparable con el anterior y se conecta a los sistemas SIC y SING.

En el SIC se realiza un control de transferencia que demuestra ser eficiente para mantener el criterio N-1 del tramo controlado siendo económicamente un proyecto desfavorable por la alta inversión inicial. Se presenta luego una segunda aplicación que permite evitar el vertimiento de energía eólica, demostrando que el FESS resuelve uno de los impactos negativos a la red por la generación intermitente de fuentes renovables. Su evaluación económica se estima altamente riesgosa debido a que su operación depende que dos sucesos se produzcan simultáneamente.

El modelo aplicado en el SING ayuda a mejorar la velocidad de respuesta de la reserva en giro asociada al generador frente a perturbaciones de la red, ayudando también a obtener una mejor respuesta en el sistema. Su evaluación económica es favorable dado que el generador con costos variables bajos presenta una mayor venta de energía dado el aumento de potencia por la instalación del FESS.

Los objetivos fueron alcanzados satisfactoriamente. Se propone como trabajo futuro estudiar la parte mecánica del dispositivo como también realizar estudios relativos a la optimización del FESS, tanto en su control como en su conexión a la red.

Dedicado a mi familia

# Agradecimientos

Debo agradecer a:

- Al ingeniero Alex Alegría que indudablemente fue el que más me ayudó y guió en todo el proceso de esta memoria, aconsejando, respondiendo mis dudas y corrigiendo los errores, a pesar de estar trabajando en jornada de tiempo completo.
- Al profesor Luis Vargas que, gracias a su paciencia y comprensión, accedió en numerosas ocasiones a aplazar el tiempo para terminar este trabajo. Su opinión fue fundamental con respecto a lo realizado dado que llevó a este trabajo a ser considerablemente más completo de lo que inicialmente se había considerado.
- Al profesor Ariel Valdenegro por su completa revisión de esta memoria.
- Al ingeniero Juan Pablo Rojas que en numerosas ocasiones me dio tiempo en mi trabajo de tiempo completo para realizar los trámites de término de esta memoria.
- A mis amigos que me brindaron apoyo, en especial a Eduardo Zamora y a Felipe Larraín, que respondieron incontables dudas que surgieron en el proceso de elaboración de este trabajo.

Finalmente con mucho cariño agradezco a mis padres, a mi hermano, al resto de mi familia y a mi mascota, por su apoyo en todo aspecto mi vida.

# Índice de Contenidos

Capítulo 1	Introducción.....	1
1.1	Motivación .....	1
1.2	Objetivos .....	1
1.2.1	General .....	1
1.2.2	Específicos .....	1
1.3	Alcances.....	2
1.4	Estructura del Trabajo .....	2
Capítulo 2	Sistemas de almacenamiento de energía .....	3
2.1	Almacenamiento de energía magnética mediante superconductores (SMES).....	3
2.2	Almacenamiento de energía mediante baterías (BESS) .....	5
2.3	Almacenamiento mediante Condensador Avanzados (SCES).....	7
2.4	Almacenamiento mediante volantes de inercia (FESS).....	8
2.4.1	Volante de inercia.....	10
2.4.2	Rodamientos.....	12
2.4.3	Máquina eléctrica.....	13
2.4.4	Elementos Adicionales.....	15
2.4.5	Comparación con otros sistemas de almacenamiento .....	15
2.4.6	Conexión a la red.....	16
2.4.7	Control.....	21
Capítulo 3	Diseño, Modelación y Control .....	25
3.1	FESS.....	25
3.2	Circuito de Conexión a la Red.....	26
3.2.1	Red infinita programable.....	27
3.2.2	Transformador de Conexión.....	27
3.2.3	Filtro.....	27
3.2.4	Convertidor de potencia Red.....	27
3.2.5	Condensador .....	29
3.2.6	Fuente de Corriente .....	30
3.2.7	Control.....	30
3.2.8	Ajuste de controladores .....	33

3.3	Circuito de la Máquina Síncrona .....	34
3.3.1	Fuente de Voltaje DC.....	35
3.3.2	Inversor Máquina .....	35
3.3.3	Máquina eléctrica.....	36
3.3.4	Pérdidas y Efecto del coeficiente de Fricción .....	38
3.3.5	Control de la Máquina.....	40
3.3.6	Ajuste de controladores .....	50
3.4	FESS .....	50
Capítulo 4	Resultados Matlab.....	52
4.1	Simulaciones dinámicas en Operación Normal .....	52
4.1.1	Potencia PMSM .....	53
4.1.2	Factor de Potencia PMSM .....	54
4.1.3	Voltaje PMSM.....	55
4.1.4	Corriente PMSM .....	56
4.1.5	Velocidad de la máquina .....	57
4.1.6	Voltaje DC.....	58
4.1.7	Potencia Activa en el lado de la Red.....	59
4.1.8	Factor de potencia red .....	60
4.1.9	Voltaje y corriente red.....	60
4.2	Simulaciones dinámicas Carga-Descarga.....	61
4.2.1	Potencia y Factor de Potencia .....	62
4.2.2	Voltaje DC.....	62
4.2.3	Potencia y Factor de potencia Red.....	63
4.3	Simulaciones dinámicas Perturbación de Voltaje.....	63
4.3.1	Potencia máquina.....	64
4.3.2	Voltaje DC.....	65
4.3.3	Potencia y Factor de potencia Red.....	65
4.4	Simulaciones dinámicas Perturbación de Frecuencia y Fase .....	66
4.4.1	Potencia Máquina.....	67
4.4.2	Voltaje DC.....	67
4.4.3	Potencia Red y Factor de Potencia Red.....	68
Capítulo 5	Regulación de Frecuencia.....	69

5.1	Regulación de Frecuencia en Chile.....	71
5.2	CPF en Sistemas SIC y SING .....	73
Capítulo 6	Modelo RMS .....	74
6.1	Programación modelo RMS .....	74
6.2	Control Modelo RMS .....	76
6.2.1	Control del voltaje DC.....	76
6.3	Ajuste de controladores.....	79
6.4	Comparación de ambos modelos.....	80
6.5	Control y Respuesta Parque FESS .....	82
6.6	FESS de mayor potencia.....	83
Capítulo 7	Conexión al SIC .....	85
7.1	Antecedentes SIC.....	85
7.2	Modelación SIC .....	86
7.3	Control de transferencia Nogales-Pan de Azúcar .....	87
7.3.1	Resultado y análisis .....	89
7.4	Control de Vertimiento Eólico .....	94
7.4.1	Resultado de control de vertimiento .....	96
7.4.2	Análisis económico.....	96
Capítulo 8	Conexión al Sistema SING.....	98
8.1	Modelación SING .....	98
8.2	Control de frecuencia .....	99
8.3	Simulaciones dinámicas .....	100
8.3.1	Desconexión de 72 MW generados.....	101
8.3.2	Desconexión de 152MW de generación.....	102
8.3.3	Desconexión de Carga .....	103
8.3.4	Evaluación Económica .....	104
Capítulo 9	Conclusiones.....	106
Capítulo 10	Referencias .....	112
Capítulo 11	Anexo 1: Diseño Filtro .....	116
Capítulo 12	Anexo 2: Sobre Respuestas en Matlab .....	121
Capítulo 13	Anexo 3: Evaluaciones económicas.....	123
13.1	Estimación Económica en el SIC TIR 2,88%.....	123
13.2	Análisis de operación SIC Día v/s TIR.....	125
13.3	Estimación económica en el SING .....	126

## Índice de Tablas

Tabla 2.1 Comparación de Tecnologías [6].....	16
Tabla 2.2 Comparación FESS vs NaS [4] .....	16
Tabla 2.3 Comparación convertidores AC/AC [17].....	18
Tabla 2.4 Comparación dispositivos interruptores.....	20
Tabla 2.5 Estados posibles VSI [17].....	20
Tabla 6.1 Parámetros de las curvas .....	81
Tabla 7.1 Evaluación a 40 años, 1 ciclo de operación diario.....	93
Tabla 7.2 Datos Básicos de Tabla 7.3.....	94
Tabla 7.3 N° de ciclos V/S TIR.....	94
Tabla 7.4 Datos de la evaluación .....	96
Tabla 7.5 Evaluación económica según N° de operaciones .....	97
Tabla 8.1 Operación de la Central Hornitos con FESS y sin FESS.....	100
Tabla 8.2 Evaluación Operación en el SING.....	105
Tabla 11.1 Niveles Máximos de armónicos de corriente [19].....	116

## Índice de Figuras

Figura 2.1 Bobina Superconductora.....	4
Figura 2.2 Conexión SMES a la red .....	4
Figura 2.3 Celda Batería .....	5
Figura 2.4 Condensador [12].....	7
Figura 2.5 Diagrama súper condensador [12] .....	8
Figura 2.6 Diagrama FESS .....	9
Figura 2.7 Tipos de rotores de alta velocidad [1].....	11
Figura 2.8 Rodamiento Magnético y principio de funcionamiento .....	12
Figura 2.9 Máquina flujo axial y radial [6] .....	13
Figura 2.10 Rotor Halbach de 2 polos y líneas de campo [43].....	14
Figura 2.11 Esquema unilíneal de convertidores AC/AC [17].....	18
Figura 2.12 Conversor AC/AC mediante VSIs Bidireccional [17] .....	19
Figura 2.13 Conexión FESS a la red.....	19
Figura 2.14 Esquema VSI [17] .....	19
Figura 2.15 Lazo de control por orientación de flujo en forma general.....	22
Figura 2.16 Diagrama de control de velocidad .....	23
Figura 2.17 Esquema básico de control directo de torque .....	24
Figura 3.1 Circuito FESS.....	25
Figura 3.2 Circuito FESS reducido Conexión Red .....	26
Figura 3.3 Puente Universal .....	27
Figura 3.4 lazo de control conexión red [25].....	31
Figura 3.5 circuito simplificado conexión red.....	31
Figura 3.6 Lazo control voltaje DC .....	32
Figura 3.7 Respuesta de $I_d$ e $I_q$ frente a escalón $I_d$ .....	33

Figura 3.8 Respuesta Voltaje DC frente al escalón $I_d$ .....	34
Figura 3.9 Circuito FESS reducido Máquina Síncrona .....	34
Figura 3.10 Diagrama de Espacio Vectorial [17] .....	35
Figura 3.11 Generador Síncrono de imanes permanentes .....	37
Figura 3.12 Variación de la Velocidad con Fricción.....	39
Figura 3.13 Características de Torque, Potencia y Voltaje vs Velocidad .....	42
Figura 3.14 Límite de corriente [39].....	43
Figura 3.15 Límite de corriente por voltaje y su variación con respecto a $W_e$ [39]....	43
Figura 3.16 Región de operación [39] .....	44
Figura 3.17 Región de operación con Torque Constante [39] .....	44
Figura 3.18 Operación bajo Corriente Nominal [39] .....	45
Figura 3.19 Referencia $I_d$ .....	48
Figura 3.20 Lazo Maestro de control.....	49
Figura 3.21 Referencia de corriente $I_d$ .....	49
Figura 3.22 Controladores Esclavos y Cálculo de Voltaje del Convertidor.....	49
Figura 3.23 FESS en Matlab Simulink + Control .....	50
Figura 4.1 Resultados Potencia Para Distintas velocidades de Partida .....	53
Figura 4.2 Factor de Potencia PMSM .....	54
Figura 4.3 Voltaje PMSM .....	55
Figura 4.4 Corriente PMSM.....	56
Figura 4.5 Variación de velocidad PMSM .....	57
Figura 4.6 Voltaje DC Puente.....	58
Figura 4.7 Potencia Activa Red.....	59
Figura 4.8 Factor de Potencia RED.....	60
Figura 4.9 Voltaje red .....	60
Figura 4.10 Corriente Red.....	61
Figura 4.11 P y FP en Carga-Descarga .....	62
Figura 4.12 Voltaje DC en Carga-Descarga.....	62
Figura 4.13 P y FP red en Carga y Descarga.....	63
Figura 4.14 Perturbación de voltaje.....	64
Figura 4.15 P máquina 1.1V.....	64
Figura 4.16 Voltaje DC 1.1V.....	65
Figura 4.17 P y FP red 1.1V .....	65
Figura 4.18 Frecuencia Medida por PLL .....	66
Figura 4.19 P Máquina (F-0.5) .....	67
Figura 4.20 V dc (F-0.5) .....	67
Figura 4.21 P y FP red (F-0,5).....	68
Figura 5.1 Diagrama de regulación de velocidad de un generador [11] .....	69
Figura 6.1 Static Generator en DigSilent.....	74
Figura 6.2 FESS en Digsilent .....	75
Figura 6.3 Lazo de Control de Voltaje DC.....	77
Figura 6.4 Control Tipo PI .....	77
Figura 6.5 Control de Corriente y Cálculo de voltaje de referencia .....	78
Figura 6.6 Referencia de potencia .....	78
Figura 6.7 Potencia de Salida y Energía del FESS .....	79
Figura 6.8 Especificaciones en el dominio del Tiempo [42].....	81
Figura 6.9 Matlab y Digsilent, Respuestas .....	81

Figura 6.10 Parque FESS [38] .....	82
Figura 6.11 Respuesta FESS 20MW .....	84
Figura 7.1 Proyección de Carga en línea Pan de Azúcar-Las Palmas 220 [39] .....	85
Figura 7.2 Diagrama unilineal modelación SIC .....	86
Figura 7.3 Esquema de funcionamiento control de Transferencias.....	87
Figura 7.4 Control de Transferencias .....	88
Figura 7.5 Variación de la Carga de la Línea en los Escenarios .....	89
Figura 7.6 Aporte FESS control de transferencias .....	91
Figura 7.7 Aporte de la Generación del Sur .....	91
Figura 7.8 Potencia por la línea debido a Generación Eólica.....	94
Figura 7.9 Esquema de funcionamiento de control de vertimiento.....	95
Figura 7.10 Carga de Línea con control de vertimiento y Potencia FESS.....	96
Figura 8.1 Control de Frecuencia Digsilent .....	99
Figura 8.2 Conexión FESS al SING .....	100
Figura 8.3 Resultados de la Desconexión de 72MW generados.....	101
Figura 8.4 Aporte de potencia Activa FESS .....	102
Figura 8.5 Desconexión Generador Grande .....	102
Figura 8.6 Potencia FESS.....	103
Figura 8.7 Desconexión de Carga.....	103
Figura 8.8 Operación FESS .....	104
Figura 11.1 Niveles THD con Filtro Tipo L .....	117
Figura 11.2 Filtro LCL.....	117
Figura 11.3 Circuito de atenuación de Frecuencia de Resonancia .....	119
Figura 11.4 Niveles THD con Filtro Tipo LCL.....	120
Figura 12.1 Potencia Instantánea Real .....	121
Figura 12.2 a) Potencia Banda Fija; b) Potencia Banda Variable.....	122

## Acrónimos

AC: Alternating Current.  
 BESS: Battery Energy Storage System.  
 BJT: Bipolar Junction Transistor.  
 CDEC: Centro de Despacho Económico de Carga.  
 CNE: Comisión Nacional de la Energía.  
 CPF: Control Primario de Frecuencia.  
 CSF: Control Secundario de Frecuencia.  
 CSI: Current Source Inverter.  
 DC: Direct Current.  
 DFL4: Decreto con Fuerza de Ley N°4.  
 EMT: Electromagnetic Transients.  
 ERNC: Energías Renovables No Convencionales.  
 ESS: Energy Storage System.  
 FACTS: Flexible AC Transmission System.  
 FCI: Force Commutated Inverter.  
 FESS: Flywheel Energy Storage System.

GTO: Gate Turn Off.  
HFESS: High Speed Flywheel Energy Storage System.  
IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor.  
LCI: Load Commutated Inverter.  
LFESS: Low Speed Flywheel Energy Storage System.  
LGSE: Ley General de Servicios Eléctricos.  
MOSFET: Metal-oxide-semiconductor Field-effect transistor.  
NTSyCS: Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio.  
PLL: Phase Locked Loop.  
PWM: Pulse-Width Modulation.  
RMS: Root Mean Square.  
SCES: Super Capacitor Energy Storage.  
SI: Sistema Interconectado.  
SIC: Sistema Interconectado Central.  
SING: Sistema Interconectado del Norte Grande.  
SMES: Superconductive Magnetic Energy Storage.  
THD: Total Harmonic Distortion.  
TIR: Tasa interna de retorno.  
UPS: Uninterruptible power supply.  
VAN: Valor Anual Neto.  
VSD: Variable Speed Drive.  
VSI: Voltage Source Inverter.  
VSR: Voltage Source Rectifier.

# Capítulo 1 Introducción

## 1.1 Motivación

El desarrollo sustentable y amigable con el medio ambiente es un tema cada vez más importante en todo ámbito de la sociedad humana. En los sistemas eléctricos de potencia, esto obliga a tener redes inteligentes que permitan el uso de la energía eléctrica de forma más eficiente.

Los métodos de almacenamiento de energía actualmente se ven como uno de los elementos indispensables para lograr este desarrollo, ayudando además a la calidad y seguridad del suministro eléctrico.

En numerosas redes de potencia alrededor del mundo ya se están evaluando proyectos de esta índole, aplicados a requerimientos que surgen al tratar de controlar la energía generada o consumida.

La ausencia regulatoria de los sistemas complementarios ha atrasado el desarrollo chileno de estos equipos debido a que mediante las actuales leyes su evaluación económica es desfavorable. Sin embargo se espera que sean proyectos necesarios por el continuo desarrollo hacia fuentes de generación renovables, sumado a la necesidad de continuar la calidad del suministro eléctrico.

En este trabajo se expone en detalle una de las tecnologías de almacenaje de energía, en particular su control, parte de su diseño y tres de sus aplicaciones en sistemas de potencia.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 General

Presentar el control del sistema de almacenamiento de energía mediante volante de inercia y presentar aplicaciones reales en las redes eléctricas chilenas.

### 1.2.2 Específicos

- Recopilar y analizar información para introducir distintos tipos de almacenamiento y compararlos.
- Presentar nociones de diseño de la tecnología en estudio.
- Obtener una modelación detallada del dispositivo.
- Diseñar un control adecuado.
- Establecer un esquema de ajuste del control.

- Obtener un modelo RMS simplificado de manera que se pueda estudiar el sistema de almacenamiento en los sistemas eléctricos chilenos.
- Presentar aplicaciones en los sistemas interconectados.
- Estimar la viabilidad económica del proyecto en las aplicaciones presentadas.

### **1.3 Alcances**

El objetivo principal de este estudio es presentar la tecnología de almacenamiento mediante volantes de inercia. También se presenta un modelo alternativo que permite realizar estudios en redes de mayor complejidad.

Como es un dispositivo complejo y posee varios componentes mecánicos, se decidió que los alcances de la memoria abarcan sólo las condiciones eléctricas. No se estudiarán las distintas solicitudes mecánicas internas del dispositivo y tampoco cómo éstas son controladas dentro de bandas de valores aceptables.

La evaluación económica se realizará estimando un precio aceptable, realizando análisis de tipo sensibilidad en el ámbito del número de operación del dispositivo. No se presenta una estimación futura real de los precios.

### **1.4 Estructura del Trabajo**

En el capítulo 2 se introducen cuatro tecnologías de sistemas de almacenamiento de energía y se detalla el aspecto constructivo de los FESS.

En el capítulo 3 se explica la modelación, algunos parámetros de diseño y el control del dispositivo en Matlab.

En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos en Matlab con sus respectivos análisis.

En el capítulo 5 se introduce el concepto de regulación de frecuencia en los Sistemas interconectados y se explican los requerimientos normativos técnicos chilenos en este tema.

En el capítulo 6 se detalla la modelación RMS del dispositivo en Digsilent y se compara con el modelo EMT realizado en Matlab.

En el capítulo 7 se modela parte del SIC y se conecta el FESS para analizar su aplicación en dos aplicaciones y sus respectivas evaluaciones económicas.

En el capítulo 8 se explica la modelación del SING y la conexión del FESS para su aplicación en regulación de frecuencia y su evaluación económica.

En el capítulo 9 se dan las conclusiones y en el capítulo 10 las referencias.

## Capítulo 2 Sistemas de almacenamiento de energía

Los sistemas de almacenamiento de energía (ESS) son dispositivos que permiten guardar energía eléctrica y liberarla cuando sea conveniente. Esta funcionalidad se aprovecha para solucionar o mejorar características de potencia activa de la red, por ejemplo en el marco de las energías renovables, los ESS se ven como una alternativa real para mitigar la característica de intermitencia innata de estos medios de generación.

En este capítulo se presentan nociones básicas sobre cuatro sistemas de almacenamiento de energía que actualmente están en desarrollo o evaluación o incluso en etapa de comercialización, como son las baterías, bobinas superconductoras, condensadores avanzados y volantes de inercia. Se detallará éste último y luego se presentará la base teórica de su sistema de control.

### 2.1 Almacenamiento de energía magnética mediante superconductores (SMES)

El SMES consiste en el almacenamiento de energía mediante la producción de un campo magnético intenso producto de la inyección de corriente continua a través de una bobina superconductora. La energía se puede almacenar en un periodo de tiempo prácticamente indefinido dado que existen mínimas pérdidas de conducción.

Se puede liberar la energía de la bobina extrayendo corriente, disminuyendo por lo tanto el campo magnético generado.

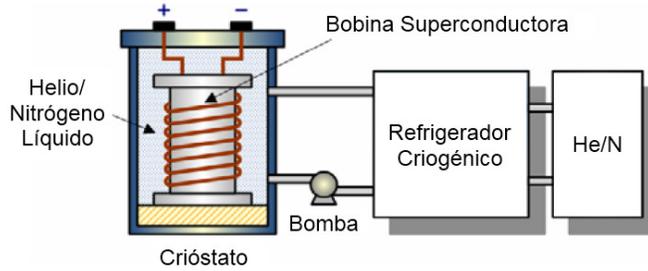
La energía almacenada en la bobina puede se calcula según la ecuación (2.1).

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad (2.1)$$

Donde:

- E: Energía almacenada
- L: Inductancia de la bobina
- I: Corriente continua

El estado superconductor de la bobina es necesario en todo momento para evitar las pérdidas en el material y poder mantener el campo magnético intenso. Es por esto que una parte importante del SMES consiste en dispositivos de refrigeración que disminuyen la temperatura a valores necesarios para la superconductividad (que dependen del material de la bobina), generalmente utilizando helio o nitrógeno líquido. En la Figura 2.1 se puede apreciar los componentes básicos que componen un SMES.

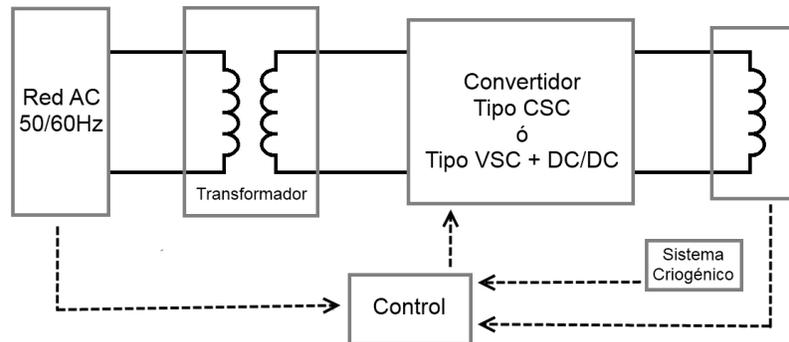


**Figura 2.1 Bobina Superconductora**

Se conectan a la red de potencia mediante un sistema de conversión AC/DC que se utiliza para cargar o descargar la bobina mediante un control adecuado. Se pueden usar dos tipos de convertidores. Una opción utiliza un convertidor de fuente de corriente y la otra un convertidor de fuente de voltaje más un convertidor DC/DC chopper, lo que forma un puente común de voltaje continuo.

Ambos sistemas de conversión tienen una elevada respuesta dinámica, pero el de fuente de corriente tiene la desventaja de ser más caro, tener mayores pérdidas y de generar mayor cantidad de armónicos, por lo que se prefiere la segunda alternativa.

El diagrama de conexión y la estructura básica se muestra en la Figura 2.2



**Figura 2.2 Conexión SMES a la red<sup>1</sup>**

El diseño de la bobina debe considerar varios aspectos de tal manera de conseguir el mayor rendimiento bajo el menor costo. Entre ellos están la configuración de la bobina (toroide o solenoide), la capacidad total de energía y la temperatura de operación.

Las bobinas de tipo solenoide han sido usadas debido a su simple diseño y rendimiento económico, mientras que las toroidales recientemente se están ocupando para aplicaciones de pequeña potencia. La mayoría de estas bobinas operan a bajas temperaturas (4 °K), pero gracias a los nuevos materiales superconductores, existen diseños que permiten elevar la temperatura de operación.

<sup>1</sup> Estos tipos de convertidores se explican y comparan en este capítulo.

El tiempo de respuesta en la liberación o carga de la energía acumulada en la bobina está sólo limitada al tiempo de respuesta de la electrónica de potencia de conexión de la red. Es por esto que se han estudiado varias aplicaciones posibles asociadas a mejorar la confiabilidad del sistema, entre ellas están:

- Seguimiento de demanda.
- Soporte a la frecuencia durante pérdida de generación.
- Mejorar la estabilidad transitoria y dinámica del sistema.
- Regulación de voltaje.
- Mejorar la calidad de potencia.
- Incrementar la capacidad de las líneas.

Los SMES tienen otras ventajas por sobre otros sistemas de almacenamiento. Pueden almacenar la energía por un periodo de tiempo más largo debido a que no poseen pérdidas en la bobina, los ciclos de carga y descarga no afectan su vida útil, tienen eficiencias cercanas al 95% y guardan la energía de una manera segura, es decir, no dependen de sistemas mecánicos que puedan fallar.

Entre las desventajas están el costo de los cables superconductores y la cantidad de energía necesaria para mantener el estado superconductor de la bobina. Esto último se puede disminuir usando materiales con superconductividad a altas temperaturas. [12] [15] [16]

## 2.2 Almacenamiento de energía mediante baterías (BESS)

Este sistema almacena la energía eléctrica de forma química. Básicamente, una batería consiste de una celda en la cual se produce una reacción química de oxidoreducción reversible con transferencia de electrones a través de un circuito eléctrico externo.

Una celda se construye con dos materiales, uno con la capacidad de oxidarse (liberar electrones) denominado ánodo, otro con la capacidad de reducirse (aceptar electrones) denominado cátodo, ambos sumergidos en un medio que permita la transferencia de iones, denominado electrolito.

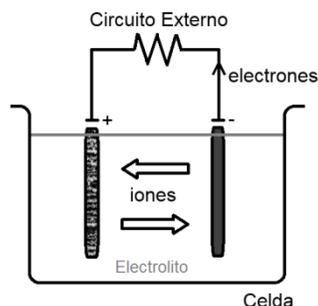


Figura 2.3 Celda Batería

Al conectar ambos materiales sumergidos con un conductor externo, los electrones fluyen desde el ánodo al cátodo debido a que se establece una diferencia de potencial entre ellos, denominada fuerza electromotriz o potencial de la celda (Figura 2.3). En el proceso se cambia el estado de oxidación de los electrodos y se libera la energía química potencial de la batería a través del circuito externo.

Al inyectar electrones al ánodo y sacar electrones del cátodo (creando la diferencia de potencial adecuada con energía externa), se puede volver al estado de oxidación inicial de los materiales y restablecer nuevamente el potencial de la celda, almacenándose energía eléctrica en potencial química.

Existen varios tipos de baterías para almacenamiento a gran escala, las que se diferencian en la composición de los materiales de la celda. Entre ellas, la batería de plomo-ácido es la tecnología más madura y de menor costo en el mercado, pero tiene una baja densidad de energía y un ciclo de vida que depende de la temperatura de operación y la cantidad de ciclos carga-descarga.

Otros tipos de tecnologías muestran un mejor potencial al tener una mayor densidad de energía, pero son de mayor costo. Entre ellas están las baterías de sulfuro de sodio, níquel-metal, níquel-cadmio y de Ion-litio, siendo éstas dos últimas las más utilizadas.

La eficiencia y el nivel de auto-descarga (pérdidas en vacío de la batería) dependen del tipo de batería. Las baterías de plomo-ácido tienen una eficiencia energética que ronda los 85-90% mientras que las baterías de sulfuro de sodio tienen una eficiencia de un 89-92%.

En los BESS se almacena energía en forma de carga eléctrica continua, por lo que se conectan a la red a través convertidores de potencia que les permiten una rápida respuesta. Actualmente son la tecnología más prometedora a corto plazo en almacenamiento de energía y pueden ser utilizadas para las mismas aplicaciones de potencia que los SMES.

La mayor desventaja de las baterías es que las descargas profundas y rápidas llevan a una disminución de su vida útil, incluso se puede llegar al punto de necesitar su reemplazo.

Otra desventaja es que pueden contener materiales peligrosos para la salud y el medio ambiente, que podrían tener problemas de disponibilidad en el futuro. Esto a su vez llevaría a problemas de disponibilidad de las propias baterías.

Los desafíos tecnológicos en el desarrollo de estos dispositivos se enfocan principalmente en mitigar estas dos desventajas utilizando nuevos materiales y aditivos de estos para mejorar su vida útil y la densidad de energía. [12] [16]

## 2.3 Almacenamiento mediante Condensador Avanzados (SCES)

Un condensador normal almacena energía mediante la elevación de la magnitud del campo eléctrico entre sus terminales cuando se aplica un voltaje continuo entre ellos. Se libera energía cuando este voltaje se disminuye, disminuyéndose a su vez el campo eléctrico.

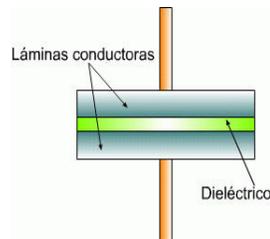


Figura 2.4 Condensador [12]

Un condensador consiste básicamente en dos placas conductoras separadas por un material dieléctrico (Figura 2.4). La energía entre placas se calcula de la siguiente manera:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 \quad (2.2)$$

Donde C es la capacidad del dispositivo y V el voltaje entre placas. La ecuación (2.2) indica que la energía almacenada aumenta proporcionalmente con la capacidad y con el cuadrado del voltaje.

Se llaman súper condensadores, ultra condensadores o condensadores avanzados, a condensadores que permiten almacenar mayor cantidad de energía eléctrica que los normales dado que son construidos con la intención de llevar la capacidad a valores extremadamente altos.

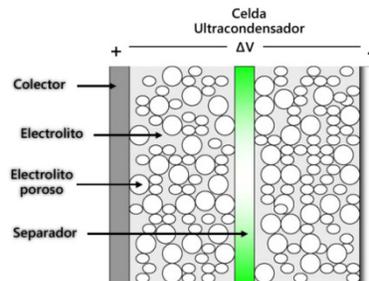
La capacidad puede ser aumentada ya sea aumentando la superficie de placas, aumentando la permitividad dieléctrica del material o disminuyendo la distancia de separación entre placas.

El voltaje máximo permitido depende del voltaje de ruptura del dieléctrico. Este proceso sucede cuando el dieléctrico tiene un exceso de energía potencial, lo que se traduce en pérdida de sus propiedades aislantes, destruyéndose debido a la corriente que lo atraviesa. Sólo puede ser aumentado utilizando otro dieléctrico.

Los súper condensadores poseen una amplia área de placas con una distancia muy pequeña entre ambas (menor a  $1\mu m$ ), lo que resulta en una capacidad que puede ser cientos o incluso miles de veces mayor que los condensadores electrolíticos. Sin embargo el voltaje máximo se limita a unos pocos volts, normalmente no mayor a 3V,

debido a la baja capacidad de ruptura que posee el electrolito a esta distancia entre placas.

Existen varios tipos de estos dispositivos dependiendo de los materiales utilizados. Los más conocidos utilizan electrodos a base de carbono y como dieléctrico utilizan un electrolito líquido de metal que permite la movilidad de iones. Normalmente se intercala una capa aislante entre los electrodos para aumentar aún más la capacidad (Figura 2.5).



**Figura 2.5 Diagrama súper condensador [12]**

Debido a su elevada auto-descarga, estos condensadores son usados mayormente en almacenamiento a corto plazo y, al igual que las baterías, son diseñados especialmente según la necesidad de respuesta dinámica requerida.

Comparado con los demás sistemas de almacenamiento de energía, los súper condensadores tienen ventajas importantes que los hacen perfectos para ciertos tipos de aplicaciones. Entre ellas se encuentran su eficiencia superior al 95%, no requieren mantenimiento alguna, es uno de los sistemas más robustos del mercado pues no requieren enfriamiento dado que no liberan calor y no tienen partes móviles, permitiendo cientos de miles de ciclos de operación sin tener problemas con la profundidad de descarga, lo que significa una vida útil alrededor de 10 años.

La gran desventaja es que es una tecnología extremadamente cara. Debido a sus ventajas, los condensadores de gran almacenamiento se han enfocado principalmente en su utilización en vehículos eléctricos. [12] [15] [16]

## **2.4 Almacenamiento mediante volantes de inercia (FESS)**

Este sistema almacena la energía eléctrica en forma de energía cinética de una masa rotatoria, denominada volante de inercia, que se instala de forma solidaria al eje mecánico de una máquina eléctrica. Para guardar energía la máquina acelera el volante de inercia (aumenta su velocidad angular), mientras que para liberar energía la máquina lo desacelera (reduce su velocidad angular).

Se pueden distinguir dos tipos de volantes de inercia según la magnitud de velocidad de giro. Los volantes de inercia de baja velocidad (LFESS) tienen un límite máximo que ronda las miles de revoluciones por minuto, mientras que los de alta velocidad

(HFESS) pueden tener velocidades máximas que rondan varias decenas de miles de revoluciones por minuto. [15] [16]

Ambos tienen similares tiempos de respuesta eléctrica dado que se conectan de la misma forma a la red. Los LFESS son utilizados cuando se necesita almacenamiento de corto plazo y bajo costo, donde el peso no es una variable importante, mientras que los HFESS son utilizados para almacenar la energía por mayor cantidad de tiempo en un dispositivo más compacto y de menor peso.

Los LFESS son usados comúnmente en aplicaciones UPS (fuente de alimentación ininterrumpida), mientras que los HFESS son utilizados en satélites, vehículos y almacenamiento a gran escala.

La energía almacenada del FESS puede calcularse según la siguiente expresión:

$$E_{FESS} = \frac{1}{2}J(w_{max}^2 - w_{min}^2) \quad (2.3)$$

Donde J es el momento de inercia del volante de inercia y w las velocidades angulares máxima y mínima de rotación respectivamente. La velocidad angular máxima depende de la resistencia de la masa girante a la tensión radial (debido a la fuerza centrífuga), mientras que la velocidad mínima se caracteriza por ser la velocidad donde cualquier reducción de ésta no significa un decremento significativo en la profundidad de la descarga.

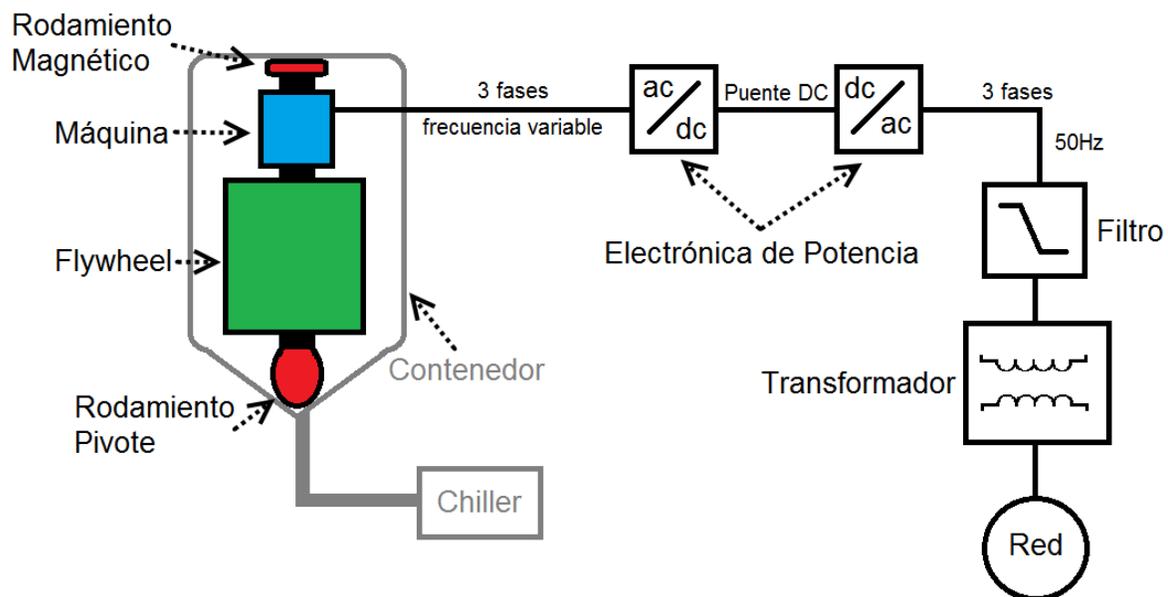


Figura 2.6 Diagrama FESS

En la Figura 2.6 se puede ver un diagrama constructivo del FESS. Este consta de las siguientes componentes principales:

- Volante de inercia
- Máquina eléctrica
- Rodamientos
- Contenedor
- Elementos adicionales (electrónica de potencia, Transformador, Filtro, Sistemas de Refrigeración, etc).

A continuación se darán a conocer las principales características de estos componentes.

### 2.4.1 Volante de inercia

Su diseño es clave para alcanzar la mayor cantidad de energía almacenada posible. Según la ecuación (2.3), la energía almacenada es proporcional al momento de inercia y al cuadrado de la velocidad angular del volante. Esto quiere decir que el parámetro más influyente en la energía de la máquina es la velocidad.

El momento de inercia de cualquier cuerpo respecto a un eje arbitrario de rotación se calcula según la ecuación (2.4).

$$J_{masa} = \int_m r \cdot dm = \int_v r \cdot \rho \cdot dv \quad (2.4)$$

Donde:

- $r$ : menor distancia desde el eje de rotación al elemento de masa  $dm$
- $\rho$ : densidad volumétrica de elemento infinitesimal de masa  $dm$
- $v$ : volumen del material

En los FESS, las formas dominantes de los volantes de inercia son cilindros sólidos y huecos. Resolviendo la ecuación (2.4) para estas geometrías se puede demostrar que el momento de inercia del cilindro sólido se calcula según la expresión (2.5) y el momento de inercia del cilindro hueco según la expresión (2.6).

$$J_{cilindro\ sólido} = \frac{1}{2} \cdot r^4 \cdot \pi \cdot h \cdot \rho \quad (2.5)$$

Donde,

- $r$ : radio del cilindro
- $\rho$ : densidad del material
- $h$ : altura del cilindro

$$J_{\text{cilindro hueco}} = \frac{1}{2} \cdot (r_2^4 - r_1^4) \cdot \pi \cdot h \cdot \rho \quad (2.6)$$

Donde,

- $r_2$ : radio exterior cilindro hueco.
- $r_1$ : radio interior del cilindro hueco.

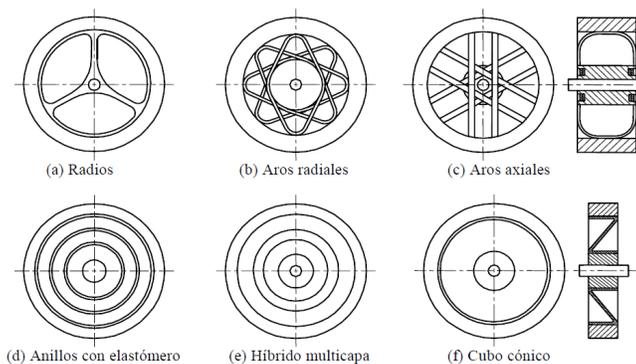
Para una misma forma, la máxima energía cinética admisible por el volante depende únicamente de su volumen  $v$ , de su máxima tensión radial admisible  $\sigma$  y de un coeficiente  $k$  que da cuenta de la eficiencia de la geometría del volante para almacenar energía. [1] [40]

$$E_{Max} = k \cdot v \cdot \sigma \quad (2.7)$$

El diseño de los volantes de inercia de baja velocidad es relativamente simple dado que su objetivo principal es maximizar el momento de inercia. Su diseño se basa en cilindros macizos de tal forma de aumentar la masa y así aumentar la energía almacenada. En estas velocidades se ocupan materiales pesados rígidamente unidos al eje con ligera resistencia a la tensión radial, como puede ser el acero u otro metal similar.

El diseño de los volantes de inercia de alta velocidad se complica pues la meta es maximizar la velocidad de rotación sin que el material se destruya debido a la fuerza centrífuga. Se basa en maximizar la ecuación (2.3), tomando en cuenta la ecuación (2.7), tratando de elevar lo más posible el coeficiente de máxima tensión radial. Esto obliga a utilizar materiales livianos denominados “compuestos”, como kevlar, fibra de vidrio o fibra de carbono, que pueden soportar grandes tensiones radiales.

La configuración maciza de volante no puede ser aplicada a velocidades elevadas, incluso si se ocupan materiales compuestos, debido a que es una configuración excesivamente rígida, especialmente en la unión de la masa con el eje de giro. Es por esto que en los HFESS se debe utilizar una configuración que permita cierta libertad radial. Las configuraciones más comunes para este tipo de rotores se pueden ver en la Figura 2.7.



**Figura 2.7 Tipos de rotores de alta velocidad [1]**

Los rotores tipo a, b, c y f se componen de una llanta conectada al eje mediante uniones elásticas, mientras que los rotores d y e están compuestos de múltiples anillos. En el caso del rotor d, se utiliza el mismo material para formar los anillos y se unen mediante un material elástico, mientras que en el rotor e, se construye mediante anillos de diferentes tipos de materiales. [1]

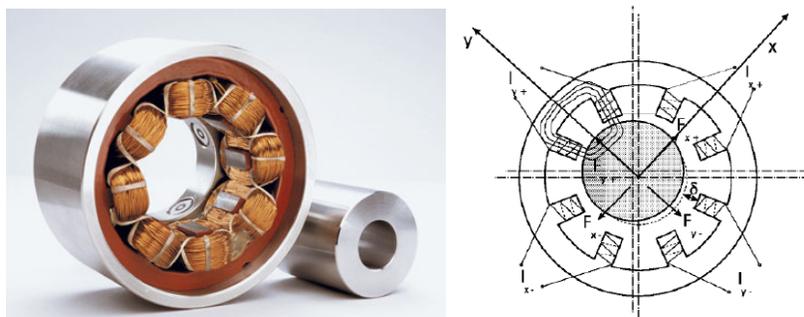
## 2.4.2 Rodamientos

Son partes fundamentales de los FESS dado que permiten el movimiento rotatorio del eje de la máquina. Como es difícil coincidir el centro de giro del rodamiento con eje de rotación del centro de masa del volante de inercia, generalmente se usan rodamientos que permiten libertad radial de movimiento al eje, de manera de disminuir las fuerzas en estas piezas.

En los volantes de inercia de baja velocidad se utilizan rodamientos convencionales (mecánicos). La ventaja de estos rodamientos es su bajo costo, pero elevan considerablemente las pérdidas por fricción y en general no son aptos para trabajar en vacío, lo que limita la velocidad del sistema rotatorio.

En volantes de inercia de alta velocidad se utilizan rodamientos magnéticos que disminuyen notablemente las pérdidas dado que no existe contacto del eje con partes metálicas. Son dispositivos de mayor tamaño y complejidad que los convencionales, que operan con un sistema de control electromagnético complejo que les permiten estabilizar el eje rotatorio.

Otras ventajas de este tipo de rodamiento es que permiten el movimiento radial del eje de forma natural, tienen una mayor vida útil y operan sin problemas en vacío, pero son de mayor costo que los convencionales. [5] [7]



**Figura 2.8 Rodamiento Magnético y principio de funcionamiento**

Por razones de estabilidad y ahorro de costos, el eje de rotación normalmente se diseña de forma vertical, similar a un “trompo”. De esta manera el peso de la masa girante reposa sobre un rodamiento tipo pivote mecánico con muy pocas pérdidas mientras que la parte superior del eje se estabiliza mediante un rodamiento magnético. A este conjunto se le denomina rodamiento híbrido (que es lo

esquemático en la Figura 2.6), que es el rodamiento comercial preferido en la actualidad debido a que permite ahorrar un rodamiento magnético en la parte inferior del rotor. [13]

### 2.4.3 Máquina eléctrica

Es la responsable de transformar la energía eléctrica en cinética y viceversa. Se evita usar máquinas en las que se deba tener alguna conexión al rotor, pues las grandes velocidades desgastan estas conexiones limitando su vida útil y haciendo necesarias mantenciones periódicas [8]. Se evita usar entonces las máquinas de corriente continua y se prefiere las máquinas sincrónicas con imanes permanentes y las de inducción con jaula de ardilla.

La elección del tipo de máquina depende de las condiciones de operación y la cantidad de pérdidas que se esté dispuesto a tolerar.

Las máquinas de inducción son usadas mayormente en LFESS de bajo costo donde no se necesita almacenar por largo tiempo la energía. Esto se debe a que en este tipo de máquinas se tienen las mayores pérdidas, siendo la de mayor importancia la que se presenta en el rotor, que eleva considerablemente la temperatura de esta pieza. Esto imposibilita usar esta máquina en vacío al no existir camino termal para que el calor se libere, lo que restringe el uso de estas máquinas a grandes velocidades por el sobrecalentamiento excesivo del rotor.

Comercialmente, prevalecen las máquinas sincrónicas con imanes permanentes debido a que es posible lograr una mayor eficiencia y sus pérdidas rotóricas son mínimas. Existen 2 tipos de estas máquinas según la dirección del flujo magnético, las de flujo axial y las de flujo radial (Figura 2.9).

Las de flujo axial tienen un mayor torque y una mejor densidad de potencia, lo que las hace especialmente adecuadas donde el espacio es un factor importante, pero son máquinas difíciles de construir que requieren de un control totalmente distinto, lo que eleva su costo. Entre las dos, la máquina de flujo radial es la más utilizada.

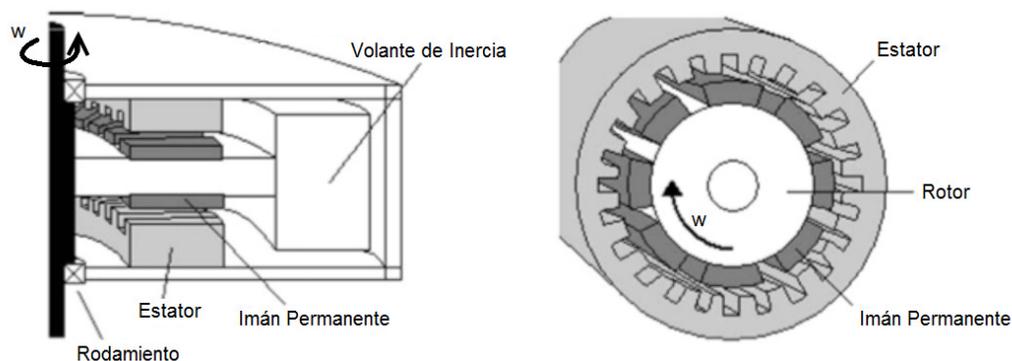


Figura 2.9 Máquina flujo axial y radial [6]

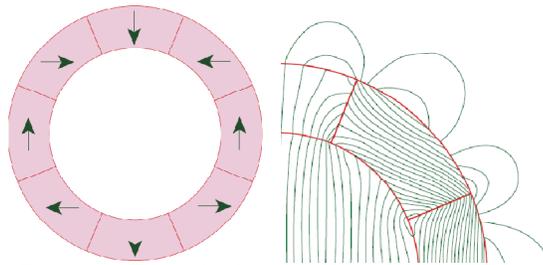
Las velocidades de giro que pueden alcanzar estas máquinas obligan a diseñar el rotor de tal manera que los imanes puedan soportar las grandes tensiones radiales. Normalmente se construyen con dos o cuatro polos para mantener la frecuencia eléctrica baja, pero con la desventaja de que la amplitud del voltaje en bornes se reduce.

Uno de los principales retos actuales del diseño de la máquina síncrona es reducir las pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas en el estator. Es así que se trata de mejorar la eficiencia usando fierro con mejores propiedades magnéticas a las actuales, alternativa que actualmente tiene un elevado costo.

En el esfuerzo de reducir aún más las pérdidas de la máquina y aumentar la eficiencia del FESS, se han utilizado otro tipo de máquinas, como las máquinas con imanes en arreglo Halbach y las máquinas de reluctancia. Estos tipos de FESS llegan a eficiencias superiores al 95%, pero comercialmente no se han masificado.

El arreglo Halbach es una forma de disponer los imanes de forma tal que cada campo magnético individual refuerza al del conjunto, creando líneas de campo cerradas, con mínima pérdida de flujo y con una distribución uniforme en el espacio, como se puede ver en la Figura 2.10.

Este arreglo obliga a instalar el rotor en la parte externa de la máquina, mientras que el estator se instala al interior. Los FESS que utilizan este tipo de arreglo se construyen de forma que el rotor de la máquina funcione también como volante de inercia.



**Figura 2.10 Rotor Halbach de 2 polos y líneas de campo [43]**

Las máquinas de reluctancia tienen la particularidad de poseer un rotor construido con material magnético, pero no imantado. Su principio de funcionamiento es simple, dado que al aplicar un campo magnético al rotor, éste girará con el motivo de reducir la reluctancia total del flujo magnético. En la actualidad es posible utilizar este tipo de máquinas debido al avance de la electrónica de potencia que ha mejorado la eficiencia y el factor de potencia. [5] [6]

## **2.4.4 Elementos Adicionales**

Entre los elementos adicionales de un FESS se encuentran:

- Electrónica de potencia
- Electrónica de control
- Contenedor
- Refrigeración
- Filtro de armónicos
- Transformador elevador
- Salas de mando

Debido a las partes rotatorias a alta velocidad, el daño que puede ocasionar una falla mecánica del material, ya sea por mala construcción del volante de inercia o por sobrecarga, es superior a los demás tipos de almacenamientos de energía. Es por esto que se hace necesario encerrar el FESS en un contenedor capaz de proteger al exterior de cualquier imprevisto. Con el motivo de asegurar la seguridad, actualmente los HFESS de alta energía se instalan además bajo tierra.

En los volantes de inercia de baja y alta velocidad se instalan sistemas de refrigeración y además en los de alta velocidad el contenedor debe mantener vacío al interior para reducir las pérdidas por fricción.

## **2.4.5 Comparación con otros sistemas de almacenamiento**

Dependiendo de la tecnología utilizada, la eficiencia de los FESS puede llegar a valores superiores al 90%. Tienen la habilidad de cargar y descargar la energía muy rápidamente, son inmunes a las fluctuaciones de temperatura y los ciclos de carga-descarga no afectan significativamente su vida útil.

A diferencia de los demás ESS, potencia y energía pueden ser diseñadas independientemente, dado que la energía depende del volante de inercia y la potencia depende de la máquina eléctrica,

En la Tabla 2.1 se comparan tres de los sistemas de almacenamiento ya descritos.

	Baterías plomo-ácido	Volantes de inercia	SMES
<b>Mecanismo</b>	Químico	Mecánico	Eléctrico
<b>Años de vida útil</b>	3-5	>20	~20
<b>Tecnología</b>	Probada	En evaluación	En evaluación
<b>Proveedores<sup>1</sup></b>	~700	~10	~1
<b>Ventas Anuales (millones de dólares)</b>	~7000	~2	
<b>Rango Temperatura</b>	Limitada	Menos limitada	Controlada
<b>Problemas Ambientales</b>	Al término de vida útil	Mínimos	Mínimos
<b>Potencia/Energía</b>	Mayor	Menor	Medio
<b>Tiempo de almacenaje</b>	Años	Horas	Días

**Tabla 2.1 Comparación de Tecnologías [6]**

Algunas desventajas del almacenamiento mediante volantes de inercia son su baja densidad de energía y los peligros mecánicos. Los actuales dispositivos comerciales están diseñados para desconectarse inmediatamente si se produce una falla mecánica y, como se indicó anteriormente, se recomienda instalarlos bajo tierra para mayor seguridad [4]. Otro punto importante es que se conectan a la red con una etapa de conversión de potencia adicional a las otras tecnologías.

La comparación con las baterías de sulfuro de sodio (otra tecnología prometedora) se establece en la Tabla 2.2<sup>2</sup>.

	Batería NaS	Volante de inercia
<b>Tamaño</b>	1MW (10 MWh)	1MW (0.25MWh)
<b>Costo total</b>	\$1.500.000-\$3.000.000	\$750.000 – \$2.000.000
<b>Costo anual de OM</b>	\$15.000-\$90.000	\$20.000 – \$30.000
<b>Ciclo de Vida en N° de ciclos de carga-descarga</b>	500-20000	100000-2000000
<b>Vida Útil en años</b>	12-20	15-25
<b>Relación m<sup>2</sup>/MW</b>	83,61	13.93

**Tabla 2.2 Comparación FESS vs NaS [4]**

## 2.4.6 Conexión a la red

La máquina que convierte la energía cinética en eléctrica y viceversa es alterna, por lo que el FESS se debe conectar a la red a través de cualquier sistema de conversión AC-AC del tipo frecuencia variable (VSD) y que permita controlar la máquina eléctrica de la mejor forma posible.

<sup>1</sup> Sólo del dispositivo, no considerando la electrónica de potencia requerida para su conexión.

<sup>2</sup> Datos en dólares.

Los VSDs se clasifican en:

- AC/DC (chopper)
- AC/AC directo (cicloconvertidores y convertidores matriciales)
- AC/AC vía puente de voltaje DC
- AC/AC vía puente de corriente DC (LCI y FCI)

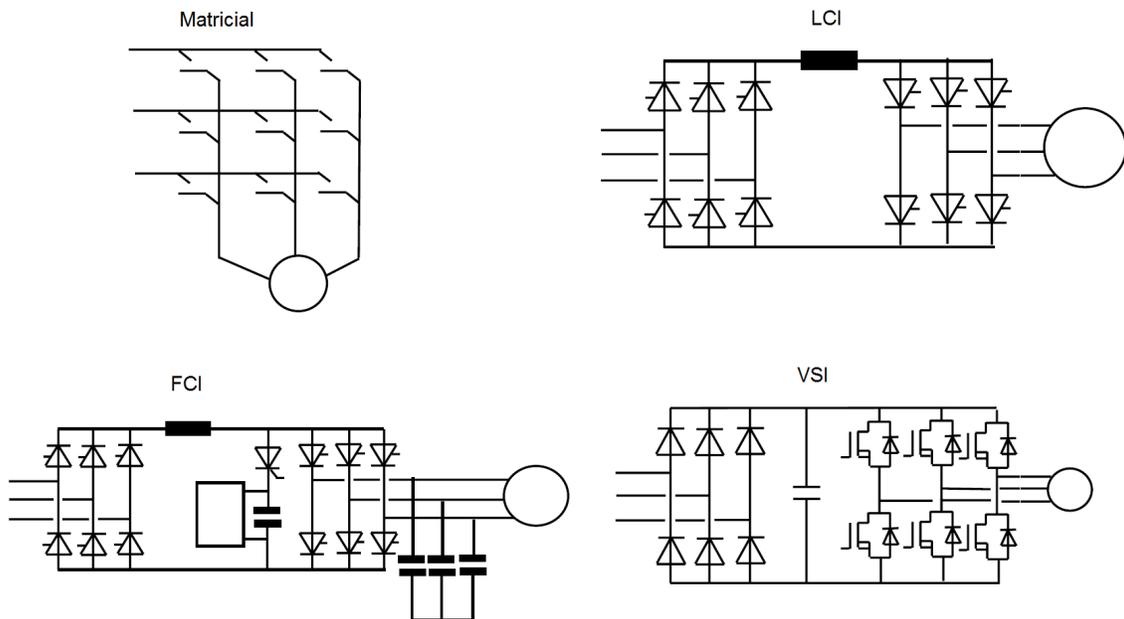
Dado que el primero no es AC/AC, sólo los tres últimos pueden ser utilizados en este tipo de aplicación. El convertidor de conmutación forzada (FCI) es complicado de controlar, tiene un desempeño dinámico bajo y pulsaciones de torque, por lo que se prefiere ocupar alguno de los restantes.

Los cicloconvertidores se utilizan tanto en máquinas síncronas como de inducción, pueden generar alto torque sobre el rango de velocidad de la máquina y una gran respuesta dinámica. El principio básico de estos dispositivos es construir un voltaje alterno de menor frecuencia a través de segmentos de onda de una fuente de voltaje de mayor frecuencia.

Los convertidores matriciales se presentan como una mejora a los cicloconvertidores. Su principio básico es el mismo, pero a diferencia de los cicloconvertidores que utilizan interruptores de una dirección, la carga se conecta a la red mediante interruptores bidireccionales totalmente controlados. De esta manera se puede construir una onda de salida con frecuencia incluso mayor a la de entrada.

Los convertidores vía puente de voltaje se construyen mediante un rectificador (no necesariamente controlado), un elemento capacitivo en la parte DC y un inversor con fuente de voltaje (VSI). Al contrario del convertidor anterior, el objetivo es primero generar un voltaje DC constante para luego generar una onda de voltaje sinusoidal de cualquier frecuencia.

Los convertidores vía puente de corriente LCI se construyen usando un rectificador controlado, un elemento inductivo en serie en el puente DC y un inversor con fuente de corriente (CSI). El objetivo es generar en la carga una onda de corriente trifásica lo más sinusoidal posible.



**Figura 2.11 Esquema unilineal de convertidores AC/AC [17]**

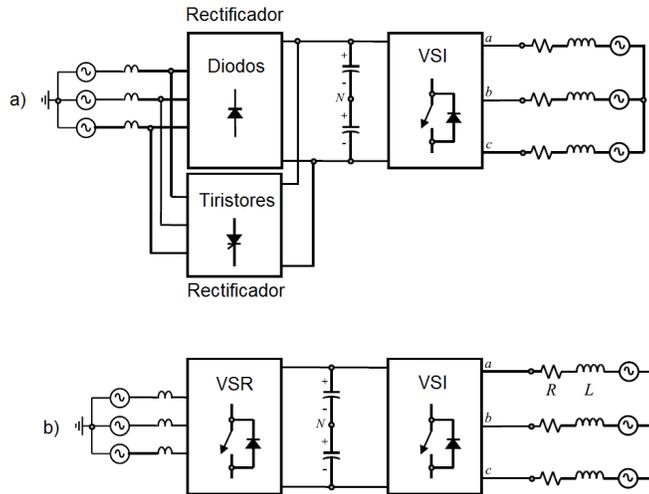
En la Tabla 2.3 se comparan estos cuatro sistemas de conversión.

	Ciclo	LCI	VSI	Matricial
<b>Rango Velocidad</b>	Limitada	Amplia	Amplia	Amplia
<b>Respuesta Dinámica</b>	Excelente	Buena	Excelente	Excelente
<b>Pulsaciones de torque</b>	Bajas	Altas	Muy bajas	Excelente
<b>Factor de potencia a baja velocidad</b>	Bajo	Bajo	Muy bueno	Muy bueno
<b>Estabilidad</b>	Buena	Moderado	Muy Buena	Muy bueno
<b>Bidireccionalidad de potencia</b>	inherente	inherente	Depende	inherente
<b>Densidad de potencia</b>	Moderada	Buena	Muy buena	Excelente

**Tabla 2.3 Comparación convertidores AC/AC [17]**

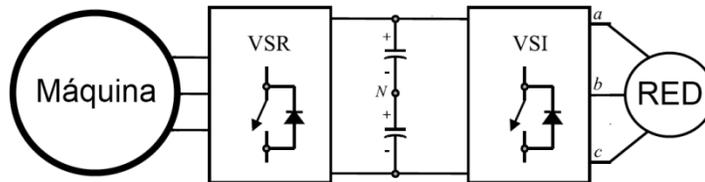
Gracias a sus características y el costo en comparación con los demás sistemas de conversión, normalmente la conexión a la red de los FESS se utiliza la conversión AC/AC con puente de voltaje.

Para lograr la bidireccionalidad de potencia requerida por el sistema de almacenamiento, el convertidor AC/AC mediante VSI se modifica. Una opción es agregar una etapa de rectificación controlada en paralelo a la rectificación (Figura 2.12a) o reemplazar la etapa de rectificación por un segundo inversor de voltaje (Figura 2.12b) de tal manera que el voltaje del puente DC lo transforme en el voltaje alterno de la red. Este último inversor en verdad se está ocupando como rectificador por lo que se denomina rectificador con fuente de voltaje (VSR). [17]



**Figura 2.12 Conversor AC/AC mediante VSIs Bidireccional [17]**

Por sus características eléctricas y económicas, el FESS normalmente tiene la configuración de la Figura 2.13, donde se ocupan 2 VSI.

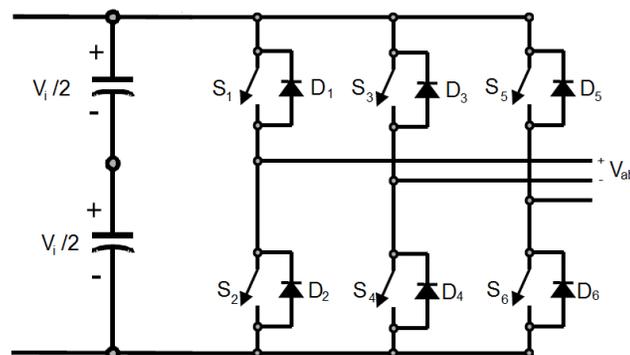


**Figura 2.13 Conexión FESS a la red**

Por su importancia en el trabajo, se introducirán las bases teóricas que rigen los VSI.

### 2.4.6.1 Inversor con fuente de voltaje (VSI)

El objetivo de este dispositivo es generar un voltaje trifásico donde se controla tanto la amplitud como la frecuencia del voltaje. La configuración básica se puede ver en la Figura 2.14.



**Figura 2.14 Esquema VSI [17]**

Al abrir cualquier interruptor con una carga inductiva (por ejemplo una máquina) se genera una corriente inversa que puede dañar el dispositivo, por lo que se conecta un diodo de recuperación rápida de forma antiparalela que permite que esa corriente circule y así proteger al interruptor (Figura 2.14).

El inversor (o convertidor) puede ser construido con cuatro tipos de interruptores bidireccionales. Se pueden usar tiristor apagable por compuerta (GTO), transistor bipolar (BJT), transistor de compuerta aislada (IGBT) y Transistores de efecto de campo (MOSFET). La elección depende de los tiempos de conmutación y la potencia disipada en estos dispositivos.

IGBT y MOSFET son preferidos debido a sus ventajas en control y menor pérdida de potencia. Los MOSFET son usados para aplicaciones de bajo voltaje y potencia a alta frecuencia, mientras que los interruptores tipo IGBT son usados en baja y mediana potencia con una frecuencia menor. Por ello, considerando la potencia elevada y altas frecuencias de los FESS, se prefiere usar IGBTs.

Dispositivo	Potencia	Frecuencia
<b>BJT</b>	Media	Media
<b>GTO</b>	Alta	Baja
<b>IGBT</b>	Media	Media
<b>MOSFET</b>	Baja	Alta

**Tabla 2.4 Comparación dispositivos interruptores**

El voltaje trifásico se genera mediante la operación adecuada del conjunto de los seis interruptores bidireccionales, teniendo en cuenta que existen ocho posibles estados (Tabla 2.5).

Estado	ON	OFF	$v_{ab}$	$v_{bc}$	$v_{ca}$
<b>1</b>	$S_1, S_2$ y $S_6$	$S_4, S_5$ y $S_3$	$v_i$	0	$-v_i$
<b>2</b>	$S_2, S_3$ y $S_1$	$S_5, S_6$ y $S_4$	0	$v_i$	$-v_i$
<b>3</b>	$S_3, S_4$ y $S_2$	$S_6, S_1$ y $S_5$	$-v_i$	$v_i$	0
<b>4</b>	$S_4, S_5$ y $S_3$	$S_1, S_2$ y $S_6$	$-v_i$	0	$v_i$
<b>5</b>	$S_5, S_6$ y $S_4$	$S_2, S_3$ y $S_1$	0	$-v_i$	$v_i$
<b>6</b>	$S_6, S_1$ y $S_5$	$S_3, S_4$ y $S_2$	$v_i$	$-v_i$	0
<b>7</b>	$S_1, S_3$ y $S_5$	$S_4, S_6$ y $S_2$	0	0	0
<b>8</b>	$S_4, S_6$ y $S_2$	$S_1, S_3$ y $S_5$	0	0	0

**Tabla 2.5 Estados posibles VSI [17]**

De los 8 estados sólo 6 tienen salida no nula, por lo que también se les denomina convertidor de 6 estados. Los interruptores son controlados generalmente mediante señales generadas mediante modulación por ancho de pulso (PWM). Existen varias formas de realizar la modulación PWM, pero entre las más importantes se encuentran la modulación sinusoidal y vectorial. [17]

## 2.4.7 Control

Los controles que se pueden usar para entregar y almacenar energía de la red usando FESS son los controles usuales para máquinas eléctricas.

Dependiendo del tipo de máquina y su uso se tendrá que elegir el tipo de control más adecuado que satisfaga los requerimientos básicos. En esta aplicación el control debe permitir una respuesta dinámica rápida con un error de velocidad mínimo, pues es este parámetro el que permite estimar cuanta energía tiene almacenada el volante de inercia.

Entre todos los controles posibles, tanto para la máquina de inducción o síncrona, existen dos tipos de controles que permiten manejar el torque en tiempo real. Estos son el control por orientación de flujo (o control vectorial) y el control directo de torque.

### 2.4.7.1 Control por orientación de flujo

La inductancia de las máquinas sincrónicas varía con respecto a la posición del rotor en el estator, lo que resulta en relaciones complejas entre torques, velocidad, voltajes y corrientes, además de depender con respecto al tiempo. Esto se presenta como un inconveniente cuando se debe controlar la máquina en tiempo real dado que se necesita alta capacidad de cómputo.

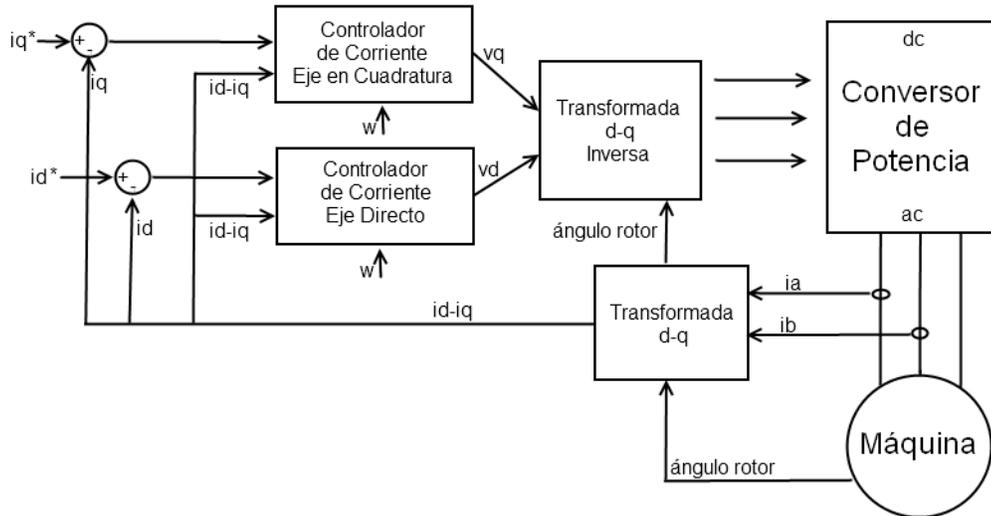
El método de control por orientación de flujo permite manejar la máquina síncrona como si fuera una máquina de corriente continua, en donde los parámetros de la máquina y flujos se pueden expresar mediante valores constantes independientes del tiempo. Es así como el control vectorial permite variar el torque o la velocidad de la máquina variando la corriente de alimentación mediante relaciones simples.

Lo anterior es posible gracias a que se cambia de referencia las variables de estator (voltajes y corrientes) a un marco de referencia giratorio ligado al rotor. Esta transformación se le denomina transformación de Clark y permite obtener ecuaciones simples con independencia del tiempo.

Dependiendo de la cantidad de información que se tenga sobre los parámetros de la máquina, se podrá construir un lazo de control como se ve en la Figura 2.15. En este diagrama, se miden las corrientes de línea y mediante un sensor de posición se obtiene la posición (el ángulo) del rotor con respecto al estator, lo que se denomina control tipo directo. Cuando la posición del rotor se estima mediante diversas relaciones matemáticas (observadores), se denomina control tipo indirecto.

El ángulo es necesario para aplicar la transformada de Clark a las tres corrientes oscilantes de estator y obtener así dos corrientes continuas en el marco de referencia rotatorio.

Estas corrientes, que en la Figura 2.15 se denominan  $i_d$  (eje directo) e  $i_q$  (eje en cuadratura), se comparan con las corrientes de referencia para generar el torque o la velocidad deseada en la máquina, generando un error que se aplica a algún tipo de control (ya sea mediante histéresis o tipo PI). La salida de este control maneja la referencia de conmutación del convertidor de potencia (VSI), lo que controla finalmente la máquina eléctrica. [26]

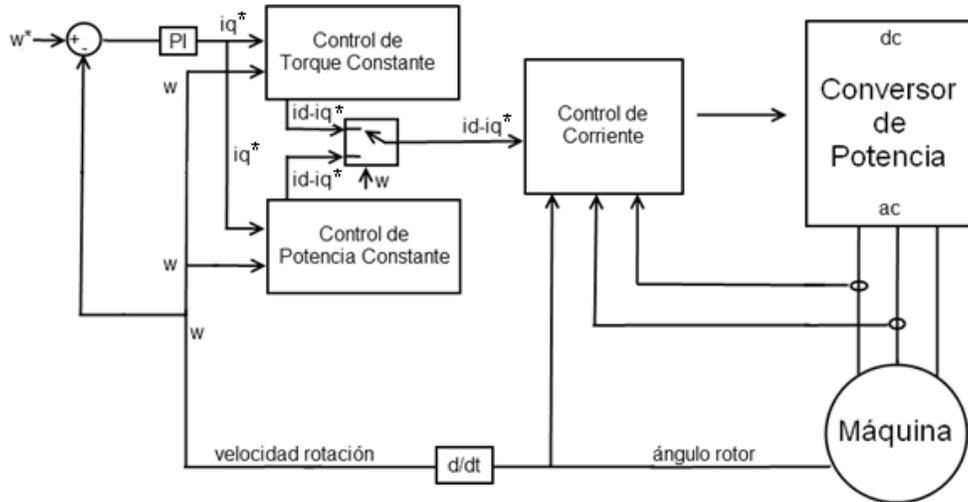


**Figura 2.15 Lazo de control por orientación de flujo en forma general**

Las corrientes de referencia del lazo de control ( $i_d^*$  e  $i_q^*$  en Figura 2.15) dependen de la estrategia con la cual se quiere operar la máquina. La estrategia tiene relación con el tipo de operación que se busca, el que puede ser:

- Operación con máximo torque por amperio: En este modo de operación, se trata de generar el mayor torque posible con las corrientes de alimentación en eje directo y en cuadratura. En máquinas sincrónicas con imanes superficiales, donde las inductancias en eje directo y en cuadratura son iguales, el máximo torque se da cuando la corriente en eje directo es cero.
- Operación con debilitamiento del flujo: Este modo de operación trata de reducir el flujo en el eje directo de tal forma de obtener un mayor rango de velocidad de operación pero con una reducción del torque.
- Operación con límites de voltaje y corriente: Simplemente se busca limitar la corriente y el voltaje del convertidor y/o máquina a los valores máximos permitidos.

Si se quiere controlar la velocidad de la máquina, se agrega además un control que permite obtener las corrientes de referencias. Un diagrama de control de velocidad típico se puede ver en la Figura 2.16.



**Figura 2.16 Diagrama de control de velocidad**

En este diagrama, las corrientes de fase y la velocidad del motor son medidas. El control permite dos tipos de operación (debilitamiento de flujo y máximo torque) dependiendo de la velocidad del motor, además estima la posición del rotor a partir de la velocidad. Finalmente estas señales son utilizadas en el controlador de corriente para generar los pulsos adecuados que manejan el VSI. [26]

Para realizar un control adecuado del FESS, se deben distinguir los distintos estados de operación del sistema completo. Cada estado de operación puede ser controlado con distintos modos de operación de la máquina, lo que se determinará más adelante.

El FESS puede operar de tres formas:

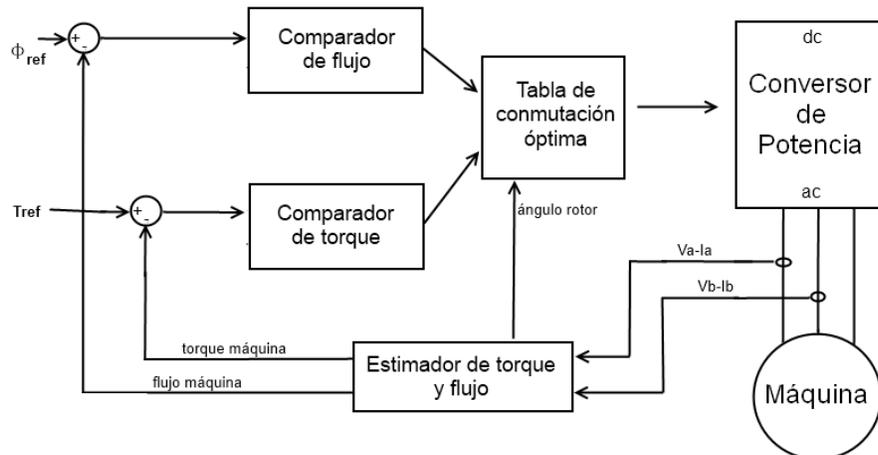
- Modo Carga: La máquina opera como motor, acelerando el volante de inercia para almacenar energía.
- Modo Descarga: La máquina opera como generador, desacelerando el volante de inercia.
- Modo Reposo: La máquina mantiene la velocidad del volante de inercia constante.

Si se quiere regular la frecuencia del sistema, la variable de referencia debe ser la potencia activa requerida por el sistema que debe ser inyectada o absorbida por el FESS a la red.

#### 2.4.7.2 Control directo de torque

En este tipo de control, el flujo magnético y el torque eléctrico son controlados de forma directa mediante la selección de modos óptimos de estados (Tabla 2.5) del inversor que está conectado la máquina. La selección se basa en tablas que se

obtienen mediante consideraciones físicas que relacionan el torque real con el deseado (de referencia) y el flujo real con el flujo deseado en la máquina.



**Figura 2.17 Esquema básico de control directo de torque**

La Figura 2.17 presenta un esquema de control básico. Se miden tanto las corrientes como los voltajes de línea para estimar el flujo y el torque sin necesidad de medir la posición del rotor (forma indirecta). Ambas estimaciones son usadas para obtener la diferencia con el valor de referencia que luego es aplicada a un comparador para obtener el delta de flujo y torque que requiere la tabla óptima de conmutación para generar las señales de control adecuadas del inversor.

Algunas características de este control es que se controlan indirectamente las corrientes de estator de la máquina y se obtienen oscilaciones de torque pequeñas con una excelente dinámica.

La ventaja de este tipo de control es que no se requiere transformar los parámetros de la máquina a otro marco de referencia y posee reducido número de controladores. Una desventaja es que puede tener problemas dinámicos en bajas velocidades. [26]

## Capítulo 3 Diseño, Modelación y Control

En este capítulo se trabaja con Matlab Simulink. Mediante las funciones básicas de este programa se realizará el control del FESS y junto con su paquete adicional SimpowerSystem se construirá un modelo tipo circuito que constará de las diferentes partes mencionadas en el capítulo anterior.

Como no se pudieron obtener las características físicas reales de un sistema similar, se darán criterios de diseño y con ellos se obtendrán parte de los valores elegidos en la programación. Para determinar el resto se utilizarán supuestos basados en los valores de las distintas referencias del trabajo.

En este capítulo se presenta primero el sistema a modelar, su descomposición y las ecuaciones básicas que rigen cada componente, luego se profundizará en el tipo de control realizado.

### 3.1 FESS

El FESS que se modeló consta de cuatro dispositivos: Máquina eléctrica, Convertidor de potencia, Condensador, Filtro de conexión y Transformador, conectados como se ve en la Figura 3.1.

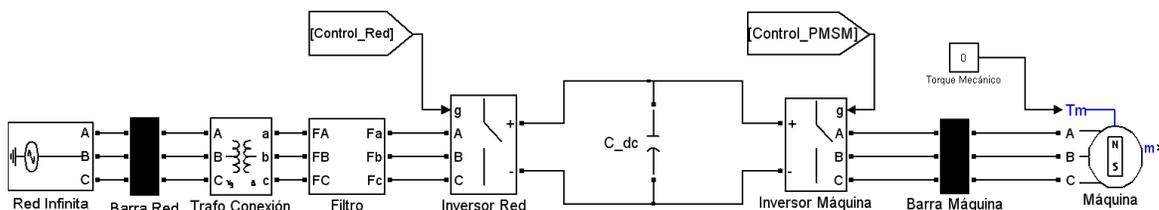


Figura 3.1 Circuito FESS

Los parámetros de diseño que se obtienen de [14] son dos:

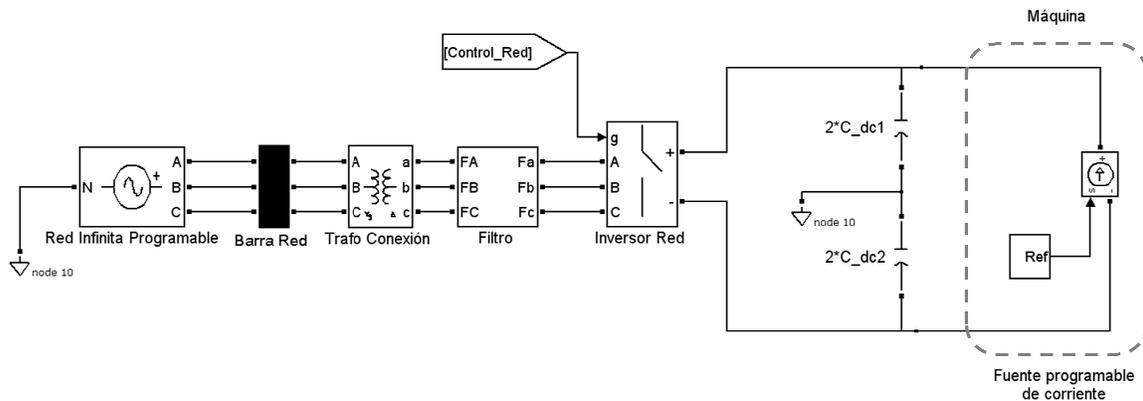
- Se encuentra conectado a la red mediante un transformador elevador 480V/23kV.
- El sistema completo debe ser diseñado para 100kW de potencia

El voltaje de 480V depende del tipo de máquina que se utilice. Para máquinas de inducción este voltaje puede ser mayor, pero como se utiliza una máquina de imanes permanentes, se mantendrá este valor constante (dado que este tipo de máquinas no son de voltaje muy elevado).

El circuito de la Figura 3.1 es computacionalmente complejo, por lo que no permite un adecuado ajuste de controladores sin un gasto de tiempo considerable en cada simulación.

Para solucionar este problema se crearon dos circuitos FESS equivalentes. El primero reemplaza la conexión de la máquina por una fuente programable de corriente (Figura 3.2) mientras que el segundo reemplaza la conexión a la red por una fuente constante de voltaje continua (Figura 3.9).

### 3.2 Circuito de Conexión a la Red



**Figura 3.2 Circuito FESS reducido Conexión Red**

La conexión a la red permite:

- Sincronizarse a la frecuencia de la red
- Mantener el voltaje del puente DC constante
- Mantener un factor de potencia cercano a 1
- Mantener un nivel de armónicos adecuado
- Diseñar y ajustar el controlador sin considerar el control de la máquina

El circuito consta de seis dispositivos

- Red infinita Programable
- Transformador de Conexión
- Filtro
- Convertidor de potencia Red
- Condensador
- Fuente de Corriente Programable

A continuación se darán las características de cada uno de estos dispositivos.

### 3.2.1 Red infinita programable

Corresponde a una fuente de voltaje programable que permite variar la amplitud, la fase y la frecuencia de la onda generada.

Se eligió este tipo de Red de tal forma de ver el comportamiento bajo diversas condiciones de operación. Su amplitud es de 23kVrms con frecuencia fundamental de 50Hz.

### 3.2.2 Transformador de Conexión

Se utilizará un transformador 480/23kV en conexión delta-estrella respectivamente. El transformador se modela de forma lineal, es decir, sin tomar en cuenta la saturación del núcleo.

Se conecta en delta en la parte del inversor para filtrar las terceras armónicas de voltaje y sus múltiplos que se generan por la operación del inversor.

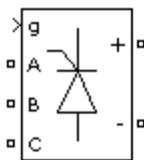
### 3.2.3 Filtro

Se diseña un filtro tipo LCL como se ve en el Anexo 1.

### 3.2.4 Convertidor de potencia Red

El convertidor de potencia se modela utilizando el bloque puente universal de la biblioteca de electrónica de potencia de SimpowerSystem.

Se modela mediante 6 interruptores controlados como se muestra en la Figura 3.3



**Figura 3.3 Puente Universal**

Se denomina puente universal dado que puede ser programado para distintos tipos de interruptores. A pesar de que en realidad se utilizan interruptores IGBT, para el objeto de modelar el sistema se ocuparon interruptores bidireccionales ideales. Esto debido a que la respuesta no cambia de manera significativa y acelera el tiempo de simulación.

Este dispositivo sólo tiene una entrada (Figura 3.3), se denomina vector “g” y corresponde a las señales de disparo de cada interruptor en el puente. Además posee 2 conexiones circuitales, la de voltaje trifásico A, B, C y directo (+)(-).

Las ecuaciones que controlan este tipo de dispositivo dependen del tipo de modulación a utilizar. Existen distintos tipos de modulación, cada una de ellas con sus ventajas y desventajas. En este caso se utilizará modulación sinusoidal PWM.

La modulación sinusoidal compara una señal triangular de alta frecuencia (recomendado que sea un múltiplo impar de la frecuencia fundamental) con una señal sinusoidal de frecuencia fundamental. Se dispara cada interruptor siguiendo un patrón generado en la comparación entre la amplitud de la señal sinusoidal y la triangular. El producto finalmente es un voltaje trifásico con gran cantidad de armónicos en donde la onda fundamental con el voltaje DC sigue la ecuación (3.1)

$$m_{SPWM} \frac{1}{2} V_{DC} = V_{3\phi} \quad (3.1)$$

Donde  $m_{SPWM}$  se denomina índice de modulación y representa la relación entre la amplitud entre la señal triangular con la sinusoidal de modulación. Según el valor de este índice, el convertidor de potencia puede operar en tres regiones: lineal, sobremodulada y región de onda cuadrada.

En este tipo de aplicaciones, se prefiere que los convertidores de potencia operen en región lineal puesto que el control se simplifica. Esto implica que el índice de modulación debe ser menor a 1. En esta aplicación se elige un índice de régimen permanente igual a 0,9 de forma de tener un margen de control por cualquier eventualidad que sea aplicada sobre el voltaje en la red AC o un bajo voltaje en la parte DC.

Se estudiaron distintos tipos de convertidores con el nivel de potencia y voltaje AC especificado. Los niveles de voltaje DC soportados no son mayores a 1kV. Esto se debe a que los interruptores IGBT de potencia soportan un máximo nivel de voltaje inverso.

La frecuencia de la señal triangular que permite generar los pulsos para el convertidor se recomienda que sea un múltiplo impar de 3 de la frecuencia fundamental. Una frecuencia muy alta permite un voltaje con un menor porcentaje de armónicos, con la desventaja de que aumentan las pérdidas por conmutación. Tampoco se puede usar una frecuencia muy alta para valores elevados de potencia puesto que la corriente se vuelve muy grande y los interruptores pierden su capacidad de corte de corriente.

Según la literatura, a la frecuencia para valores alrededor de los kilowatt de potencia se usan valores entre 1kHz y 10kHz para la frecuencia de la señal triangular, dependiendo de la eficiencia del inversor y del nivel de armónicos que se quiera tener.

En este caso se eligió  $f_{sw} = 50 \cdot 3 \cdot 27 = 4050\text{Hz}$ . Se considera que el valor calculado es adecuado para este tipo de aplicaciones.

### 3.2.5 Condensador

El puente DC consta de un simple condensador que permite filtrar las componentes armónicas de voltaje de alta frecuencia para obtener un voltaje relativamente constante. El diseño de este condensador depende de la magnitud del voltaje DC, de las variaciones de potencia, del nivel de ruido y del tiempo de atraso del lazo de control de voltaje.

Para estimar un nivel adecuado del voltaje DC se debe tener en cuenta que a mayor voltaje, menor cantidad de pérdidas por conducción en el puente, lo que no influye en esta simulación porque no se simulan las pérdidas. Lo que sí influye es que es posible llevar a mayor velocidad la máquina eléctrica mientras mayor sea este voltaje, por lo que uno de los objetivos críticos es diseñar este voltaje de forma adecuada para que coincida con el voltaje máximo de la máquina eléctrica.

En la parte anterior, se eligió un índice de modulación igual a 0,9, de esta forma el puente DC junto con el rectificador tienen la suficiente capacidad de respuesta frente a variaciones de un 10% en el voltaje DC del capacitor.

Teniendo esto presente y considerando que el voltaje de la máquina eléctrica será elegido en función de este valor, según ecuación (3.1) se elige el voltaje DC de la siguiente manera:

$$V_{DC} = \frac{2}{m_{SPWM}} V_{3\phi} = \frac{2}{0.9} \frac{480\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 870,9V$$

De manera de truncar hacia el mayor voltaje posible, se utiliza un voltaje DC final de 880V.

El valor del condensador se elige considerando:

- El máximo flujo de potencia en el puente DC,
- La máxima variación de voltaje DC
- El tiempo de retraso del lazo de control.

A una potencia fija, mientras mayor sea el condensador, menor variación de voltaje DC. Según diseño, se desea minimizar en lo posible el valor de este condensador, para minimizar los costos.

Según [22], el menor valor que debe tener el condensador se puede estimar de la siguiente forma:

$$C_{DC} \geq \frac{T_r \Delta P_{max}}{2V_{dc} \Delta V_{dc\_max}} \quad (3.2)$$

Siendo:

- $T_r$  Tiempo de retraso. Se puede estimar como la suma del tiempo de respuesta al escalón del control de corriente, retraso del filtro y retraso computacional del control.
- $\Delta P_{max}$  Flujo de potencia a través del puente.
- $V_{dc}$  Voltaje del puente.
- $\Delta V_{dc\_max}$  máxima variación de voltaje en el puente.

Si se estima que el tiempo de retraso no sobrepasa los 20mseg [28], entonces el menor valor del condensador se puede calcular como:

$$C_{DC} \geq \frac{20 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 880 \cdot 880 \cdot 0,1} = 12913,2 \mu F$$

Por lo anterior, se estima conveniente un condensador de 13000 $\mu F$ .

También se hicieron pruebas con condensadores de menor capacidad. Se estima que con un condensador de 1500 $\mu F$  también se puede lograr un control adecuado, todo depende de una adecuada selección de los parámetros del control y de la cantidad de armónicos admisibles en el voltaje DC.

### 3.2.6 Fuente de Corriente

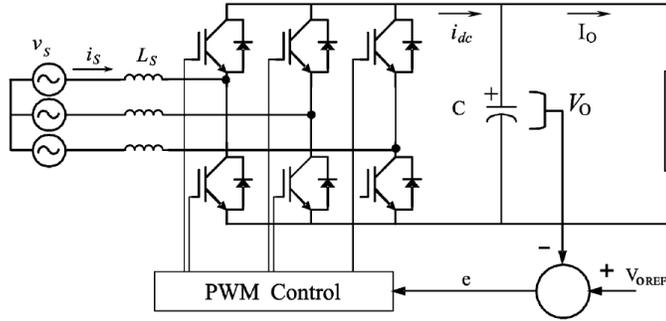
Corresponde a una fuente de corriente continua programable que permite modelar el circuito de la máquina de imanes permanentes como una fuente ideal.

### 3.2.7 Control

Existen numerosas formas de controlar este tipo de convertidor AC/DC. En [25] se dan tres tipos de control distintos dependiendo el tipo de variable controlada. En este trabajo se eligió el control en espacio vectorial por su fácil comprensión y diseño.

Parámetros que identifican este sistema de control (Figura 3.4):

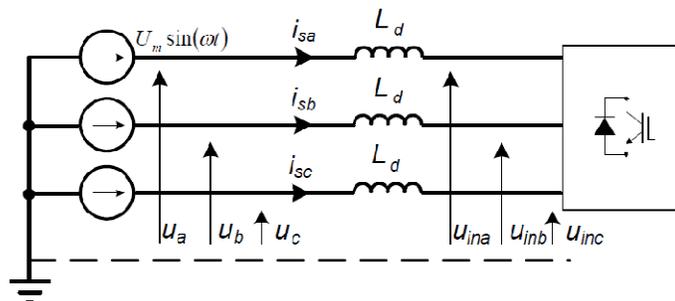
- Variable de control: Voltaje DC
- Variable manipulada: Voltaje trifásico AC (salida del VSI)
- Actuador: VSI



**Figura 3.4 lazo de control conexión red [25]**

El diagrama de la Figura 3.6 identifica a grandes rasgos el lazo de control. Se identifican dos controles en cascada. Uno externo que es un control de voltaje y el interno que es un control de corriente.

Ambos controles trabajan realizando los cálculos necesarios para obtener los pulsos que controlan el VSI. El control de corriente depende del control de voltaje, por lo que se le denomina esclavo, mientras que el control de voltaje se denomina maestro.



**Figura 3.5 circuito simplificado conexión red**

Para diseñar el control esclavo o de corriente, se supone que la corriente por los condensadores del filtro AC es despreciable [29]. El circuito queda como la Figura 3.5. Un análisis circuital de este diagrama permite establecer la ecuación (3.3).

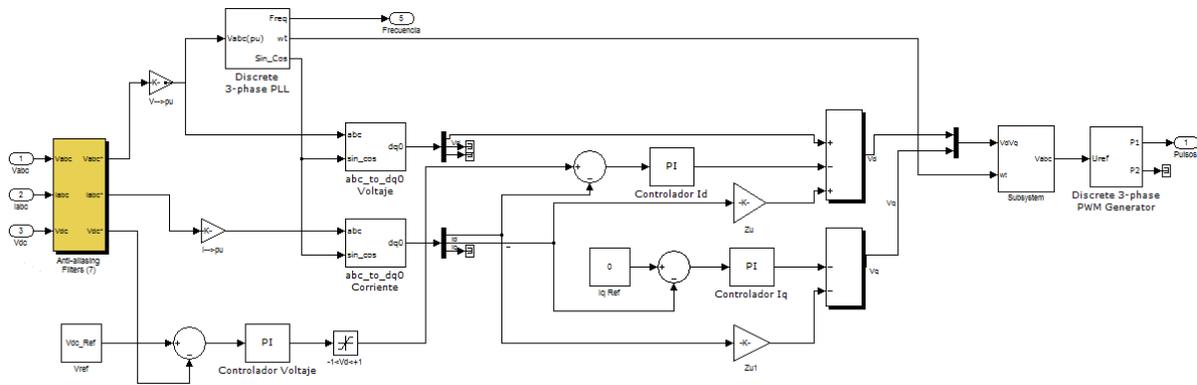
$$[u]_{abc} = L \frac{d[i_s]_{abc}}{dt} + [u]_{in\_abc} \quad (3.3)$$

Si se aplica la transformada de Clark a la ecuación anterior, tomando en cuenta un sistema solidario a la red alterna y cambiando al dominio de Laplace se puede obtener las ecuaciones en eje directo y en cuadratura para encontrar el voltaje en el inversor para una corriente por la inductancia y un voltaje de red.

$$u_{in\_d} = u_d - sLi_d + \omega Li_q \quad (3.4)$$

$$u_{in\_q} = u_q - sLi_q - \omega Li_d \quad (3.5)$$

Tomando en cuenta las ecuaciones (3.4) y (3.5) se puede diseñar un lazo de control que calcule el voltaje trifásico necesario en los inversores para obtener una corriente que permita controlar el voltaje DC.



**Figura 3.6 Lazo control voltaje DC**

Nótese que si el sistema de referencia es la red alterna se puede elegir un sistema perfectamente solidario con ésta (fase cero), resultando el voltaje de eje en cuadratura igual a cero. Otra consecuencia es que la corriente en cuadratura refleja si la potencia reactiva se está inyectando o consumiendo en el lado de la red, mientras que la corriente en eje directo refleja el comportamiento de la potencia activa.

La corriente en eje directo se utiliza para mantener el voltaje DC constante, puesto que esta corriente representa la potencia activa fluyendo desde la red hacia el condensador. Si se quiere subir el voltaje DC, entonces se debe inyectar corriente en eje directo y si se quiere bajar se debe extraer esta corriente desde la parte DC.

Lo anterior se realiza con el control de voltaje maestro que permite dar una referencia de corriente en eje directo al lazo de control de corriente.

La corriente en cuadratura a su vez se trata de mantener siempre en cero, para mantener un factor de potencia igual a uno.

Existe un “acople” de ejes en eje directo y en eje en cuadratura. Esto quiere decir que al variar la corriente de un eje, afecta el voltaje y la corriente del eje perpendicular. Un lazo de control bien construido, debe tener esto presente realizando los ajustes necesarios para desacoplar ambas componentes, es decir, cuando se varíe la corriente en un eje no varíe la corriente del otro.

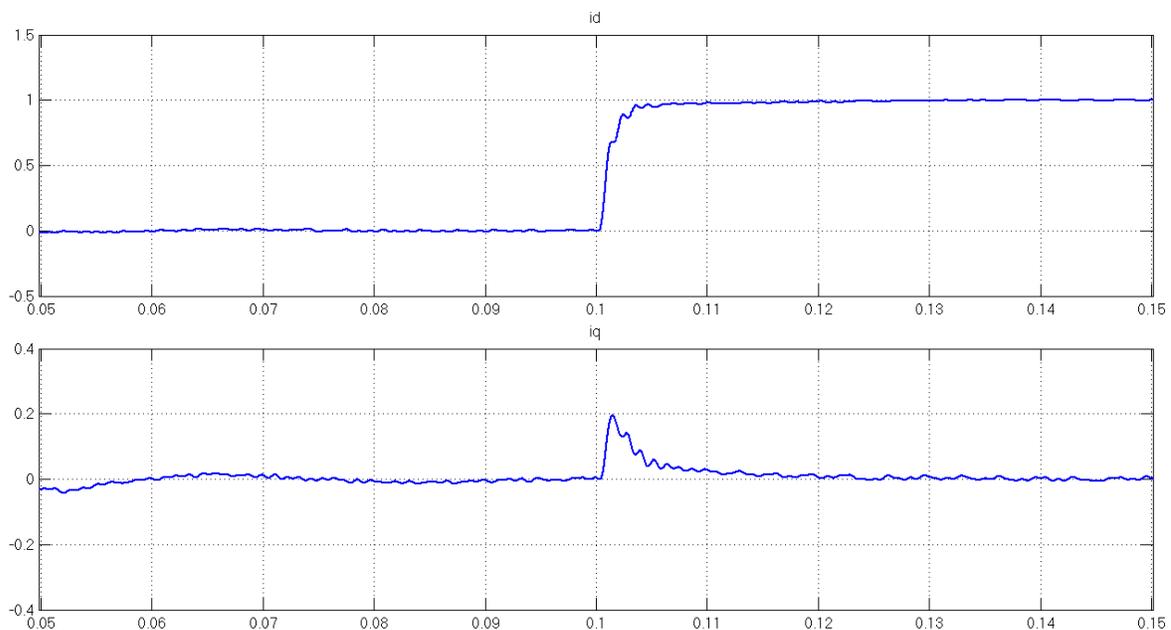
El desacople se realiza como se ve en la Figura 3.6, donde la corriente de un eje se multiplica por la impedancia del filtro y se le suma o resta al voltaje que genera el lazo de la corriente del otro eje (ecuaciones (3.4) y (3.5)). Esto permite variar una corriente sin perturbar a la segunda.

### 3.2.8 Ajuste de controladores

Según referencia [28], el control de corriente se ajusta para tener una respuesta al escalón de corriente cercana a los 20mseg. El control de voltaje se ajusta para obtener una buena respuesta de voltaje en el condensador frente a estas variaciones de corriente.

Para lograr lo anterior, primero se elimina el control de voltaje y se reemplaza por un escalón de corriente, luego se modifica el circuito principal para tener un voltaje estable en la parte DC (se reemplaza el condensador por una fuente de voltaje DC fija de 880V).

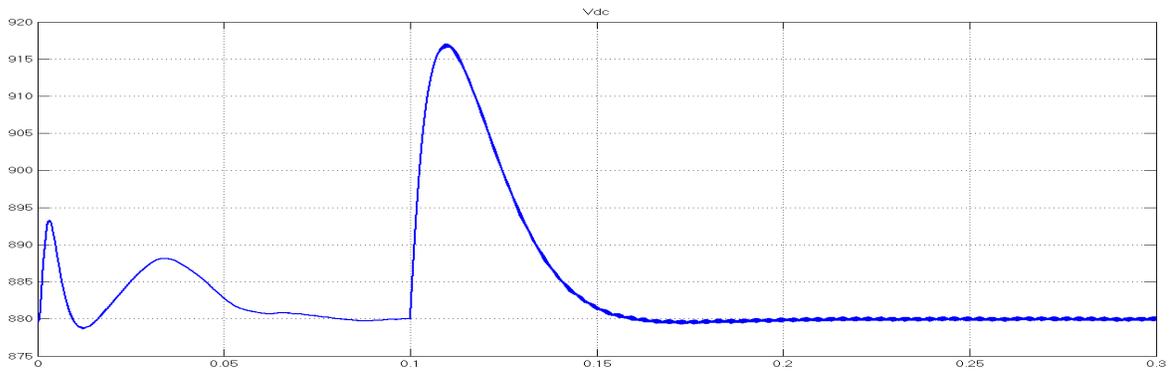
El ajuste se realiza mediante prueba y error. Mediante la variación de los dos controles PI que posee el lazo de corriente se puede obtener una respuesta satisfactoria. No es parte de este trabajo obtener los parámetros de control más eficientes del sistema. La respuesta de la corriente frente al escalón se puede ver en la Figura 3.7.



**Figura 3.7 Respuesta de  $i_d$  e  $i_q$  frente a escalón  $i_d$**

Para lograr el ajuste del control de voltaje, se vuelve al circuito principal (se reemplaza la fuente de voltaje por un condensador más fuente de corriente) y se conecta la salida del control de voltaje como referencia de corriente de eje directo.

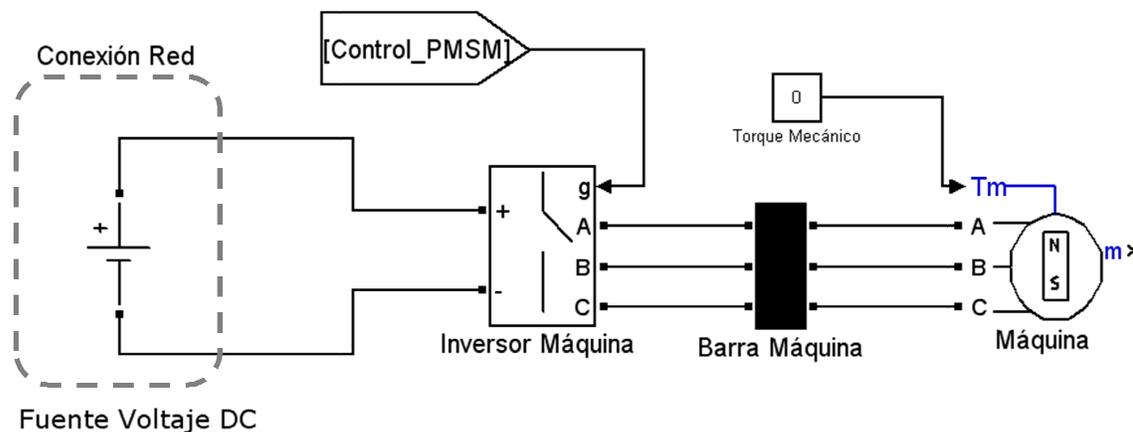
La respuesta del voltaje continuo se estabiliza alrededor de los 70mseg, como se puede apreciar en la Figura 3.8



**Figura 3.8 Respuesta Voltaje DC frente al escalón Id**

La perturbación inicial entre 0 y 0,1 segundos pertenece a las condiciones iniciales del circuito, pero se estabiliza alrededor de los 0,1 segundos donde se aplica la perturbación de corriente.

### 3.3 Circuito de la Máquina Síncrona



**Figura 3.9 Circuito FESS reducido Máquina Síncrona**

El circuito de la máquina permite:

- Controlar la potencia activa de la máquina
- Mantener a la máquina en valores de operación adecuados
- Diseñar y ajustar el controlador sin preocuparse del control del voltaje DC

El circuito consta de tres dispositivos:

- Fuente de voltaje DC
- Convertidor Máquina
- Máquina Eléctrica

A continuación se explicarán los detalles de cada una.

### 3.3.1 Fuente de Voltaje DC

La fuente de voltaje DC permite modelar de forma simple la conexión a la red. Es fija de 880V.

### 3.3.2 Inversor Máquina

Se utiliza exactamente el mismo inversor del circuito que conecta a la red, pero en esta ocasión se decidió utilizar la modulación vectorial (con el objetivo de presentar las dos formas de modulación que más se ocupan).

La modulación vectorial genera un voltaje trifásico en promedio igual a una referencia dada. Esto se realiza en cada tiempo de muestreo mediante la selección adecuada de los estados de los interruptores en un periodo de tiempo adecuado. [17]

Cualquier sistema trifásico estático que sume cero puede ser representado en un vector con parte real e imaginaria  $[V_c]_{\alpha\beta} = [v_{c\alpha}; v_{c\beta}]$  como

$$v_{c\alpha} = \frac{2}{3}(v_{ca} - 0.5(v_{cb} - v_{cc})) \quad (3.6)$$

$$v_{c\beta} = \frac{\sqrt{3}}{3}(v_{cb} - v_{cc}) \quad (3.7)$$

Si además el sistema trifásico con amplitud  $v_c$  oscila a frecuencia  $\omega$ , entonces  $[V_c]_{\alpha\beta}$  se convierte en un vector de amplitud constante igual a  $v_c$  que rota a frecuencia angular  $\omega$  en el plano  $\alpha, \beta$ .

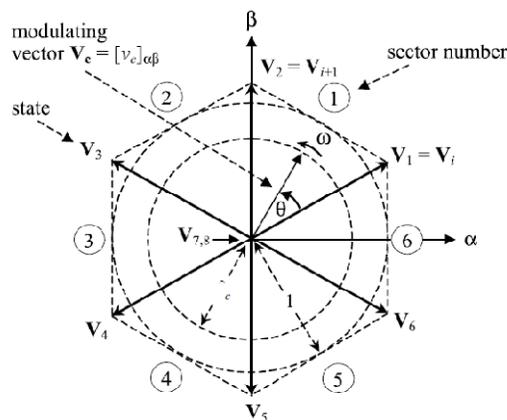


Figura 3.10 Diagrama de Espacio Vectorial [17]

El VSI tiene 8 estados de conmutación (Tabla 2.5) que definen 6 sectores en el plano  $\alpha, \beta$  (Figura 3.10). La modulación vectorial aproxima el voltaje trifásico de salida del VSI con sus ocho posibles estados en cada tiempo de muestreo.

Similar al caso de modulación sinusoidal, para minimizar armónicos indeseados la frecuencia de muestreo se recomienda que sea un múltiplo entero de 6 con respecto a la fundamental, dado que se tienen 6 posibles sectores.

Se tiene que la relación con el voltaje trifásico y el voltaje DC es:

$$m_{SVPWM} \frac{1}{\sqrt{3}} V_{DC} = V_{3\phi} \quad (3.8)$$

También se cumple que el índice de modulación máximo para operar en forma lineal es 1.

### 3.3.3 Máquina eléctrica

Se usará una máquina de imanes permanentes con flujo radial (PMSM convencional). Se pueden distinguir dos tipos de máquinas según la disposición de los imanes en el rotor, las de tipo interior y las de tipo superficial.

Las máquinas de imanes interiores poseen éstos instalados dentro del rotor, mientras que las superficiales los poseen adosados a la superficie. Las de tipo interior soportan velocidades mayores, poseen torque de reluctancia y son más difíciles de construir.

Para el rango de velocidad considerada en este trabajo y debido a que la máquina de imanes superficiales tiene una estrategia de control más simple, se estima conveniente utilizar este tipo de máquina.

En el marco de referencia rotatorio con velocidad angular constante igual a la del rotor, la máquina de imanes permanentes se puede modelar con las siguientes ecuaciones:

$$v_d = r_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - w_e L_q i_q \quad (3.9)$$

$$v_q = r_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} - w_e (L_d i_d + \varphi_f) \quad (3.10)$$

$$T_e = J \frac{dw_r}{dt} + F w_r + T_M \quad (3.11)$$

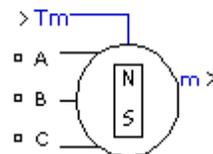
$$T_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\varphi_f \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q) \quad (3.12)$$

$$w_e = p \cdot w_r \quad (3.13)$$

Donde:

- $p$  Número de pares de polos.
- $\varphi_f$  Flujo permanente.
- $v_d$  Voltaje en eje directo.
- $v_q$  Voltaje en eje en cuadratura.
- $i_d$  Corriente en eje directo o de flujo.
- $i_q$  Corriente en eje en cuadratura o de torque.
- $r_s$  Resistencia de los enrollados.
- $L_d$  Inductancia de eje directo (constante).
- $L_q$  Inductancia de eje en cuadratura (constante).
- $w_e$  Frecuencia eléctrica de la máquina.
- $w_r$  Velocidad del rotor de la máquina.
- $J$  Coeficiente de inercia del conjunto rotor-volante de inercia.
- $F$  Coeficiente de fricción.
- $T_e$  Torque eléctrico.
- $T_M$  Torque mecánico.

Usando los bloques de SimpowerSystem, la máquina se obtiene de forma simple.



**Figura 3.11 Generador Síncrono de imanes permanentes**

Este bloque tiene como entrada el torque mecánico y los puntos de conexión a la red trifásica. Como salida posee un vector denominado “m” con distintas variables de la máquina.

En este caso se utilizan los siguientes parámetros, considerando que es una máquina de imanes superficiales:

- $R_s = 0.005 \Omega$
- $L_d = 0.001 H$
- $L_q = 0.001 H$
- $\varphi_f = 0.4851 wb$
- $p = 2$
- $J = 512 kg \cdot m^2$
- $F = 0 N \cdot m \cdot s/rad$
- $T_M = 0 N \cdot m$

Estos parámetros se eligieron en base a los valores que se encuentra en las distintas referencias, mientras que el coeficiente de inercia fue calculado mediante ecuaciones (3.11) y (3.12) de tal manera que el volante de inercia pudiera almacenar 25kWh de energía a 100kW, lo que se traduce en un almacenamiento de 15 minutos. Resultando un valor de constante de inercia igual a  $J = 512 kg \cdot m^2$ .

Este valor de inercia resulta bastante mayor que los valores de inercia que tienen los HFESS comerciales estudiados. Esto debido a que los HFESS comerciales tienen una velocidad más alta y un mayor rango de operación.

La cantidad de polos de estas máquinas normalmente no supera los 4 pares. Esto es debido a que una mayor cantidad de polos en una máquina diseñada para alcanzar elevadas velocidades de rotación elevaría también proporcionalmente la frecuencia eléctrica. En los inversores actuales para niveles de potencia bajos esto no es un problema, pero para niveles de potencia elevados a frecuencia elevadas la capacidad de corte de corriente de los inversores se ve afectada.

El torque mecánico es nulo debido a que no se aplican fuerzas externas al volante de inercia además del roce por los rodamientos y el aire. El coeficiente de roce también se estima cero debido a que el sistema opera en vacío, en un pivote y con rodamiento magnético.

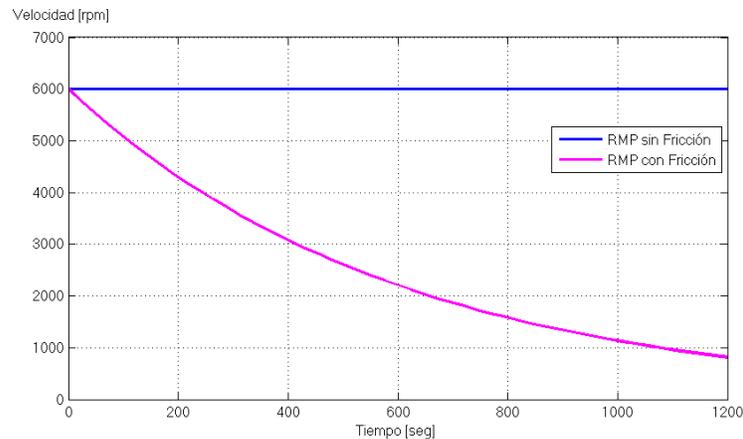
### **3.3.4 Pérdidas y Efecto del coeficiente de Fricción**

Las pérdidas de energía intrínsecas que tienen los FESS corresponden a:

- Pérdida de energía eléctrica en los inversores.
- Pérdida de energía eléctrica en el puente DC.
- Pérdida de energía eléctrica en la máquina eléctrica.
- Pérdida de energía eléctrica en el filtro.

- Pérdida de energía eléctrica en el Transformador de conexión a la red.
- Pérdida de energía mecánica en el volante de inercia (fricción del aire y rodamientos).

La pérdida de energía mecánica debido a fricción (rodamientos y por roce con el aire) es una de las más importantes, puesto que determina la cantidad de tiempo que se puede mantener la energía almacenada.



**Figura 3.12 Variación de la Velocidad con Fricción**

En la Figura 3.12 se grafica la velocidad de un FESS con un coeficiente de inercia de  $J = 60kg \cdot m^2$  durante 20 minutos en reposo (no se extrae ni se inyecta potencia activa) bajo dos condiciones, fricción nula y coeficiente de fricción igual a 0,1Nms/rad (valor referencial sólo demostrativo).

La pérdida de energía debido a la fricción es de 3229.6W/h, representando el 98.1% de la energía inicial. Nótese que la eficiencia de los FESS reales disminuye con el tiempo dependiendo de la cantidad de fricción que éstos posean.

Para dar un ejemplo real, un FESS con un ciclo de carga y descarga inmediato puede tener una eficiencia de un 85%, pero un ciclo de carga y descarga que tiene un intervalo de tiempo de 24 horas, puede tener una eficiencia por debajo del 50% [40].

Los sistemas avanzados de FESS que se están desarrollando y que pretende modelar este trabajo pierden alrededor del 5% de su energía en 10 horas, gracias a la aplicación de giro en vacío y uso de rodamientos magnéticos [30]. Es por lo anterior que para efectos de las simulaciones realizadas se supone un coeficiente de fricción igual a cero, simulando intervalos de tiempo menores al segundo

### 3.3.5 Control de la Máquina

Las características del control son las siguientes:

- Variable de control: Potencia Activa.
- Variable manipulada: Voltaje trifásico AC (salida del VSI o voltaje en bornes de máquina).
- Actuador: VSI.

Este control es totalmente distinto al circuito de conexión a la red anterior. Nótese que el VSI se conecta a la máquina de imanes permanentes (Figura 3.9), por lo que ahora éste debe generar un voltaje trifásico de frecuencia y magnitud variable para poder manejar la potencia activa de salida.

Controlar la máquina se trata fundamentalmente de controlar la aceleración del rotor en el tiempo. Si se quiere absorber potencia activa, entonces el control debe acelerar la máquina, mientras que si se quiere liberar potencia activa el control debe desacelerarla. Si no existe aceleración entonces no existe movimiento de potencia activa y el FESS se encuentra en reposo.

Para lograr lo anterior, hay que conocer el tipo de máquina que se está ocupando y conocer cómo opera, de tal forma de lograr el control más eficiente posible. La eficiencia del control tiene que ver con la relación Torque-Corriente. Para una misma corriente de estator, se espera el máximo de torque eléctrico de manera de obtener la mayor aceleración posible.

En una máquina de imanes interiores, la inductancia de eje directo y eje en cuadratura ( $L_d, L_q$ ) no son iguales lo que resulta en que el torque es función de la corriente en cuadratura y también de la corriente de eje directo (ecuación (3.12)). Para obtener la máxima eficiencia se deben derivar las relaciones entre  $i_d$  e  $i_q$  que permiten el máximo torque eléctrico con la menor amplitud de corriente, obteniendo complejas relaciones matemáticas entre torque-corriente.

En una máquina de imanes superficiales se cumple que  $L_d = L_q$ , luego  $i_d$  no aplica torque eléctrico a la máquina y por lo tanto no tiene relación con la potencia activa.

Lo explicado anteriormente es la base del control. Sólo resta generar el lazo de control y además tener presente los límites de operación.

#### 3.3.5.1 Teoría y Región de operación

La magnitud del voltaje se puede obtener mediante las ecuaciones (3.9) y (3.10). Si se desprecia el efecto de la resistencia de los enrollados, el voltaje depende del cambio de corriente en su eje y la multiplicación entre la frecuencia eléctrica de la máquina con la corriente en el eje.

A mayor corriente y/o frecuencia eléctrica (o velocidad de rotación), mayor el voltaje. Existe un límite máximo de velocidad de rotación que es cuando la frecuencia eléctrica eleva el voltaje de bornes de la máquina al valor del voltaje máximo de operación del convertidor de potencia (ecuación (3.8)). A esta velocidad se la denomina “velocidad base”.

Si la velocidad se eleva por sobre la velocidad base, el convertidor pierde capacidad para controlar la magnitud de voltaje y el sistema se vuelve inestable. Existen sistemas de control que toman en cuenta esta característica y logran controlar la máquina en este estado, pero este tipo de operación no se trabajará en esta memoria.

La velocidad base es relativamente fácil de encontrar. Si suponemos que las corrientes son cero y no existe variación de estas en el tiempo, los voltajes en los bornes de la máquina resultan  $v_d = 0$  y  $v_q = -w_e \cdot \varphi_f$ . El máximo de velocidad se puede encontrar cuando este voltaje se iguala al máximo voltaje permitido por el inversor.

$$p \cdot w_{r\_base} \cdot \varphi_f = \frac{1}{\sqrt{3}} V_{DC\_max} \quad (3.14)$$

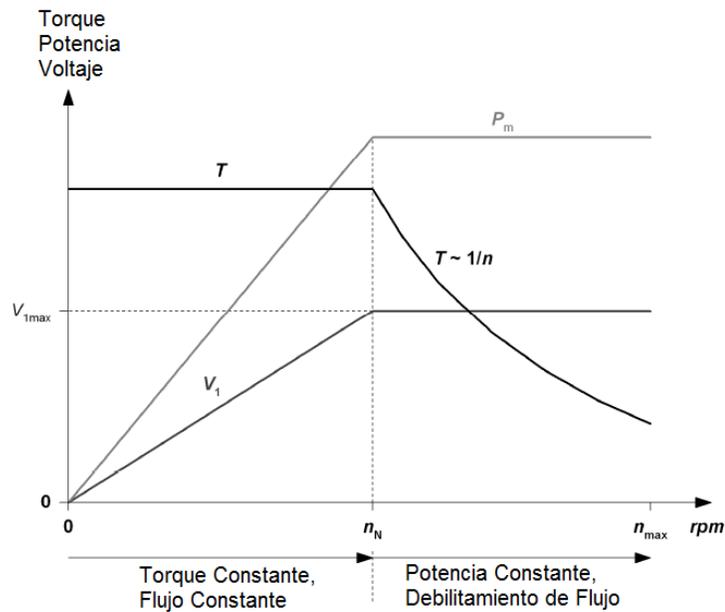
La modulación vectorial es preferida por sobre la sinusoidal, no sólo porque tiene una menor cantidad de armónicos, sino porque también puede llegar a una amplitud de la onda fundamental de voltaje mayor que la modulación sinusoidal para el mismo coeficiente de modulación.

La estrategia de operación más eficiente para máquinas de imanes superficiales en velocidades menores a la base es con corriente en eje directo igual a cero, dado que se tiene la mayor relación Torque-Corriente. Si se quiere acelerar la máquina, se inyecta corriente en cuadratura  $i_q$ , lo que aplica torque eléctrico y acelera o desacelera la máquina. Esta estrategia de operación se llama de “Torque Constante” o “Flujo Constante”.

Cuando el objetivo es almacenar energía y además se tiene que la máquina está diseñada para operar a mayor velocidad que la base, entonces la estrategia más adecuada es tratar de obtener la mayor velocidad posible de tal forma de poder almacenar la mayor cantidad de energía.

Para realizar lo anterior, se debe tener en cuenta que es posible operar por sobre la velocidad base con otra estrategia de control denominada de “Potencia constante” o de “Debilitamiento de flujo”. El objetivo aquí es inyectar una corriente en eje directo negativa de tal manera que el flujo total en ese eje disminuya (flujo de imán permanente más el flujo creado por  $i_d$ , ecuación (3.10)) y así se disminuye el voltaje en ese eje, disminuyendo la magnitud total del voltaje y pudiendo entonces alcanzar mayores velocidades.

La elección de cuánta corriente de eje directo inyectar depende de la estrategia de control que se quiera. Lo ideal en este caso sería inyectar una cantidad suficiente tal que al aumentar la velocidad por sobre la velocidad base se llegue siempre al límite de voltaje del convertidor (es decir con voltaje constante igual al máximo), pero existen otras estrategias que valoran otros tipos de operación, por ejemplo operar con potencia nominal máxima o corriente nominal máxima.



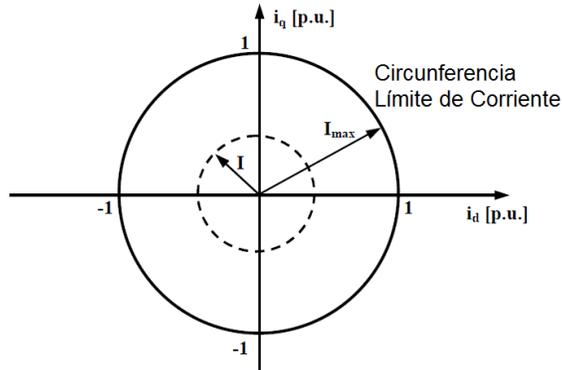
**Figura 3.13 Características de Torque, Potencia y Voltaje vs Velocidad**

El diagrama de operación de un PMSM con respecto a la velocidad se puede resumir en la Figura 3.13. Bajo la velocidad base, en torque constante, se trata de mantener una referencia de corriente en cuadratura constante igual a la nominal para obtener la mayor aceleración posible. Al mantener la corriente constante, se incrementa la velocidad de la máquina y por consiguiente la frecuencia eléctrica. Al aumentar la frecuencia eléctrica manteniendo la corriente constante, aumenta la potencia activa de salida de la máquina de forma proporcional.

Por sobre la velocidad base, lo que se trata de realizar es inyectar progresivamente menor  $i_q$  y mayor  $i_d$  con el objetivo de mantener la magnitud de la corriente igual a la nominal. Mientras mayor la magnitud de  $i_d$  inyectada, menor debe ser la corriente  $i_q$  y por lo tanto menor el torque eléctrico de la máquina. Se aumenta la velocidad y se disminuye la corriente de tal forma que la potencia activa de la máquina se mantiene constante, y es por este motivo que se denomina de "potencia constante".

Además del límite de voltaje, la máquina también tiene un límite de corriente dado por su corriente nominal.

Ambos límites, tanto de voltaje como de corriente, se pueden graficar en el espacio  $i_d - i_q$  que ayuda a determinar la región de operación de la máquina.



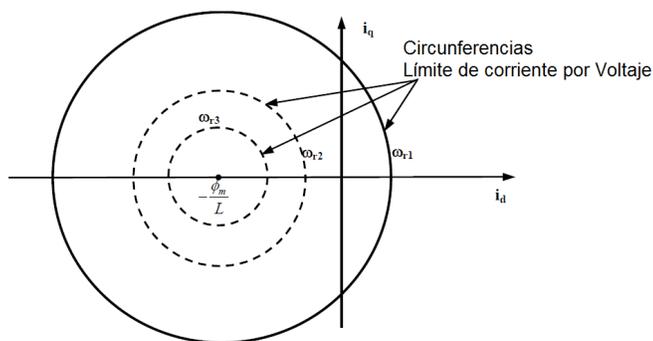
**Figura 3.14 Límite de corriente [39]**

En la Figura 3.14 se grafica el límite de corriente de la máquina. Representa una circunferencia centrada en el origen y con un radio de magnitud igual a la máxima corriente permitida por la máquina.

El límite de voltaje se determina con las ecuaciones (3.9) y (3.10) suponiendo régimen permanente y despreciando la resistencia de los enrollados.

$$\begin{aligned}
 v_{d\_perm} &= w_e L_q i_q \\
 v_{q\_perm} &= -w_e (L_d i_d + \varphi_f) \\
 |v_{pmsm}|^2 &= v_{d\_perm}^2 + v_{q\_perm}^2 = w_e^2 L_q^2 i_q^2 + w_e^2 (L_d i_d + \varphi_f)^2 \\
 \left| \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot V_{DC\_max} \right|^2 &= (w_e L_q i_q)^2 + w_e^2 (L_d i_d + \varphi_f)^2 \\
 \left| \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{V_{DC\_max}}{w_e \cdot L} \right|^2 &= i_q^2 + \left( i_d + \frac{\varphi_f}{L} \right)^2
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

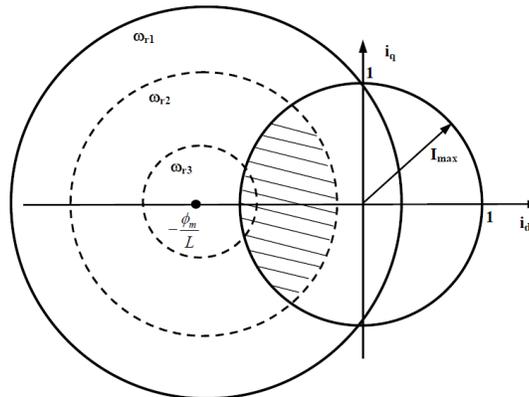
La expresión (3.15) establece una circunferencia centrada en  $\left(-\frac{\varphi_f}{L}, 0\right)$  con radio igual a  $\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{V_{DC\_max}}{w_e \cdot L}$  en el espacio  $i_d - i_q$ , como se muestra en la Figura 3.15.



**Figura 3.15 Límite de corriente por voltaje y su variación con respecto a  $W_e$  [39]**

Nótese que el límite de corriente que se establece por voltaje no es estático con respecto a la velocidad. A mayor velocidad, menor es el radio de la circunferencia y menor es la región donde las corrientes pueden operar. En la Figura 3.16 se grafican las circunferencias a velocidades  $\omega_{r1} < \omega_{r2} < \omega_{r3}$ .

Juntando ambos límites de corrientes, se obtiene la región de operación de la máquina. En la Figura 3.16 corresponde a la zona achurada.

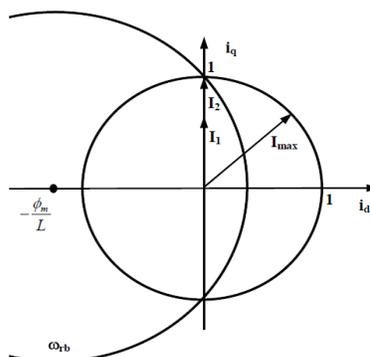


**Figura 3.16 Región de operación [39]**

Operando bajo la estrategia de torque constante  $i_d = 0$  y la corriente  $i_q$  se mueve en su eje hasta llegar al límite de corriente máximo (Figura 3.17). Esto también establece un criterio de diseño óptimo, que es cuando ambas circunferencias operando a velocidad base se intersectan en el eje  $i_q$ .

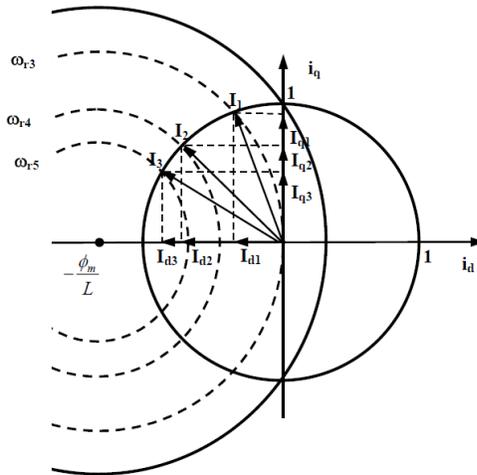
Si se diseña la máquina con un límite de corriente mayor al límite establecido por voltaje, cuando la máquina llegue a la velocidad base la corriente máxima no podrá ser alcanzada dado que la máquina alcanza una velocidad tal que el voltaje generado no puede ser aumentado por el límite de voltaje del convertidor de potencia.

Si se diseña la máquina con una corriente nominal inferior, la aceleración de la máquina al llegar a la velocidad base es menor de la que el convertidor permite.



**Figura 3.17 Región de operación con Torque Constante [39]**

Operando bajo la estrategia de potencia constante, la velocidad se lleva por sobre la velocidad base. Una operación óptima es inyectar  $i_d$  de forma de que el vector de corriente siga a la intersección de ambas circunferencias, de esta manera se asegura la menor inyección de corriente para el mismo torque. En la Figura 3.18 se ve un ejemplo de la trayectoria del vector de corriente en operación con corriente nominal.



**Figura 3.18 Operación bajo Corriente Nominal [39]**

Al aumentar la corriente  $i_d$  se varía la potencia reactiva de la máquina de forma de poder mantener el voltaje en valores adecuados. Al aumentar la magnitud de  $i_d$  no se pierde potencia activa en el sentido de torque, pero sí aumentan las pérdidas debido a la resistencia de la línea y la conmutación del inversor.

Teóricamente, si el centro de la circunferencia determinada por el límite de voltaje  $(-\frac{\phi_f}{L}, 0)$  se encuentra dentro de la circunferencia por límite máximo de corriente, no existe límite de velocidad máxima. Lo anterior no es cierto puesto que la máquina y el volante de inercia poseen un límite de velocidad en la cual se puede generar el torque nominal y también hay que tener en cuenta tanto los límites eléctricos de corriente y frecuencia de operación del inversor y de la máquina como los límites físicos de todos los materiales rotatorios (rotor de la máquina y volante de inercia).

### 3.3.5.2 Rango de velocidad y referencias de corriente

Se debe tomar la decisión si se quiere operar en todo el rango de velocidad o si es que sólo se quiere operar con una de las estrategias de control. Como la variable de control en este caso es la potencia, la operación bajo torque constante se distorsiona, debido a que se pueden necesitar valores de potencia elevados a bajas velocidades, lo que implica una corriente de estator elevada (incluso puede que se requiera una mayor corriente que la nominal).

La elección en donde operar depende entonces de las máximas sollicitaciones de corriente, voltaje y frecuencia tanto de la máquina como del convertidor de potencia.

Si la máquina está diseñada para bajos niveles de corriente, entonces podría ser obligatorio operar solamente en región de potencia constante, mientras que si está diseñada para magnitudes mayores, es posible operar bajo la velocidad base a potencias elevadas.

Como en este trabajo no se pudo obtener los valores máximos de corriente de la máquina, se supondrá que el límite máximo de corriente está dado por el convertidor de potencia. Estos dispositivos comerciales de 100kW, como el que se debería ocupar en este caso, tienen como corriente máxima que varía entre 250A- 350A, por lo que se supondrá que la corriente máxima será de 350A.

El voltaje máximo de operación de la máquina será el voltaje máximo permitido por el inversor, que de la relación (3.8) suponiendo el máximo coeficiente de modulación resulta 508V.

La corriente máxima acota el rango de velocidad en que operar la máquina. El rango de velocidad se puede obtener de las siguientes relaciones:

$$w_{min} = \frac{P_{max}}{T_{e_{max}}} = \frac{P_{max}}{\frac{3}{2} \cdot p \cdot \varphi \cdot i_{q_{max}}} \quad (3.16)$$

$$I_{max} = \sqrt{[i_d]_{w_{max}}^2 + [i_q]_{w_{max}}^2} \quad (3.17)$$

La velocidad mínima calculada a partir de (3.16) para una corriente de 300A resulta ser alrededor de 2000rpm. Bajo este criterio, la velocidad mínima no puede llegar a ser cero puesto que la corriente es demasiado alta, pero puede llegar a valores muy pequeños si es que la corriente soportada es grande. También se puede establecer un criterio de reserva de energía si es que se desea, que normalmente es de 10% de la energía total del FESS [7].

La velocidad máxima puede elegirse mediante  $I_{max}$ , pero es complicado puesto que depende de cómo se inyecta  $i_d$  y eso depende de la estrategia de control. En este trabajo se supondrá que la velocidad máxima está limitada por la frecuencia de conmutación del convertidor de potencia.

La frecuencia de conmutación de los convertidores electrónicos en este rango de potencia, pueden llegar a los 10kHz. A esa frecuencia los tiempos de simulación se incrementan notablemente, por lo que arbitrariamente se elige un límite de frecuencia eléctrica que estará optimizado para que la velocidad máxima de rotación de la máquina sea 6000rpm.

Tomando en cuenta lo anterior, la frecuencia eléctrica de conmutación se calcula como sigue:

$$F_{sw\_vector} = 6000/60 \cdot 2 \cdot 6 \cdot 3 \quad (3.18)$$

Esto implica que la frecuencia eléctrica al lado de la máquina no debe ser mayor a los 3600Hz, pero no es una condición estricta dado que el inversor puede funcionar a mayor frecuencia eléctrica, incrementándose el contenido armónico. Elevar la frecuencia eléctrica a mayores valores no es una operación recomendada según se expone en la sección 3.3.2 por el elevado contenido armónico que se comenzará a generar.

La velocidad base, según la ecuación (3.14), con los valores obtenidos resulta ser 5000rpm, por lo que se realizará un control tanto por torque constante y potencia constante.

Para valores menores a la velocidad base, lo óptimo es operar con  $i_{d\_ref} = 0$ , por lo que se operará de esa manera. Para valores superiores a la velocidad base, la corriente de referencia inyectada será la menor posible para operar alrededor del máximo voltaje de operación en vacío. Esto se logra con la siguiente referencia de corriente directo [31]:

$$i_{d\_ref} = -\frac{1}{L} \left( \Phi_m - \frac{V_{max}}{p \cdot \omega_r} \right) \quad (3.19)$$

Si se inyecta además corriente en cuadratura, también se debe compensar por este factor. En este caso se utilizará un valor de 60A que basta para mantener el voltaje dentro de los límites permitidos en el rango de velocidad considerado.

Una característica del circuito modelado de esta manera, es que se puede notar que la onda de voltaje y corriente tienen una gran cantidad de armónicos debido al convertidor de potencia.

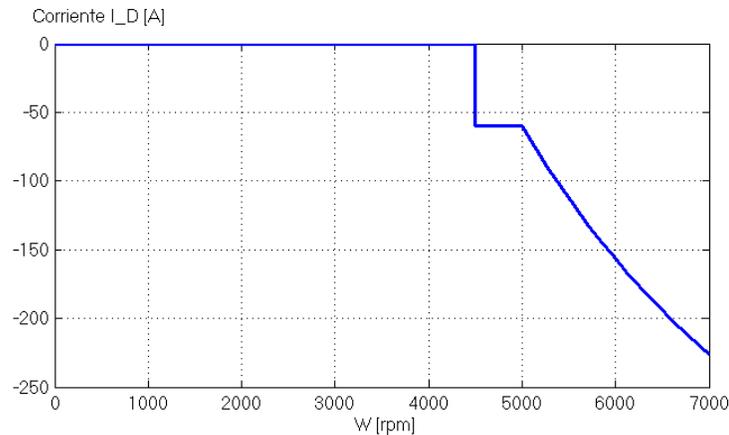
Para que el sistema sea estable y tenga una correcta operación en todo el rango de velocidad, se considera la siguiente estrategia de operación de la corriente en eje directo:

$$\begin{array}{ll} \omega_r \leq 4500rpm & i_{d\_ref} = 0A \\ 4500rpm < \omega_r \leq 5000rpm & i_{d\_ref} = -60A \\ 5000rpm < \omega_r & i_{d\_ref} = -\frac{1}{L} \left( \Phi_m - \frac{V_{max}}{p \cdot \omega_r} \right) - 60 A \end{array} \quad (3.20)$$

Bajo 4500rpm se opera bajo  $i_{d\_ref} = 0$ , pero al llegar a 4500rpm, se inyecta de forma brusca 60A para compensar el voltaje con  $i_q \neq 0$ . Esta inyección se eligió de manera empírica mediante las diversas simulaciones tomando en cuenta la reducción del voltaje debido a la inyección de corriente en eje directo. Lo anterior debido a que se probó con distintos tipos de inyección de  $i_d$  que se pudo encontrar en la literatura, pero no se logró una estabilidad adecuada.

Otra forma de inyectar la corriente  $i_d$  para realizar la compensación del voltaje con carga es de forma lineal mucho antes de llegar la velocidad base y no en escalón como se realizó en este trabajo. Se estima que esta forma es más conveniente porque implica una menor perturbación a la máquina.

Al llegar a la velocidad base, se agrega el término faltante para obtener la operación deseada. El resumen de la referencia de eje en cuadratura con respecto a la velocidad de la máquina se puede ver en la Figura 3.19.



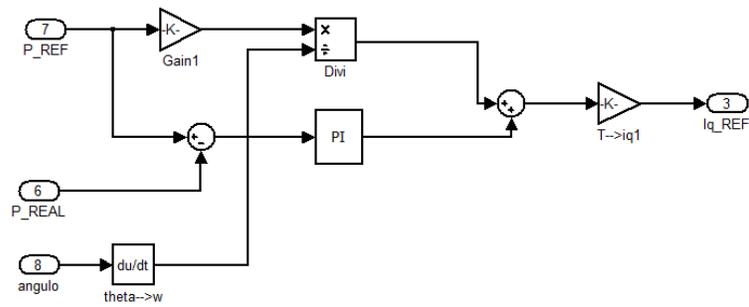
**Figura 3.19 Referencia  $I_d$**

### 3.3.5.3 Lazo de control

El lazo de control consta de dos controladores PI esclavos para la corriente y un controlador PI maestro para la referencia de potencia.

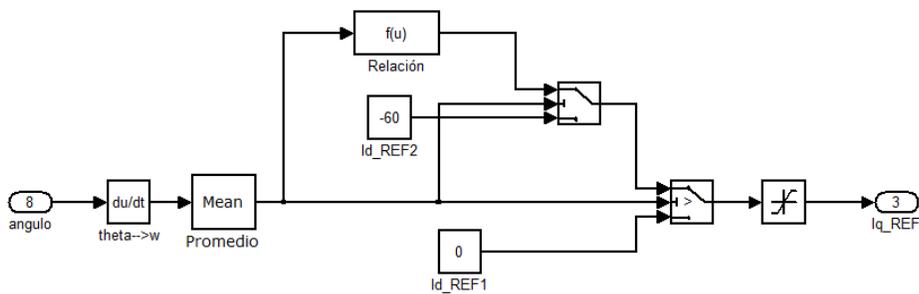
Se obtiene la posición angular del rotor de la máquina de forma directa, por lo que no será necesario estimarlo.

Se estima la velocidad de la máquina derivando la posición angular del rotor. Se divide la potencia de referencia con la velocidad y esto, sumado a la salida del control PI, da la referencia de torque que se aplica a la máquina. La referencia de torque a su vez se puede transformar mediante la ecuación (3.12) a la referencia de corriente en cuadratura necesaria.



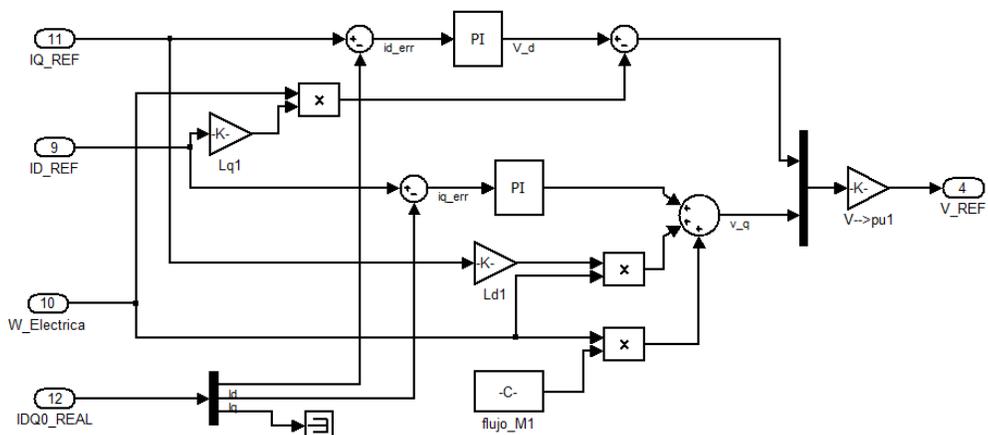
**Figura 3.20 Lazo Maestro de control**

La referencia de corriente en eje directo se calcula sólo con la velocidad de la máquina siguiendo las relaciones (3.20).



**Figura 3.21 Referencia de corriente Id**

El resultado final del lazo de control son los distintos pulsos generados mediante modulación vectorial que son aplicados al convertidor de potencia. Para ello hay que calcular la amplitud de voltaje que debería generar el convertidor, que es el mismo voltaje que debería tener la máquina en sus bornes dada la corriente que está ingresando al estator. Se tiene que medir entonces la corriente, se tiene que estimar la frecuencia eléctrica y su fase para generar el voltaje síncrono adecuado, como se realiza en la Figura 3.22.



**Figura 3.22 Controladores Esclavos y Cálculo de Voltaje del Convertidor**

### 3.3.6 Ajuste de controladores

Se lleva a cabo una estrategia de ajuste igual a la que se realizó para el circuito de conexión a la red. Primero se ajusta los controladores esclavos de manera de obtener una respuesta de corriente satisfactoria y luego se ajusta el control maestro de potencia.

La velocidad de respuesta requerida en este caso depende de las solicitudes mecánicas máximas que pueda tener la máquina eléctrica en términos de aceleración y freno. Como en este trabajo no se toma en cuenta las solicitudes mecánicas, no existe un parámetro de tiempo de respuesta.

Entonces lo que se hizo fue ajustar los controladores esclavos y el controlador maestro de tal forma de tener la respuesta más rápida posible.

### 3.4 FESS

Juntando ambos circuitos y ambos controles anteriormente explicados, se modela el FESS. La diferencia es que ahora se controla la potencia de salida en el lado de la red, en vez de la potencia de salida de la máquina de imanes permanentes.

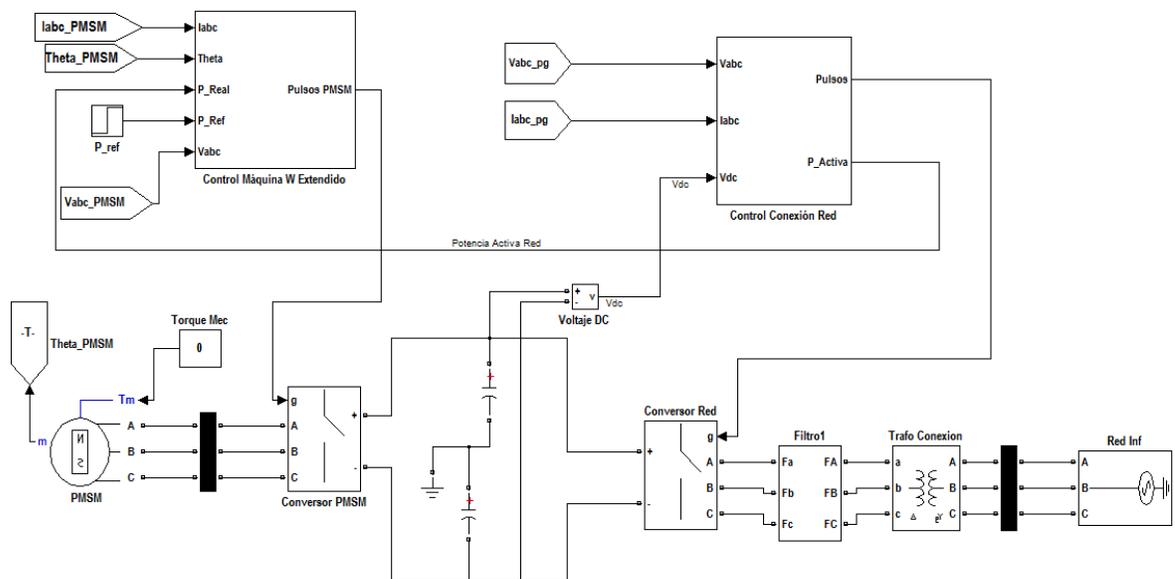


Figura 3.23 FESS en Matlab Simulink + Control

El sistema completo consta de 6 controladores PI y de dos teorías de control distintas que funcionan de forma individual. Se utilizarán los valores de ajuste de los controladores que se obtuvieron en el proceso de ajuste de los dos circuitos anteriormente explicados. No se recomienda realizar el ajuste de los seis controladores partiendo desde el circuito completo de la Figura 3.23.

Con el motivo de acelerar el tiempo de simulación, se cambió la frecuencia de conmutación del convertidor conectado a la red a 2250Hz. Se mantuvo el filtro diseñado para la frecuencia anterior considerando que los niveles de armónicos serán de igual forma mitigados.

Los valores de los controladores son:

#### Control Máquina

Potencia:  $K_p = 0,0001$  ;  $K_i = 0,05$

Corriente:  $K_p = 10$  ;  $K_i = 20$

#### Control Red

Voltaje:  $K_p = 0,02$  ;  $K_i = 1,1$

Corriente:  $K_p = 0,4$  ;  $K_i = 40$

Este sistema de control mide la potencia de la red y la máquina eléctrica trata de generar la potencia requerida, mientras que el convertidor de potencia conectado a la red mantiene el voltaje DC de enlace constante, sin comunicación entre ellos.

Existe otra forma de realizar el control del FESS, que corresponde a la forma complementaria, en donde el convertidor de potencia conectado a la red se encarga de la potencia activa de salida y la máquina eléctrica se encarga de mantener el voltaje DC constante. A pesar de que la teoría es similar a lo realizado, en este caso ambos controles deben tener una mayor comunicación entre ellos dado que el circuito encargado de la potencia de salida debe conocer cuánta energía tiene la máquina de manera de no sobrecargar o vaciar la energía tanto de la máquina como la del condensador en el puente DC.

## Capítulo 4 Resultados Matlab

Como se explicó en capítulos anteriores, existen 3 tipos de estados de operación:

- Carga
- Reposo
- Descarga

La capacidad de carga y descarga del FESS (Figura 3.23) depende de la cantidad de la energía almacenada y esto depende de la velocidad de partida de la máquina.

Primero se presentan los resultados de la operación normal del FESS que se define en este trabajo como el cambio del estado de reposo al de carga. Se explicará esta solicitud bajo distintas velocidades de partida y se detallará cada parámetro eléctrico de importancia.

Luego se presentan los resultados del cambio de ciclo desde el estado de carga al estado de descarga. También se realiza un análisis en distintas velocidades de partida de la máquina y se exponen los parámetros eléctricos de importancia.

Finalmente se realizarán perturbaciones de voltaje, frecuencia y fase en la red para conocer el comportamiento interno del FESS bajo estas solicitudes a distintas velocidades.

### 4.1 Simulaciones dinámicas en Operación Normal

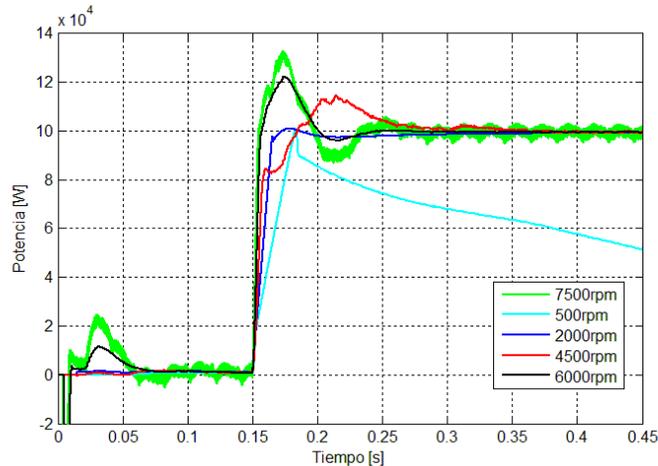
No es posible obtener una simulación completa del ciclo de carga-descarga del FESS, dado que requiere un paso de integración muy pequeño y un tiempo de simulación de al menos 15 minutos, lo que es impracticable por el tiempo requerido de cómputo. Se presentan entonces simulaciones de 0,45 segundos, en cuatro velocidades de partida:

- 500rpm: Baja velocidad, fuera de rango
- 2000rpm: Baja velocidad, torque constante
- 4500rpm: Inyección de corriente en cuadratura, cambio de control
- 6000rpm: Alta Velocidad, potencia constante.
- 7500rpm: Alta velocidad, fuera de rango

Las oscilaciones iniciales de los resultados entre 0 y 0,1 segundos que se mostrarán son gracias a las condiciones iniciales del dispositivo. Al segundo 0,1 ya se logra un estado permanente de reposo por lo que al segundo 0,15 se aplica una referencia de escalón de potencia para que el dispositivo cambie al estado de carga.

Se eliminaron los límites de velocidad impuestos anteriormente para mostrar el comportamiento de la máquina en distintas condiciones. Además sólo se analizará el cambio de reposo a carga, dado que el cambio de reposo a descarga es similar.

#### 4.1.1 Potencia PMSM



**Figura 4.1 Resultados Potencia Para Distintas velocidades de Partida<sup>1</sup>**

Como es de esperar, la respuesta de potencia de la máquina frente al escalón es similar en cada velocidad, pero no igual. Esto es debido a que a mayor velocidad se tienen distintas condiciones de partida que influyen en la operación del controlador PI de potencia.

El tiempo de subida es mayor mientras menor la velocidad, dado que se requiere llegar a una magnitud de corriente mayor para obtener la misma potencia activa de salida.

A pesar de que el tiempo de subida es menor a altas velocidades, el tiempo de estabilización en 100kW es mayor, dado que el controlador de potencia debe actuar de forma más exacta y se tienen mayores oscilaciones de potencia a la salida.

La sobreoscilación inicial es mayor mientras mayor la velocidad de partida. Lo anterior dado que las perturbaciones de corriente afectan en menor medida a la potencia de salida cuando se tiene una menor velocidad. La sobreoscilación permanece bajo los 1,2pu de potencia, sólo alcanzando un valor mayor a los 7500rpm, lo que se considera fuera de rango.

A los 500rpm el sistema se vuelve inestable y no converge en la ventana de tiempo simulada, mientras que a los 7500rpm se empiezan a producir oscilaciones grandes

<sup>1</sup> Ver Anexo 2 para mayor información acerca del resultado.

de potencia causadas por la incapacidad del sistema de conmutación de generar una onda con menor cantidad de armónicos a esas velocidades.

El cambio de estrategia de control se puede notar en la onda de los 4500rpm, cercano a los 3 segundos, en donde existe una pequeña perturbación que eleva momentáneamente la potencia a 102kW.

#### 4.1.2 Factor de Potencia PMSM

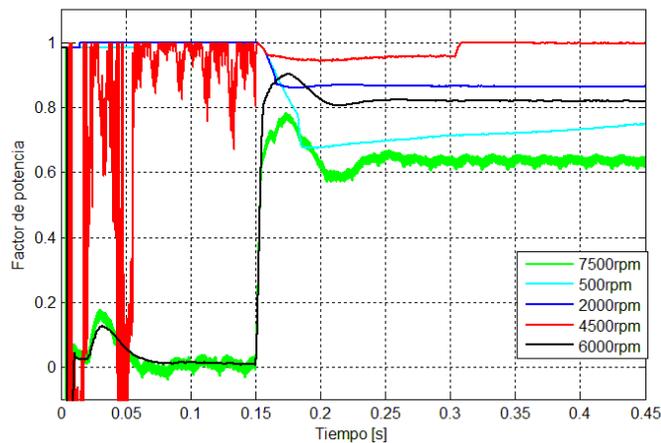


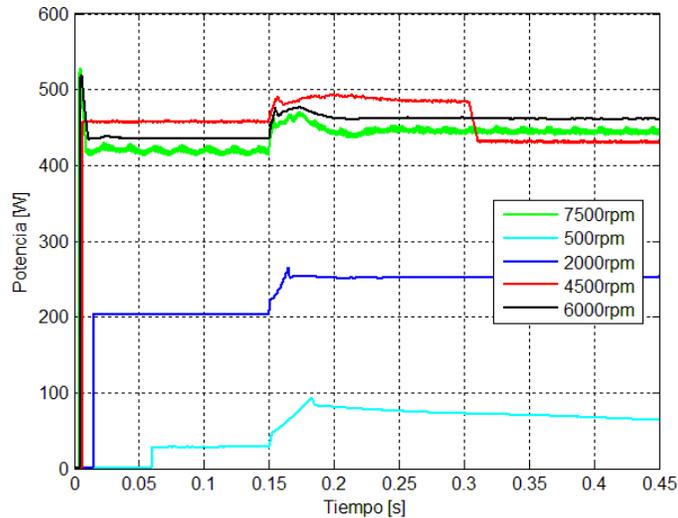
Figura 4.2 Factor de Potencia PMSM

A los 500rpm se tiene un factor de potencia menor al 0,8 inductivo. Al aumentar la velocidad a 2000rpm, el factor de potencia aumenta a un valor cercano a 0,89.

A los 4500rpm se cambia la estrategia de control inyectando corriente  $i_d$  (en eje directo) negativa a la máquina, que corresponde al segundo 0,3. A esta velocidad, el factor de potencia pasa de 0,96 inductivo a 0,99 capacitivo.

Al seguir aumentando la velocidad se sigue inyectando progresivamente  $i_d$  negativa, por lo que el factor de potencia capacitivo sigue disminuyendo. A los 6000rpm el valor llega a los 0,81 y a los 7500rpm baja a 0,64 con gran contenido armónico.

### 4.1.3 Voltaje PMSM



**Figura 4.3 Voltaje PMSM**

El comportamiento del voltaje y la corriente de la máquina permiten conocer en mayor detalle el objetivo del cambio de la estrategia de control.

A bajas velocidades el voltaje se mantiene bajo. A los 500rpm se tiene un voltaje de 125V y a los 2000rpm en reposo 180V y en carga 220V. Al aumentar la velocidad, el voltaje aumenta.

A los 4499,4rpm, el voltaje alcanza valor de 470V en reposo y cerca de 490V en modo carga. Al llegar a 4500rpm, cerca del segundo 0,3, se inyecta corriente  $i_d$  negativa bajando el voltaje a 435V.

A los 6000rpm en reposo se tiene un voltaje de 450V, y en carga este llega a 475V. Se estima que este valor es bueno pero podría mejorar, dado que el límite máximo de voltaje es de 500V.

A los 7500rpm el voltaje se mantiene por debajo de los 475V que se tenía a los 6000rpm, siendo en promedio cerca de 450V. En este caso el voltaje en reposo también es menor debido a la inyección progresiva de corriente  $i_d$ .

#### 4.1.4 Corriente PMSM

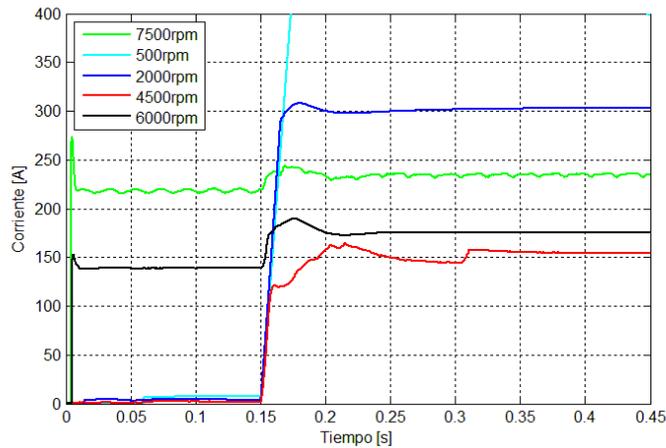


Figura 4.4 Corriente PMSM

Menor a los 4500rpm, la corriente  $i_d$  se mantiene en cero, por lo que la magnitud de corriente total se mantiene baja. A los 500rpm, las exigencias del control obligan a la corriente en cuadratura  $i_q$  llegar a valores superiores a los 1000A, llegando a valores no permitidos.

A los 2000rpm, la magnitud de corriente en el proceso de carga llega como máximo a los 308A, lo que se estima un buen valor considerando el límite impuesto anteriormente (350A) sumado a un factor de seguridad. Nótese que esta corriente corresponde en su totalidad a la corriente  $i_q$ .

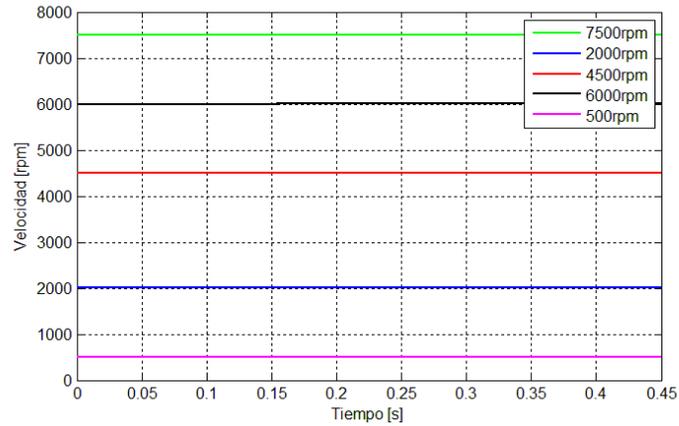
Al subir la velocidad, la magnitud de corriente necesaria para obtener los 100kW baja hasta que se llega a la velocidad de 4500rpm, donde se empieza a necesitar corriente en eje directo. Al segundo 0,3 se inyecta 60A en eje directo, por lo que la magnitud de corriente sube durante ese instante. Al subir la velocidad, su magnitud empieza a bajar nuevamente hasta los 5000rpm donde se empieza a inyectar progresivamente mayor magnitud de  $i_d$ .

A los 6000rpm la corriente en reposo es de 139A, que corresponde en su totalidad a la corriente  $i_d$  inyectada. Al comenzar el proceso de carga la magnitud de corriente se estabiliza en 176A, el cambio de magnitud es mucho menor dado que la corriente  $i_q$  necesaria para obtener los 100kW es mucho menor que en el caso de los 2000rpm.

En los 7500rpm la corriente en reposo llega a los 218A y en carga a los 234A, nótese que ahora sólo basta un cambio de alrededor de un 10% de la corriente para obtener los 100kW.

### 4.1.5 Velocidad de la máquina

Las variaciones de velocidad que se obtienen son pequeñas, puesto que la inercia considerada es grande comparado con la potencia de entrada a la máquina.



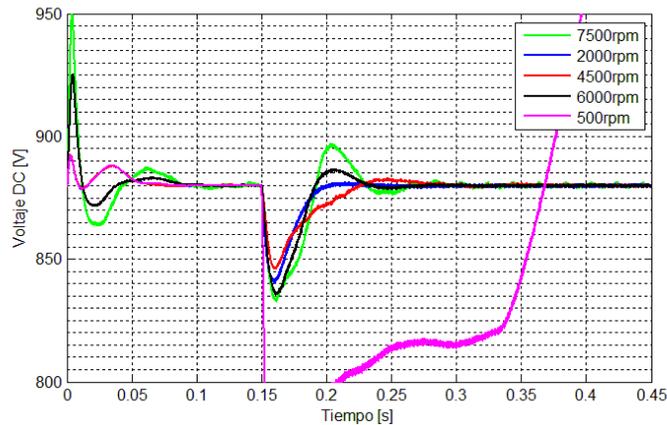
**Figura 4.5 Variación de velocidad PMSM**

La variación de las velocidades corresponden a:

- 500rpm a 507,12rpm
- 2000rpm a 2002,45rpm
- 4499,4rpm a 4500,57rpm
- 6000rpm a 6000,86rpm
- 7500rpm a 7500,67rpm

A menor velocidad, mayor es la variación dado que se ingresa la misma cantidad de energía en cada caso.

## 4.1.6 Voltaje DC



**Figura 4.6 Voltaje DC Puente**

El voltaje DC presenta en general la misma forma de onda. En la primera oscilación con velocidad inicial de 2000rpm se llega a 841V y se puede notar que se tiene la mejor respuesta de voltaje directo, dado que se tiene la mejor respuesta de potencia por parte del control de la máquina (Figura 4.1).

A 4500rpm la respuesta en potencia de la máquina posee una sobreoscilación de potencia (Figura 4.1) que distorsiona la respuesta del voltaje DC. En este caso el voltaje llega a 847V, menor al que se tiene en 2000rpm, pero se tiene una onda superior que llega a los 882V. La inyección de corriente en eje directo durante el cambio de estrategia de control a los 0,3 segundos no afecta al voltaje DC perceptiblemente, puesto que la perturbación total en el cambio de estrategia es de 2kW, valor pequeño comparado al total (2%).

A los 6000rpm se incrementan las oscilaciones en el voltaje DC, llegando a 836V mínimo y a los 886V máximo. Esto debido a que se tiene una mayor sobreoscilación de potencia de la máquina.

A los 7500rpm la respuesta es muy similar a la de 6000rpm, con mayor magnitud de oscilación.

El cambio de flujo de potencia activa instantánea de 1kW a 100kW en este caso produce una perturbación media de 40V. Esto concuerda con el diseño mediante la fórmula (3.2) considerando que la potencia media (RMS) en este caso corresponde a 50kW, lo que produciría una perturbación alrededor de 5% del voltaje DC.

Se concluye mediante este gráfico que la estabilidad de voltaje gracias al ajuste del control y el correcto diseño en cada circuito es satisfactoria.

### 4.1.7 Potencia Activa en el lado de la Red

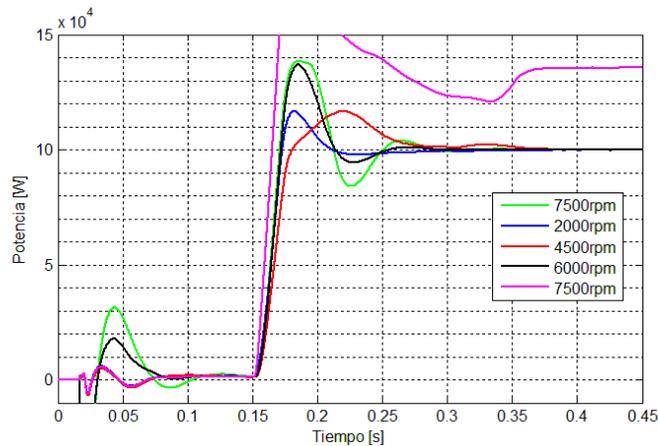


Figura 4.7 Potencia Activa Red

Nótese que la sobreoscilación de potencia de la respuesta de la máquina eléctrica en la parte de la red se amplifica.

A los 2000rpm, que es cuando se tiene la menor sobreoscilación en el lado de la máquina, se llega a 117kW. Al aumentar la velocidad, la respuesta de potencia en el lado de la máquina incrementa su sobreoscilación y por lo tanto también se tiene la misma respuesta en el lado de la red.

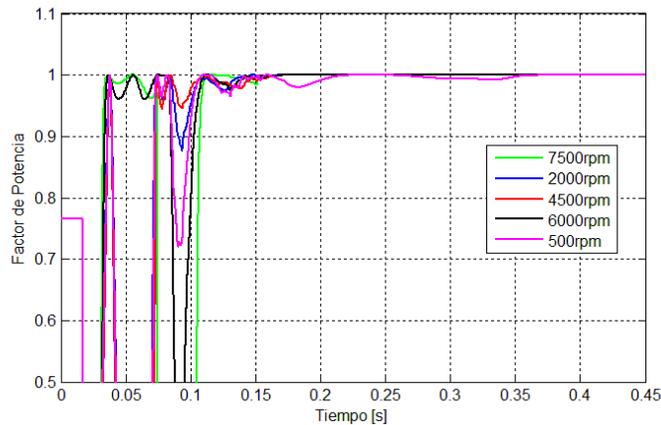
El tiempo de subida en el lado de la red se distorsiona con respecto a los resultados de potencia de la máquina eléctrica. Se concluyó que la máquina a mayor velocidad, menor tiempo de subida, no sucede lo mismo con la respuesta de potencia en la red, puesto que se puede ver que a los 4500rpm se tiene un mayor tiempo de subida que a los 2000rpm.

A los 4500rpm se llega a una potencia de 117kW, igual sobreoscilación que se tiene a los 2000rpm, pero en distinto tiempo. A los 6000rpm se llega a 136kW y a los 7500rpm a 138kW. A mayor velocidad mayor la sobreoscilación de respuesta en la red dado que se tiene una mayor oscilación en la respuesta de potencia en la máquina sumado además que el tiempo de subida de respuesta en la red es menor que en el lado de la máquina eléctrica lo que amplifica la sobreoscilación de potencia de salida.

El cambio de control se puede ver en la perturbación que tiene la respuesta a 4500rpm cercano al segundo 0,3. A pesar de que en el voltaje DC no se apreciaba una perturbación de gran magnitud, en el lado de la red la potencia sube a los 102kW, que era lo esperado.

La respuesta que se tiene a los 500kW, no se analiza por que escapa de los valores establecidos.

### 4.1.8 Factor de potencia red

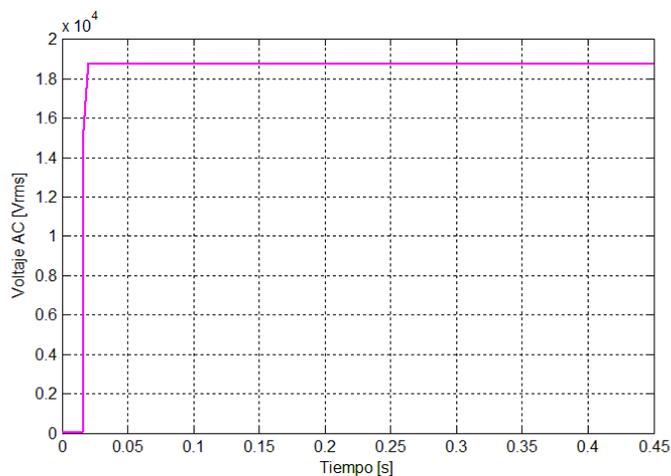


**Figura 4.8 Factor de Potencia RED**

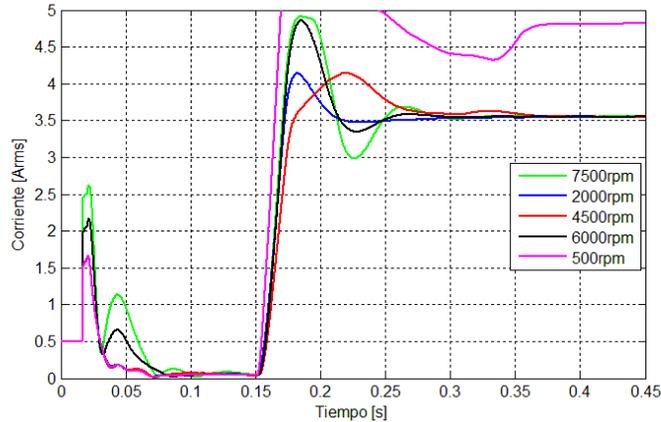
El factor de potencia bajo el segundo 0,1 es oscilante por las condiciones iniciales, luego el sistema se estabiliza y controla el factor de potencia en un valor igual a 1, que es lo que se programó en un principio fijando la referencia de corriente en eje en cuadratura en la red igual a 0.

Nótese que el factor de potencia puede ser controlado a voluntad, todo depende del control del convertidor electrónico conectado a la red. En numerosos casos en estos sistemas se agrega un control de potencia reactiva que permite utilizar estos dispositivos tanto como STATCOM como FESS.

### 4.1.9 Voltaje y corriente red



**Figura 4.9 Voltaje red**



**Figura 4.10 Corriente Red**

El voltaje no es perturbado debido a que está fijo establecido por la red. La corriente se comporta de la misma forma que la potencia de red graficada en la Figura 4.7, resultado esperado dado que el voltaje es fijo.

## 4.2 Simulaciones dinámicas Carga-Descarga

Se simulará la respuesta del sistema frente a la situación de cambio de modo de carga a descarga.

Este cambio se aplica al segundo 0,15 cuando el FESS se encuentra en modo de carga absorbiendo 100kW de potencia.

Se presentarán los resultados para 3 velocidades:

- 2000rpm: Baja velocidad, estrategia de torque constante
- 4500rpm: Inyección de corriente en cuadratura, cambio de control
- 6000rpm: Alta Velocidad, estrategia de potencia constante.

En esta oportunidad se presentan los gráficos en un tamaño más pequeño, dado que se considera innecesario mantener el formato anterior.

## 4.2.1 Potencia y Factor de Potencia

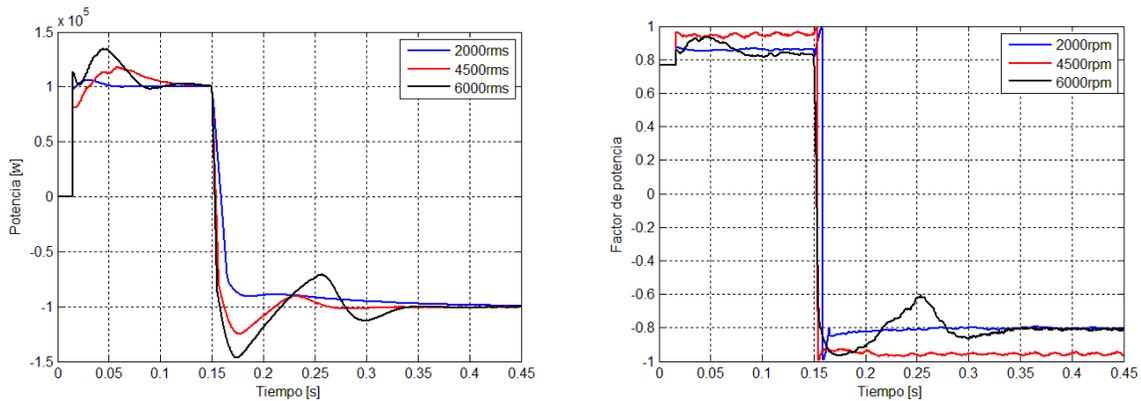


Figura 4.11 P y FP en Carga-Descarga

El tiempo de estabilización de potencia es mayor que en el cambio reposo-carga, lo que es esperado dado que es un cambio de referencia el doble de magnitud. Si el sistema se demoraba 100mseg en el cambio de reposo a carga, en esta ocasión, el cambio de carga a descarga se demora cerca de 150mseg.

La respuesta que tiene mejor respuesta es cuando la máquina se encuentra a 4500rpm, puesto es la que se estabiliza con mayor rapidez.

A 2000rpm se tiene una respuesta no oscilante.

En los 6000rpm la respuesta llega a -150kW de potencia, que es la mayor sobreoscilación de las 3 respuestas.

El factor de potencia se comporta similar a la potencia activa manteniéndose valores mayores al 0,8.

## 4.2.2 Voltaje DC

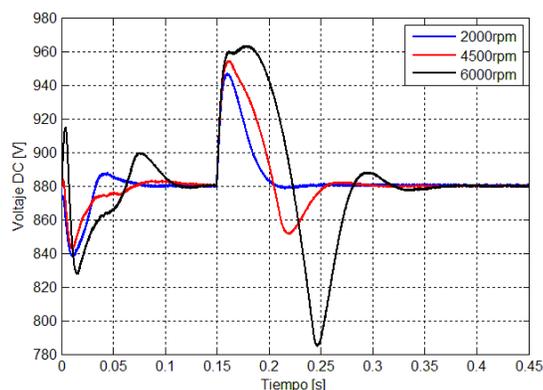


Figura 4.12 Voltaje DC en Carga-Descarga

Cómo es de esperar, el voltaje DC presenta más oscilaciones que en el caso reposo-carga.

A 2000rpm se presenta la mayor estabilidad, llegando la máxima sobreoscilación a 945V y con un tiempo de estabilización de 0,05 segundos. Al subir la velocidad inicial, la sobreoscilación inicial sube llegando a 960V a los 6000rpm. El tiempo de estabilización sube a 200 milisegundos.

Al subir de velocidad también se empieza a generar una segunda oscilación que lleva la respuesta a valores menores a los 880V de referencia, incrementándose con el aumento de la velocidad de la máquina. A los 6000rpm se llega a 785V siendo ésta la mayor variación del voltaje DC, teniendo una diferencia con el voltaje de referencia de 95V. Esto corresponde a una perturbación de un 10,07%, lo que concuerda con el diseño realizado con la ecuación (3.2) dado que esta vez si se tiene una oscilación de 100kWrms

### 4.2.3 Potencia y Factor de potencia Red

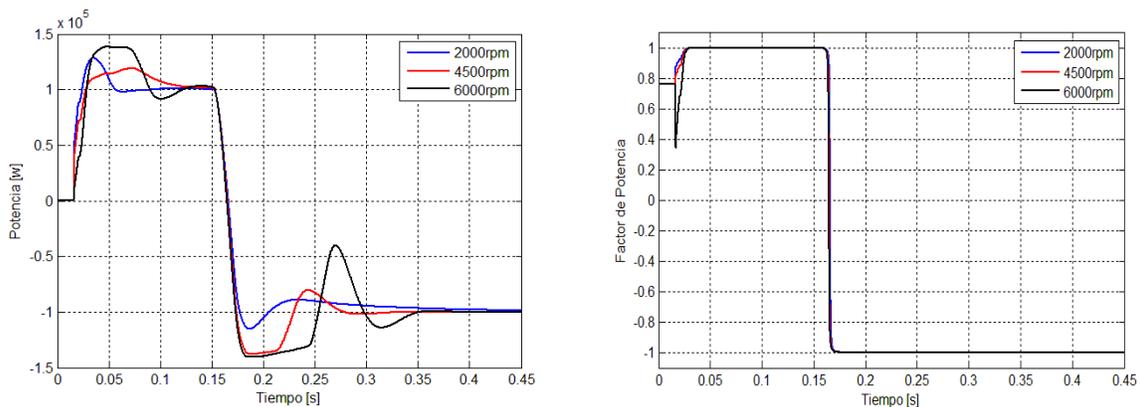


Figura 4.13 P y FP red en Carga y Descarga

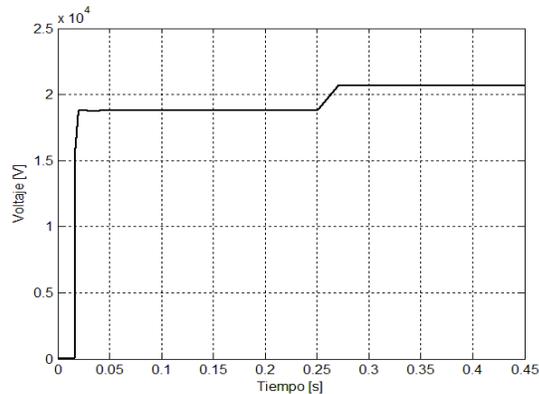
El factor de potencia de la red se mantiene invariante mientras que la potencia de salida tiene oscilaciones de potencia que se estabilizan un casi al mismo tiempo que en el lado de la máquina.

Nótese que los tiempos de subida de la potencia activa en el lado de la red son prácticamente todos iguales, invariantes de la velocidad inicial de la máquina eléctrica.

### 4.3 Simulaciones dinámicas Perturbación de Voltaje

Se analizará la respuesta del sistema frente a una perturbación del voltaje mientras se está en el proceso de carga.

Se aplica además del cambio en la referencia de potencia del FESS de 1kW a 100kW al segundo 0,15, una perturbación de un 10% en la amplitud del Voltaje de la Red.



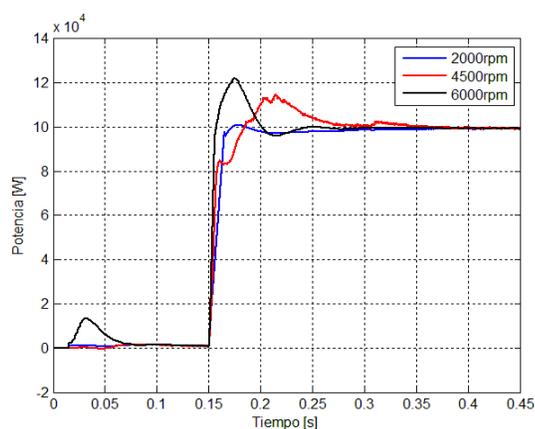
**Figura 4.14 Perturbación de voltaje**

La Figura 4.14 indica la perturbación de voltaje aplicada aplicado una ventana de promedio temporal. En realidad la perturbación corresponde a un escalón de voltaje al segundo 0,25.

Se presentarán los resultados para 3 velocidades:

- 2000rpm: Baja velocidad, torque constante
- 4500rpm: Inyección de corriente en cuadratura, cambio de control
- 6000rpm: Alta Velocidad, potencia constante.

### 4.3.1 Potencia máquina



**Figura 4.15 P máquina 1.1V**

La potencia de la máquina no se ve perturbada por el cambio del voltaje en la red.

Nótese entonces que este método de conexión a la red (mediante 2 VSI) permite proteger de las perturbaciones de voltaje a la máquina eléctrica. Esto debido a que el control implementado en el convertidor conectado a la red aísla las variaciones de voltaje que puedan ocurrir en la red dado que su objetivo es mantener un voltaje DC constante igual a 880V.

### 4.3.2 Voltaje DC

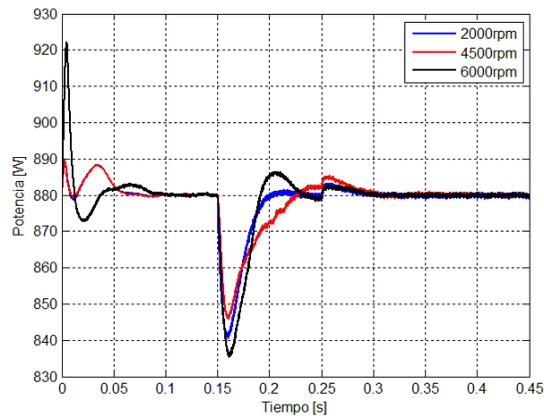


Figura 4.16 Voltaje DC 1.1V

El voltaje DC tiene una ligera perturbación al segundo 0,25 que en su máxima amplitud, en la onda de los 4500rpm, se llega a 885V. Se puede concluir que el control del convertidor conectado a la red es sumamente eficiente.

### 4.3.3 Potencia y Factor de potencia Red

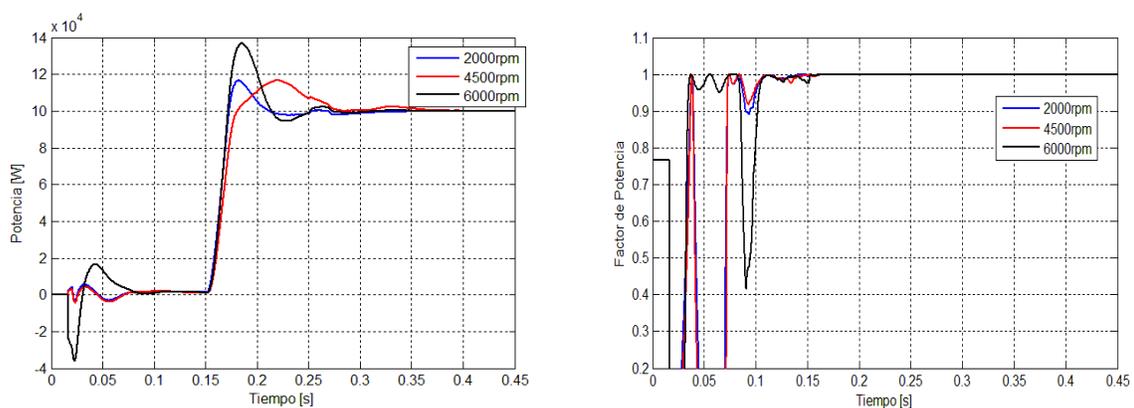


Figura 4.17 P y FP red 1.1V

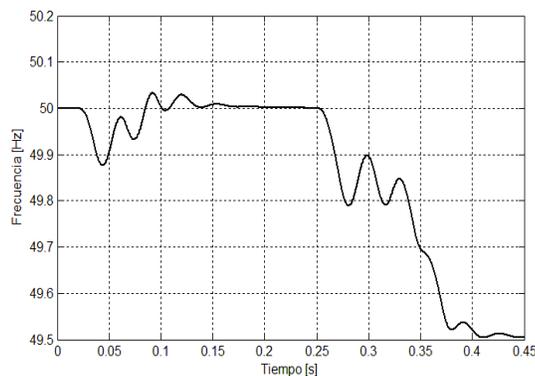
La potencia y el factor de potencia en el lado de la red presentan ciertos comportamientos que indican perturbación de voltaje, pero son mínimos.

## 4.4 Simulaciones dinámicas Perturbación de Frecuencia y Fase

Se analizará la respuesta del sistema frente a una perturbación de la frecuencia y fase mientras se está en el proceso de carga.

Se aplica además del cambio en la referencia de potencia del FESS de 1kW a 100kW en el segundo 0,15, una perturbación de -0,5% en la amplitud de la frecuencia de la Red en el segundo 0,25.

La frecuencia del sistema es medida mediante un PLL conectado a la medición de voltaje en la red. En todos los casos analizados lo medido se comporta de la siguiente forma:



**Figura 4.18 Frecuencia Medida por PLL**

Las perturbaciones iniciales corresponden a las condiciones iniciales, al segundo 0,15 el PLL se estabiliza y mide la frecuencia correcta. En el segundo 0,25 se aplica la perturbación de frecuencia y fase. El PLL no es un medidor instantáneo, por lo que se demora en llegar a la nueva frecuencia. El PLL mide una frecuencia cercana a 49,5Hz justo al segundo 0,45.

#### 4.4.1 Potencia Máquina

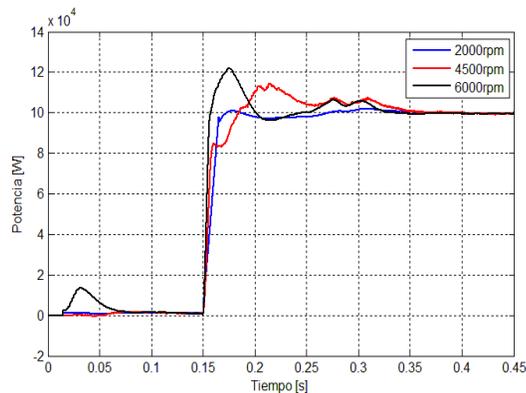


Figura 4.19 P Máquina (F-0.5)

La potencia de la máquina se ve influenciada por el cambio de frecuencia brusca de la red. Llegando como máximo a 107kW a los 4500rpm.

Nótese que a pesar de que la máquina no se vio afectada por un cambio de voltaje en la red, si se ve afectada por un cambio de frecuencia y fase en la red. Esto debido a que la perturbación es mucho mayor en comparación a la anterior, dado que se perturba no solo la frecuencia, sino que también la fase. Lo anterior resulta que la medición de frecuencia que tiene que realizar el PLL sea más complicada y resulte en la forma de onda que se tiene en la Figura 4.18.

#### 4.4.2 Voltaje DC

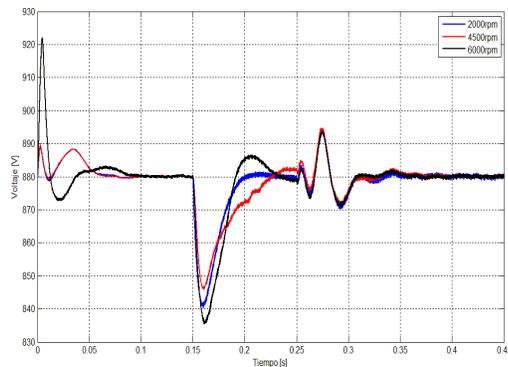


Figura 4.20 V dc (F-0.5)

El voltaje del puente DC se ve sumamente distorsionado. En las 3 velocidades se comporta de igual manera, presentando oscilaciones a partir del segundo 0,25 que no se tenían sin perturbación, prolongándose por un periodo de tiempo de 50mseg.

### 4.4.3 Potencia Red y Factor de Potencia Red

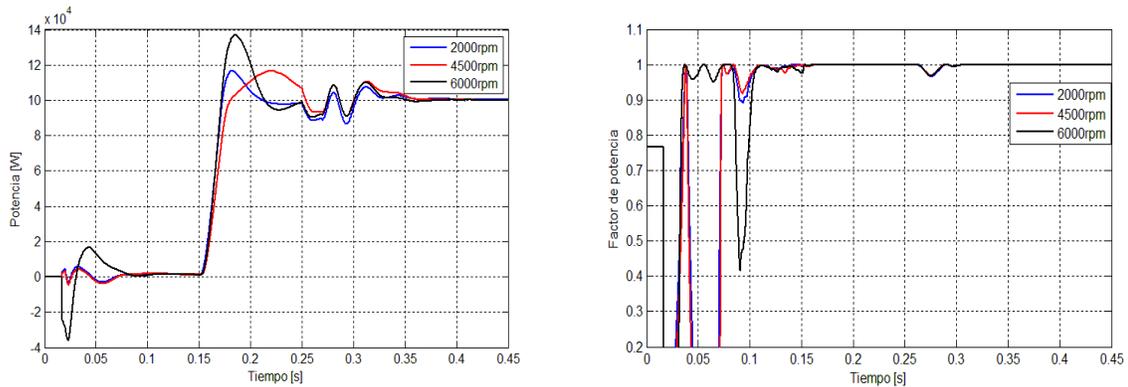


Figura 4.21 P y FP red (F-0,5)

La potencia de salida del FESS se comporta similar en cada velocidad. Su comportamiento es oscilante partiendo desde el segundo 0,25, con un periodo de estabilización de 100mseg, 50mseg más tarde que las ondas en el voltaje DC.

Comparando este resultado con la Figura 4.19, se puede decir que la perturbación es notablemente mitigada en el lado de la máquina.

En el factor de potencia se puede ver una ligera perturbación a los 0,27 segundos, donde por un instante baja a 0,96, pero en comparación con las oscilaciones de potencia este resultado es mínimo.

En conclusión, a pesar de que se tiene una perturbación mayor que incluso afecta la salida de potencia en la parte de la máquina eléctrica, puede considerarse que la conexión del FESS mediante dos convertidores de potencia provee la seguridad de que los eventos en la red no afecten significativamente al sistema de almacenamiento de energía.

## Capítulo 5 Regulación de Frecuencia

La frecuencia depende fundamentalmente del equilibrio de cada instante entre la potencia activa generada y demandada, incluyendo las pérdidas de transmisión. Si la potencia consumida es menor que la generada, los generadores del sistema comienzan un proceso de aceleración lo que lleva a un aumento de la frecuencia. Si la potencia consumida es mayor que la generada, los generadores desaceleran y la frecuencia del sistema disminuye.

La regulación de frecuencia es el proceso por el cual los sistemas eléctricos mantienen la frecuencia alrededor de una frecuencia de referencia constante, ya sea variando la generación o, en casos extremos, variando la demanda.

El cambio del equilibrio entre potencia generada y consumida se da naturalmente debido a que el consumo no es estático. En las redes pueden existir además contingencias que impactan en mayor medida a la estabilidad de frecuencia. Entre estas contingencias podría estar la desconexión de un generador o la falla de una línea que elimine parte del consumo o generación.

Contrario al control de tensión, el control de frecuencia es un problema que para pequeñas desviaciones se aborda de manera global, pues es considerada igual en todos los puntos del sistema.

Este proceso se realiza a través de generadores capaces de regular la potencia que está siendo entregada a su turbina (Figura 5.1). Para ello, estos generadores deben tener equipos que midan las variaciones de velocidad de la turbina y que accionen medidas correctivas a la admisión de combustible a la turbina, que en el caso de hidráulicas es agua y en el caso de térmicas el vapor producto del gas, carbón o diesel. Todo lo anterior es parte del regulador de velocidad del generador.

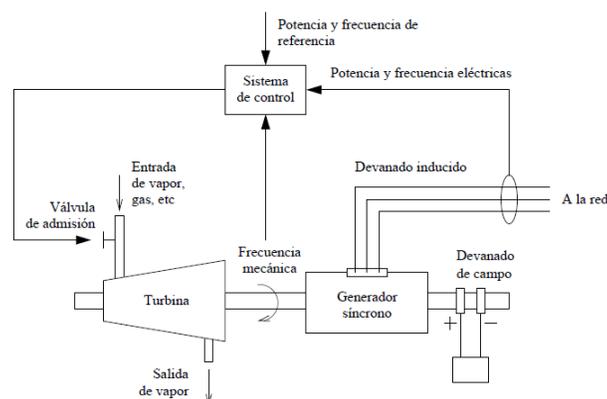


Figura 5.1 Diagrama de regulación de velocidad de un generador [11]

Otros dispositivos que pueden ser usados para regular la frecuencia, pero que no se utilizan para esta aplicación, son los enlaces de corriente continua, los sistemas electrónicos FACTS y los métodos de almacenamiento de energía.

La mayoría de los dispositivos de almacenamiento de energía mencionados anteriormente son tecnologías aún en estudio que podrían ser usados para este motivo, pero su uso no está masificado, existiendo en algunos casos proyectos piloto en evaluación [11]. En el caso de Chile, existen ya dispositivos BESS en operación que ayudan a regular frecuencia.

Además de mantener la frecuencia constante, el control de la frecuencia debe usar los recursos del sistema de forma económica y debe asegurar que se mantenga la suficiente energía de reserva de energía para hacer frente a posibles desequilibrios.

En el análisis de la respuesta de frecuencia del sistema, se estudian tres tipos de variaciones:

- Variaciones lentas de frecuencia.
- Variaciones bruscas de pequeña amplitud.
- Variaciones bruscas y de amplitud suficiente para que los reguladores de velocidad se saturen.

El control de frecuencia se divide en tres tipos (primario, secundario y terciario) que se clasifican según el tiempo de respuesta y el objetivo de cada uno de ellos.

La regulación primaria de frecuencia opera en un margen de 2 a 20 segundos. Es un control se realiza en cada generador, dependiendo de las normas del sistema al que esté conectado, actuando de forma local. Su función es estabilizadora, se preocupa sólo que no exista un permanente desajuste entre potencia activa consumida y demandada. De esta manera logra que la frecuencia se mantenga en un valor que no necesariamente es el nominal, generando un error permanente no nulo.

La regulación secundaria de frecuencia es realizada por un grupo de generadores previamente establecidos los cuales se accionan de manera coordinada de forma posterior al control primario. Tiene un tiempo de respuesta que se inicia después del control primario y tiene una duración de varios minutos. Su función consiste en llevar la frecuencia estabilizada a la nominal, además de restablecer la cantidad de reserva de energía necesaria para el control primario de frecuencia.

La regulación terciaria de frecuencia tiene como función ajustar las generaciones de las distintas máquinas en los valores más convenientes desde un punto de vista económico [11]. No se aplica en Chile.

La regulación de frecuencia primaria se define como un servicio complementario. La definición exacta de servicio complementario depende de la regulación normativa de cada país.

## 5.1 Regulación de Frecuencia en Chile

Este servicio es parte de los parámetros de calidad de servicio definidos en la ley general de servicios eléctricos (LGSE) [21].

En el artículo 172 se establece que este servicio es parte de las funciones básicas del CDEC (Centro de Despacho Económico de Carga) que debe establecer, coordinar y verificar la reserva de potencia del sistema, para regular instantáneamente la frecuencia dentro de los límites fijados por la LGSE. Específicamente es parte de la Dirección de Operaciones del CDEC (artículo 181).

Según lo anterior, la regulación de frecuencia no es un servicio provisto por un agente en particular, más bien la regulación de frecuencia se realiza a través de la adecuada selección y control de la reserva de potencia.

La norma técnica de seguridad y calidad de servicio (NTSyCS [19]) define tres tipos de reserva de potencia:

- Reserva Primaria: Reserva destinada a corregir las desviaciones instantáneas de la generación respecto de la demanda real del sistema
- Reserva Secundaria: Reserva destinada a compensar, durante períodos de actuación menores a 15 min, las desviaciones reales de la demanda y la generación respecto de los valores previstos en la programación de la operación del sistema
- Reserva en Giro: Margen de potencia disponible entre la potencia de despacho y la potencia máxima disponible de todas las unidades en operación. Este margen podrá ser aportado para una o varias unidades generadoras mediante el uso de Equipos de Compensación de Energía Activa.

La norma técnica también define los conceptos de regulación de frecuencia primaria y secundaria (en este caso llamados control primario y secundario de frecuencia):

- Control Primario de Frecuencia (CPF): Acción de control ejercida rápidamente sobre la frecuencia de un SI a través de equipos instalados en las unidades generadoras que permiten modificar en forma automática su producción y/o a través de Equipos de Compensación de Energía Activa
- Control Secundario de Frecuencia (CSF): Acción manual o automática destinada a compensar el error final de frecuencia resultante de la acción del CPF que ejercen los controladores de velocidad de las unidades generadoras y/o Equipos de Compensación de Energía Activa dispuestas para tal fin. El tiempo de respuesta de esta acción es del orden de varios minutos, no pudiendo exceder los 15 minutos, y a su vez debe ser sostenible durante 30

minutos. Es función del CSF restablecer la frecuencia del SI en su valor nominal, permitiendo a las unidades generadoras participantes del CPF restablecer su producción de acuerdo al orden económico del despacho.

La LGSE también establece la frecuencia nominal y de operación del voltaje mediante el artículo 242. Éste establece:

- Artículo 242.- La frecuencia nominal del voltaje, en sistemas eléctricos en que exista servicio público de distribución, será de 50 ciclos por segundo, en adelante Hz.
- En condiciones normales de operación, el valor promedio de la frecuencia fundamental, medida en intervalos de tiempo de 10 segundos durante todo período de siete días corridos, deberá encontrarse en el rango siguiente:
- Sistemas con capacidad instalada en generación superior a 100 MW, en los cuales el aporte de energía de centrales hidroeléctricas durante dicha semana supere el 60% del consumo total:
  - sobre 49,8 Hz y bajo 50,2 Hz durante al menos el 99% del período;
  - entre 49,3 Hz y 49,8 Hz durante no más de un 0,5% del período;
  - entre 50,2 y 50,7 Hz durante no más de un 0,5% del período.
- Sistemas con capacidad instalada en generación superior a 100 MW, en los cuales el aporte de energía de centrales hidroeléctricas durante dicha semana no supere el 60% del consumo total:
  - sobre 49,8 Hz y bajo 50,2 Hz durante al menos el 97% del período;
  - entre 49,3 Hz y 49,8 Hz durante a lo más un 1,5% del período;
  - entre 50,2 y 50,7 Hz durante a lo más un 1,5% del período.

También se norman los rangos de operación para sistema de potencia con capacidad instalada inferiores, pero no se tomará en cuenta dado que no se analizarán sistemas con capacidad instalada menor a 100MW.

El decreto con fuerza de ley N°4 (DFL4) establece que el CDEC administra y opera los servicios complementarios, mientras que los propietarios de las instalaciones declararán los costos de los servicios para luego ser valorizados por el CDEC (artículo 150 del DFL4).

Según la NTSyCS, los servicios complementarios se definen como:

- Son servicios complementarios aquellas prestaciones que permiten efectuar, a lo menos, un adecuado Control de Frecuencia, Control de Tensión y Plan de Recuperación de Servicio, tanto en condiciones normales de operación como ante contingencias

La reserva requerida y los distintos equipos necesarios para el control de frecuencia son determinados también por el CDEC según un criterio de operación óptimo económico después de que la CNE (Comisión Nacional de Energía) establezca la NTSyCS (artículo 20 de las disposiciones transitorias del DFL4, artículo 6-43 de la NTSCS).

Cada unidad generadora puede ser parte del CPF y del CSF siempre y cuando postule para el servicio, haya cumplido con las exigencias que establece la NTSCS y sea habilitada por la dirección de operaciones del CDEC.

## **5.2 CPF en Sistemas SIC y SING**

El sistema interconectado central (SIC) y el sistema interconectado del norte grande (SING) son los sistemas más importantes de Chile.

El SING abarca las regiones Decimoquinta, Primera y Segunda. Tiene una capacidad cercana a los 4000MW con una demanda bruta máxima de 2002MW al año 2010. La generación se realiza en su mayoría con centrales térmicas a carbón, diesel y gas natural. Se encuentra en una zona principalmente desértica en donde se concentran varios consumos mineros. [35] [33]

El sistema de regulación primaria de frecuencia en el SING se realiza mediante los sistemas de control propios de cada unidad. La potencia necesaria para este tipo de regulación se obtiene mediante la reserva en giro de cada unidad, asignada actualmente en un 7% de la capacidad máxima de generación mediante un estudio anual que realiza el CDEC-SING. [32]

El SIC está ubicado desde Taltal (comuna perteneciente a la región de Antofagasta) hasta Puerto Montt (en la Región de los Lagos). Tiene una capacidad instalada cercana a los 12400MW al año 2010 en donde la mayoría de las centrales son térmicas, hidráulicas e hidráulicas de pasada. Entrega el suministro eléctrico a más del 90% de la población del país. [35] [34]

El sistema de regulación primaria de frecuencia en este sistema se realiza mediante la asignación de reserva en giro de una unidad de generación hidráulica denominada Unidad Piloto, que posee un estatismo (variación de potencia dada la frecuencia del sistema) cercano a cero.

La unidad piloto mantiene en todo momento una reserva en giro cercana a los 60MW. Para efectos de contingencias más severas, la reserva en giro total del SIC se mantiene alrededor de una potencia similar a la mayor unidad de generación despachada, distribuida por el CDEC en los generadores hidráulicos capaces de proveer este servicio y que cumplan la norma técnica de calidad y seguridad de suministro. [35]

## Capítulo 6 Modelo RMS

Para realizar la conexión del FESS al SIC y al SING, se estimó conveniente crear un modelo RMS o fasorial por dos motivos:

- La complejidad de modelar los sistemas interconectados de forma similar a lo programado en Matlab.
- Por el objetivo que posee el conectar el FESS a los sistemas interconectados.

Al conectar el FESS al SIC o al SING se entiende que se tiene por meta un análisis de control sistémico y no electromagnético (EMT), que es el caso de la simulación en Matlab. Lo que interesa en esta etapa del trabajo es buscar aplicaciones reales de este sistema de almacenamiento en sistemas de potencia y evaluar su factibilidad.

En base a lo anterior, se deduce que es más importante la respuesta del FESS frente a la red y pierde importancia lo que está pasando al interior de éste. Es por esto que en esta etapa se evaluará la característica eléctrica del FESS para obtener un modelo similar al de Matlab, implicando también que no se tendrán todos los detalles de lo programado anteriormente.

Se generará el modelo RMS en DigSilent PowerFactory gracias a sus prestaciones para modelar los sistemas de potencia y ser el programa computacional que utilizan las distintas autoridades en sus diversos análisis de las redes del país.

En este capítulo se explicará la programación y control en este programa y luego se compararán los modelos generados en ambos programas para validar los resultados.

### 6.1 Programación modelo RMS

Existen varias formas de modelar el FESS en Digsilent. Es usual que los sistemas de almacenamiento se modelen mediante un bloque genérico que emula un generador virtual infinito llamado “Static Generator”<sup>1</sup> y que se controla según lo que se requiera.

Este bloque también es utilizado para simular distintos tipos de ERNC.

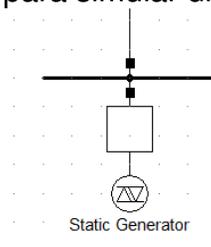


Figura 6.1 Static Generator en DigSilent

<sup>1</sup> En español: Generador Estático

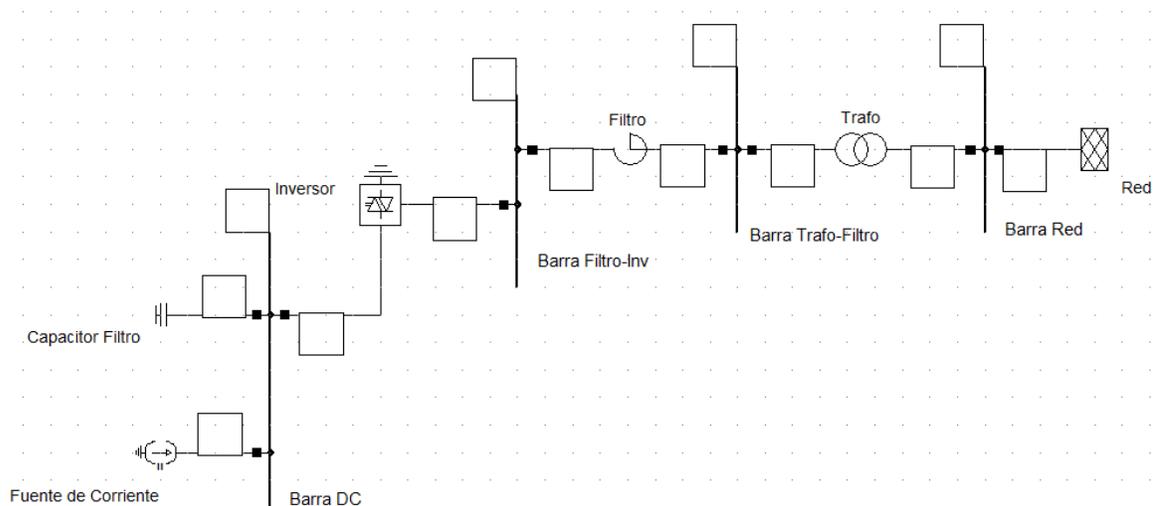
Con el motivo de obtener un modelo con el mayor parecido posible a lo programado en Matlab, no se ocupará lo anterior. Como el FESS se conecta a la red mediante un convertidor de potencia, se utilizará este tipo de dispositivo.

Una característica importante que resulta del análisis del modelo en Matlab es que la respuesta del FESS depende tanto de sus condiciones iniciales como del control asociado a sus dos convertidores electrónicos.

Se simplificará la modelación del modelo RMS basándose en el circuito de conexión a la red programado en Matlab (Figura 3.2). Se reemplaza la máquina que almacena energía y el conversor al cual está conectada por una fuente ideal de corriente.

Se propone como trabajo futuro modelar la máquina de imanes permanentes y su control en Digsilent. Lo anterior permitiría modelar de forma electromagnética en este programa, pero para efectos de esta memoria sería redundante dado que ya se realizó en Matlab.

El sistema de almacenamiento de energía se modela como la Figura 6.2.



**Figura 6.2 FESS en Digsilent**

Una diferencia topológica con el circuito reducido programado en Matlab (Figura 3.2) es que en este caso no se consideró un filtro LCL. Se instala un filtro tipo L, dado que para efecto de los objetivos de este circuito se estima suficiente.

Las simulaciones dinámicas que se harán en Digsilent no toman en cuenta los armónicos, por lo que el filtro tipo L servirá para realizar los cálculos necesarios para generar un lazo de control similar al de Matlab, no funcionando como filtro real.

La diferencia fundamental de esta programación con la anterior es que cada elemento se modela considerando las ecuaciones RMS de cada componente. Estas

son simples funciones que relacionan el valor de la componente fundamental de los voltajes de sus terminales y la respectiva corriente que pasa por el dispositivo.

Por ejemplo, para el inversor, las ecuaciones que lo rigen son [36]:

$$U_{ac_r} = K_0 \cdot Pm_r \cdot U_{DC} \quad (6.1)$$

$$U_{ac_i} = K_0 \cdot Pm_i \cdot U_{DC} \quad (6.2)$$

Donde

- $U_{ac_r}$  y  $U_{ac_i}$ : voltaje AC en eje real e imaginario respectivamente.
- $Pm_r$  y  $Pm_i$ : índice de modulación en el eje real y eje imaginario.
- $K_0$ : índice que indica tipo de modulación (sinusoidal u otra).

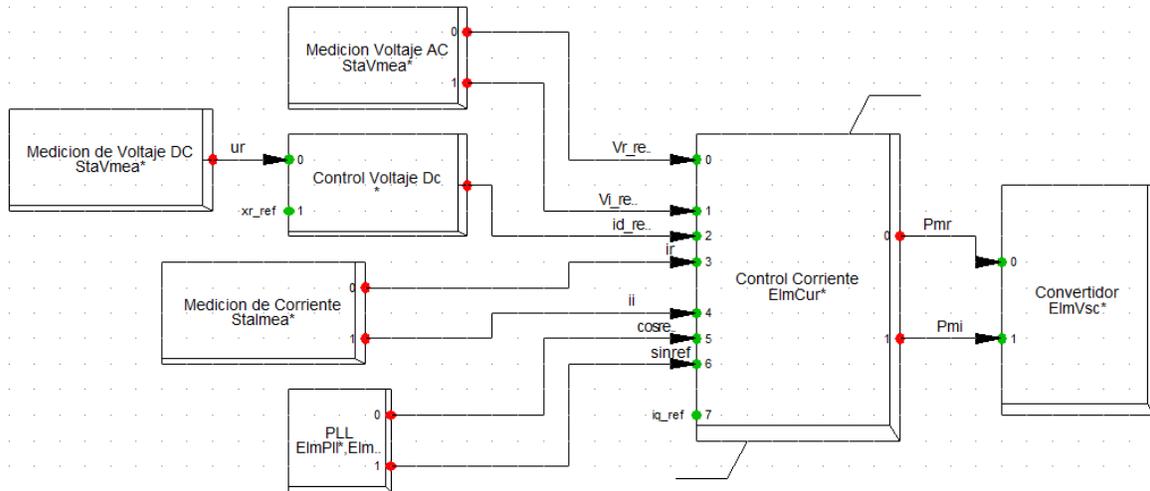
## 6.2 Control Modelo RMS

El circuito es prácticamente igual al programado en Matlab, por lo que el control de este circuito también se programó de manera similar, siguiendo la misma teoría.

El control se divide en dos partes, similar al sistema FESS completo en Matlab. Una parte controla el voltaje DC (explicada en sección 3.2.7) y la otra controla la potencia de salida o entrada que se realiza mediante la generación de una referencia adecuada de corriente que controla la fuente de corriente continua (lazo que depende de cada control en cada aplicación, por lo que la programación de estos controles se explicará en su correspondiente capítulo).

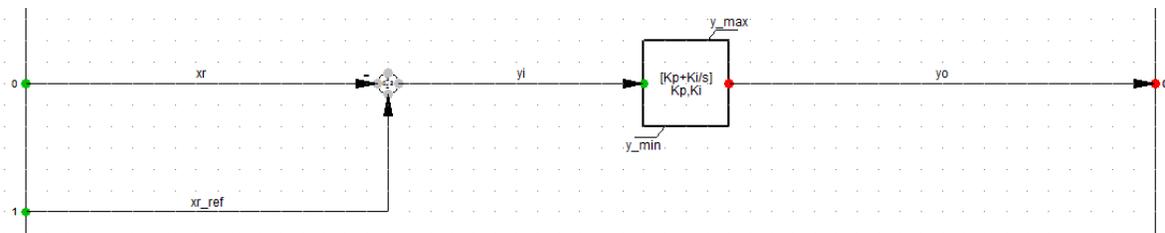
### 6.2.1 Control del voltaje DC

El lazo de control que mantiene el voltaje DC constante y mantiene un factor de potencia igual a uno a la salida del transformador se ve en la Figura 6.3.



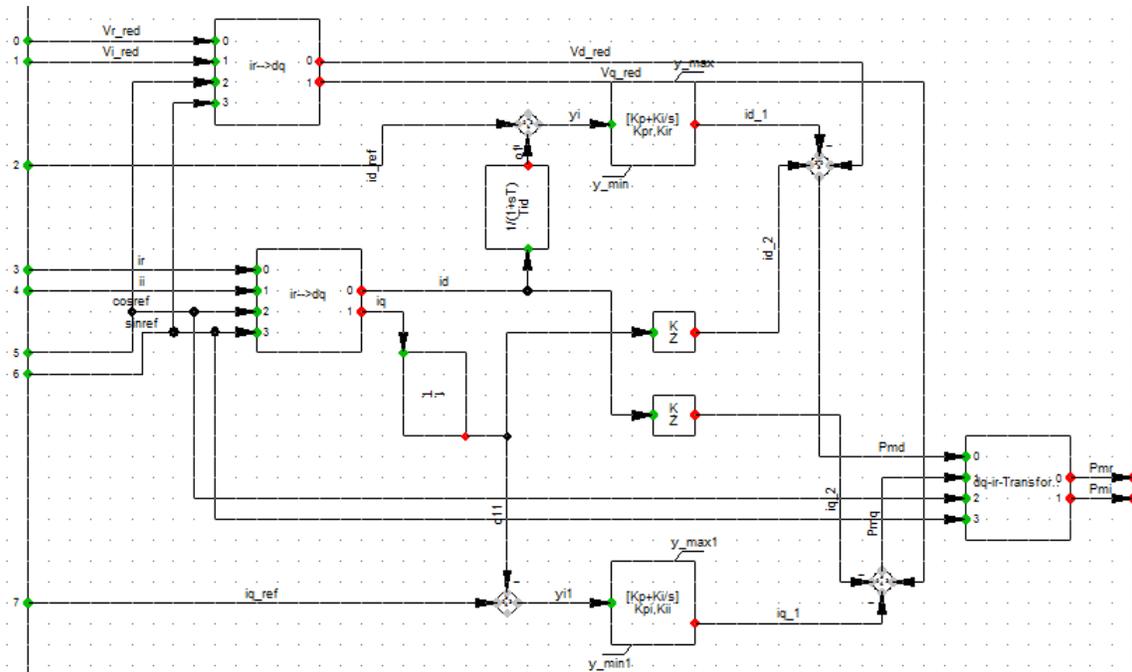
**Figura 6.3 Lazo de Control de Voltaje DC**

El control maestro del voltaje DC se programa igual a Matlab, como un simple control tipo PI.



**Figura 6.4 Control Tipo PI**

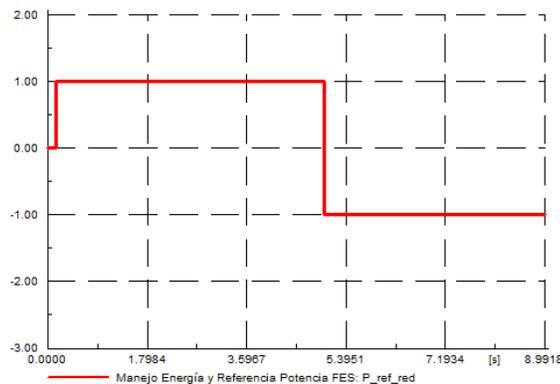
El control de corriente corresponde a dos controladores tipo PI esclavos. Al igual que lo programado en Matlab, mediante la transformada de Clark se obtienen las variables en eje directo y en cuadratura de corriente y voltaje de salida del transformador. Se mantiene la corriente de eje en cuadratura igual a cero para obtener un factor de potencia igual a uno y la referencia de corriente de eje directo proviene del control de voltaje directo. El lazo del control esclavo de corriente se muestra en la Figura 6.5.



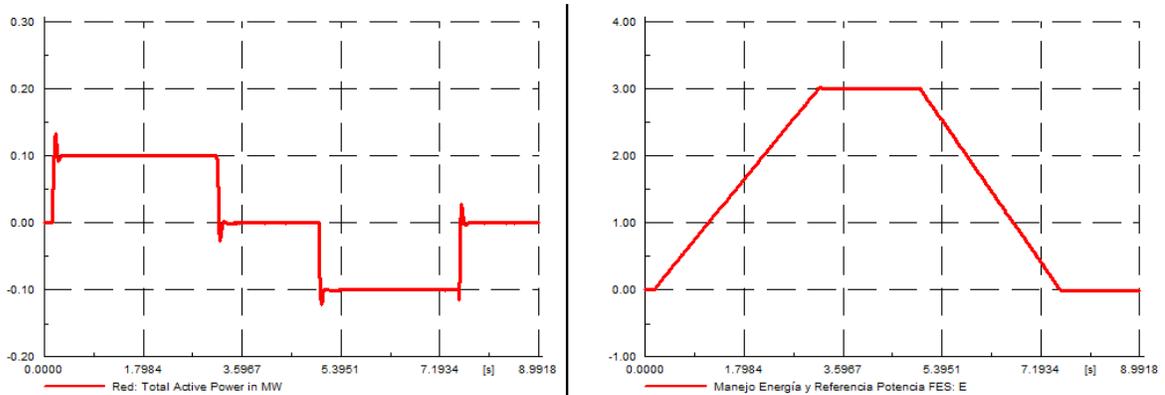
**Figura 6.5 Control de Corriente y Cálculo de voltaje de referencia**

Si se compara el lazo de control anterior con el lazo de control programado en Matlab son iguales, pero la diferencia radica en el valor que se obtiene en el proceso de ajuste para cada controlador.

El dispositivo de la Figura 6.2 tiene una capacidad infinita de almacenaje y de generación. Es por esto que se programó un control de energía que permite simular el funcionamiento real, considerando también la eficiencia del sistema. Bajo una referencia de potencia como se ve en Figura 6.6, la respuesta de la potencia y la estimación de la energía se grafica en la Figura 6.7, considerando 3 segundos de almacenamiento (valor arbitrario y sólo explicativo, se programó como un parámetro que luego se deja con los 15min correspondientes) y una eficiencia de un 85%.



**Figura 6.6 Referencia de potencia**



**Figura 6.7 Potencia de Salida y Energía del FESS**

A pesar de que la referencia de potencia está al 100% hasta el segundo 5, el FESS tiene una capacidad de 3 segundos de almacenaje, por lo que al tercer segundo el modo almacenar energía se detiene y es imposible seguir inyectando potencia al FESS.

Al quinto segundo, la referencia cambia a liberar energía y el FESS actúa. Como se tiene una eficiencia de un 85%, la energía almacenada se libera en 2.55 segundos y no en 3 segundos como sería en un sistema 100% eficiente.

Esta operación es conveniente para casos en donde se tenga que realizar estudios con cualquier tipo de almacenamiento de energía con poca capacidad.

Nótese que lo programado es general y se podría ocupar como cualquier otro dispositivo de almacenamiento de energía. Se diferenciará entonces la respuesta del FESS con otro dispositivo ajustando los controladores adecuadamente para lograr una respuesta similar a la obtenida en Matlab.

### 6.3 Ajuste de controladores

Al igual que en Matlab, se ajustaron los controladores mediante prueba y error, con la diferencia que realizar este proceso en Digsilent es mucho más simple dado que se tienen sólo tres y no seis controladores PI.

Para realizar lo anterior se siguieron los mismos pasos que en Matlab. Primero se ajustó la respuesta de corriente para que al aplicar una referencia de escalón en eje directo resulte un tiempo de respuesta similar a los 20mseg, pero por motivos del diferente método de resolución del circuito o por el diferente tamaño de paso de integración, la respuesta ajustada a este valor sumado con el control PI de voltaje dan problemas de estabilidad.

Se decidió entonces ajustar el control completo con un nuevo objetivo. Se variaron los tres controladores pi de forma de tener una respuesta similar a la obtenida en Matlab, teniendo en cuenta además que el lazo de control que desacopla el eje

directo con el eje en cuadratura (que resulta ser la impedancia del filtro, ver sección 3.2.7) también se variará para este objetivo.

De esta manera el ajuste de los controladores resulta:

Corriente:  $K_i = 3$  ;  $K_p = 0,1$

Voltaje:  $K_i = 200$  ;  $K_p = 15$

Desacople:  $L = 0,08$

## 6.4 Comparación de ambos modelos

Se comparará el modelo en Digsilent con el modelo en Matlab. Ambos circuitos son similares pero no iguales.

Las diferencias son:

- Diferentes algoritmos de resolución del circuito.
- Diferentes tiempos de paso de integración, en Digsilent se aplica un paso de integración de 0,01seg variable, mientras que en Matlab se aplica simulación tipo “continua”, la que aplica un paso de integración variable menor de 5useg, que es lo necesario para obtener buenos resultados con los convertidores de potencia a la frecuencia de conmutación considerada.
- Diferentes topologías. Al establecer una referencia tipo escalón de potencia en Matlab, lo que responde es el control de la máquina de imanes permanentes, mientras que en el modelo de Digsilent responde la fuente de corriente ideal, secundariamente en ambos modelos responde el conversor de potencia que mantiene el voltaje DC constante.
- En el modelo de Matlab, la respuesta al escalón depende de la velocidad de la máquina.

Teniendo en cuenta las diferencias anteriores, se comparará la respuesta en un escalón de potencia de ambos circuitos en el tiempo, considerando tres tiempos de partida inicial en Matlab.

Las especificaciones de respuesta en el dominio del Tiempo para comparar ambas respuestas serán las de la Figura 6.8.

- MOV: Sobrenivel Máximo
- Retardo  $t_d$ : Tiempo requerido para alcanzar el 50% del valor final ( $y_{ss}$ )
- Tiempo de Subida  $t_r$ : tiempo requerido en ir desde el 10% al 90% del valor final
- Tiempo de estabilización  $t_s$ : Tiempo requerido para que la respuesta sea mayor al 95% y menor al 105% del valor de referencia.

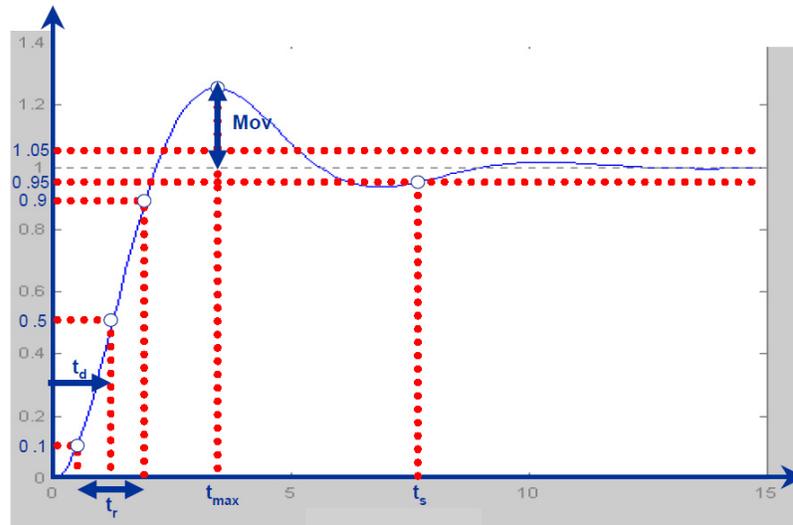


Figura 6.8 Especificaciones en el dominio del Tiempo [42]

Se aplicó un escalón de referencia de potencia a los 0,15 segundos, el resultado es:

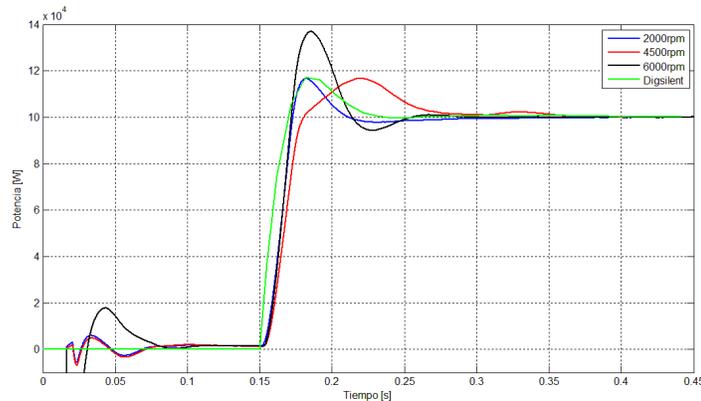


Figura 6.9 Matlab y Digsilent, Respuestas

Curva	MOV	td (seg)	tr (seg)	ts (seg)
2000rpm	16%	0,18seg	0,1643	0,200
4500rpm	17%	0,22seg	0,1668	0,255
6000rpm	37%	0,18seg	0,1645	0,234
Digsilent	17%	0,18seg	0,1574	0,213

Tabla 6.1 Parámetros de las curvas

- Análisis

La respuesta del modelo en Digsilent tiene una forma de onda similar a la respuesta correspondiente a los 2000rpm. Poseen el MOV, en el tiempo de estabilización y subida prácticamente iguales. En el tiempo de retardo difieren ya que la respuesta en Digsilent se inicia de manera curva y por lo que llega al 50% de forma más rápida, mientras que la respuesta en Matlab inicia de manera recta.

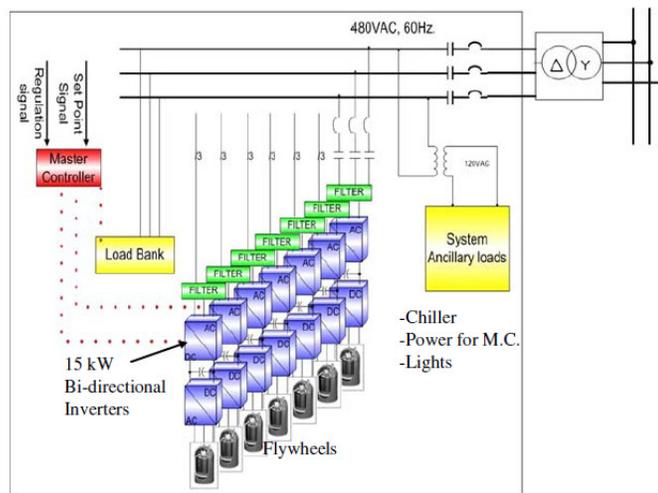
Comparando con las respuestas a 4500rpm y 6000rpm, se tienen diferencias en todos los tiempos, pero no existen diferencias apreciables excepto en el MOV que se da en el caso de la respuesta a 6000rpm. Estos resultados son satisfactorios teniendo en cuenta que ambas respuestas se obtuvieron en distintos programas y distintos métodos de resolución.

Como se concluyó en el capítulo 4, la respuesta de Matlab depende de la velocidad inicial de partida, pero en el caso de Digsilent sólo se tiene un tipo de respuesta.

La diferencia que se presenta entre las simulaciones entre ambos programas se considerará que no es un factor que cambia de gran forma los resultados en los sistemas interconectados, debido a que el tiempo de análisis en esta etapa es del orden de segundos y la diferencia de las respuestas radica en el orden de los milisegundos.

## 6.5 Control y Respuesta Parque FESS

Una configuración comercial actual de estos dispositivos, se puede ver en la Figura 6.10.



**Figura 6.10 Parque FESS [38]**

Un parque FESS es de fácil control debido a que cada máquina tiene su propia conexión a la red AC mediante dos convertidores de potencia, obteniéndose dispositivos totalmente independientes entre sí.

Para obtener la energía almacenada en el parque, simplemente se necesita la velocidad de rotación de cada máquina y se suma la contribución individual de cada una.

Según las especificaciones técnicas del parque comercial en [14], se tiene una respuesta de cuatro segundos para ir de máxima potencia de almacenaje a máxima potencia de generación.

El FESS de 0,1MW diseñado pasa de cero a máxima potencia en el orden de los 200mseg. Por lo que un parque construido a partir de éstos también tiene el mismo tipo de respuesta. Se considera que esta diferencia puede deberse a varios factores que no se tomaron en cuenta. Los factores pueden ser:

- Restricciones mecánicas de aceleración.
- Como el parque consta de cientos de unidades individuales, se podría reducir costos considerando inversores con un menor tiempo de respuesta.
- Respuesta ajustada a una operación del orden de tiempo de los 4 segundos por criterios del operador. Una razón para hacer esto es evitar el comportamiento oscilante que se tiene, por ejemplo, en Figura 4.13.
- Respuesta más lenta al haber varios FESS en paralelo y utilizar un control centralizado común.

## 6.6 FESS de mayor potencia

Para construir un FESS de mayor potencia en Digsilent se podría construir un parque de FESS como en la Figura 6.10 o escalar sólo un dispositivo a la potencia deseada.

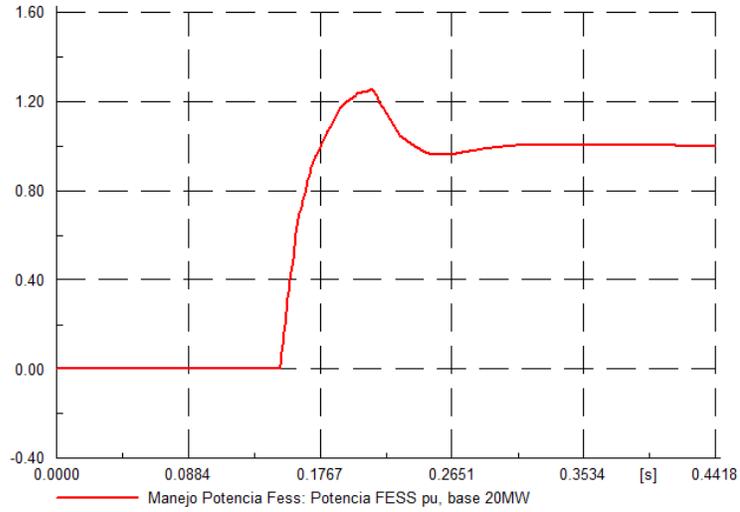
Para obtener un FESS de 20MW, se necesitan 200 dispositivos de 0,1MW, por lo que se eligió utilizar la segunda opción.

Al escalar la potencia de un dispositivo, se debe escalar la corriente nominal de la fuente de corriente y escalar también el condensador a valores adecuados.

- Corriente nominal:  $113,6363 \cdot 20 = 2272,72A$
- Condensador:  $13000 \cdot 20 = 260000\mu F$

El valor de los controladores se modificó puesto que se tenía una respuesta distinta al cambiar estos valores. Los nuevos valores resultan:

Corriente:  $K_i = 3$  ;  $K_p = 0,1$   
Voltaje:  $K_i = 200$  ;  $K_p = 15$   
Desacople:  $L = 0,04$



**Figura 6.11 Respuesta FESS 20MW**

La respuesta es prácticamente la misma que para el FESS de 0,1MW. La única diferencia es que el elemento inductivo que indica el acople entre ambos ejes se debe disminuir.

## Capítulo 7 Conexión al SIC

Se conectará el FESS de 20MW al SIC para obtener aplicaciones reales de este dispositivo de almacenamiento de energía.

Se evaluarán dos aplicaciones. El primero consiste en ayudar a mantener la seguridad de suministro mediante el control de transferencia de una línea con problemas de capacidad y el segundo consiste en tratar de evitar el vertimiento eólico debido al mismo problema de capacidad de la línea.

Para ambas aplicaciones se programa un control que toma como referencia la potencia de la línea y opera según lo explicado en este capítulo.

El SIC es un sistema de potencia representado en Digsilent con más de cinco mil barras. Primero se obtendrá un modelo simplificado de 4 barras y luego se obtendrán los resultados aplicando escenarios tanto con FESS y sin FESS.

### 7.1 Antecedentes SIC

Se espera que la demanda del área norte del SIC se duplique entre los años 2012-2017 por la conexión de numerosos proyectos mineros en la tercera región del país.

A pesar de que existe energía para proveer este aumento de demanda, no existe actualmente la capacidad de transmisión necesaria para llevar esta energía del centro-sur del país hasta los consumos del norte. Esta situación obligó a generar a los organismos regulativos proyectos de transmisión en 500kV que resolverían el problema, pero se estima que estarán operativos a finales del 2017.

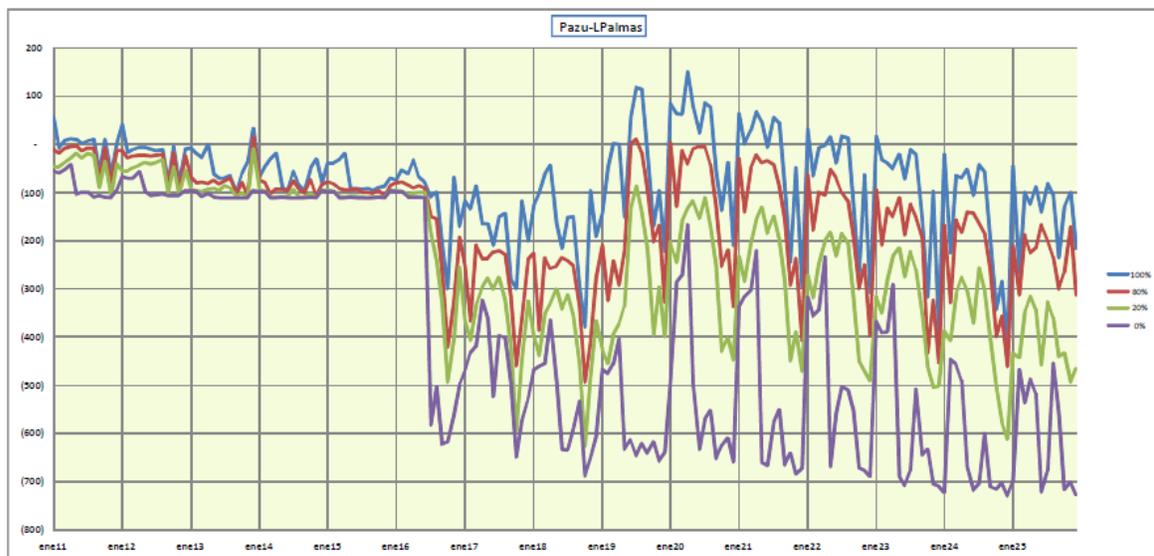


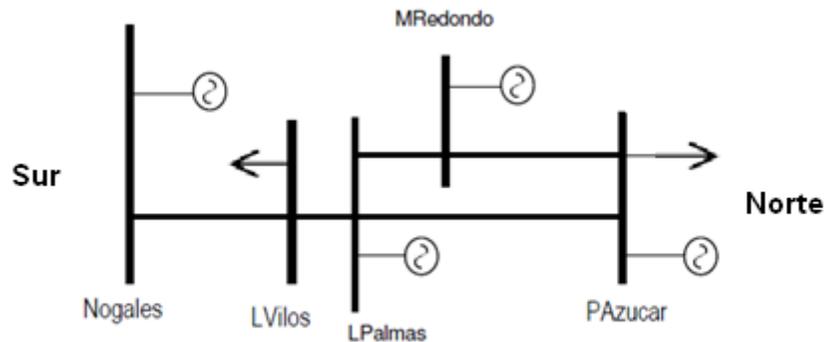
Figura 7.1 Proyección de Carga en línea Pan de Azúcar-Las Palmas 220 [39]

La Figura 7.1 muestra el resultado del estudio de transmisión troncal (ETT) para el tramo Pan de azúcar-Las Palmas 220kV en un circuito bajo distintas hidrologías. Se grafica la carga de la línea y cómo esta varía en el tiempo con la entrada en operación de nueva línea en paralelo con este tramo que entrará en operación el 2016.

Para mitigar en algún grado este problema, se propone aumentar la capacidad de transporte de la actual línea de transmisión utilizando la inyección de potencia activa en el lado receptor mediante FESS. Además se propone una segunda aplicación que consiste en evitar el vertimiento eólico bajo estas condiciones.

## 7.2 Modelación SIC

Se modeló en Digsilent la parte del SIC que debería tener problemas en los siguientes años.



**Figura 7.2 Diagrama unilineal modelación SIC**

Las transferencias de las líneas de interés son

- Nogales-Los Vilos 220: 224MVA (doble circuito).
- Las Palmas-Pan de Azúcar 220: 224MVA (doble circuito).

Los valores de generación y demanda futura que se utilizan en el modelo fueron obtenidos mediante el método PLP, valores respaldados con la estimación realizada en el ETT 2010.

El equivalente sur en la barra Nogales se modeló con dos generadores. El 60% de la generación se modeló de manera térmica, considerando controladores genéricos de la librería Digsilent. El otro 40% de la generación se asignó a un segundo generador, que se modeló como máquina hidráulica, considerando nuevamente controladores genéricos.

Las cargas en cada barra se modelaron de manera estática y el generador equivalente norte se modeló de manera similar al generador térmico del sur, con sus mismos controladores pero con una mayor potencia activa.

Los generadores eólicos del modelo, se modelaron de forma estática, sin controlador en particular dado que modelarlos se escapa del alcance de esta memoria.

La reserva en giro total es provista por el generador hidráulico del sur, siendo su magnitud del orden de los 200MW, lo que es suficiente para el estudio que se hará en este trabajo.

El pequeño SIC así modelado, consiste en una capacidad instalada cercana a los 1100MW, por lo que no se espera que la operación del sistema sea exactamente igual al del SIC real, que tiene una capacidad instalada del orden de los 13000MW, sino que se espera mostrar la operación en un área de interés, considerando que las aplicaciones consideradas son características locales del sistema.

### 7.3 Control de transferencia Nogales-Pan de Azúcar

Se sabe que a partir del año 2011, el tramo desde la subestación Nogales a la subestación Pan de Azúcar 220 progresivamente dejará de cumplir el criterio N-1, siendo necesarios ajustes previos de despacho para regular los flujos de esta línea. En el 2018 se espera la introducción de circuitos en 500kV que resolverán este problema.

Las variables de control en este caso son:

- Variable de control: Carga de la Línea
- Variable manipulada: Corriente DC
- Actuador: Fuente de Corriente

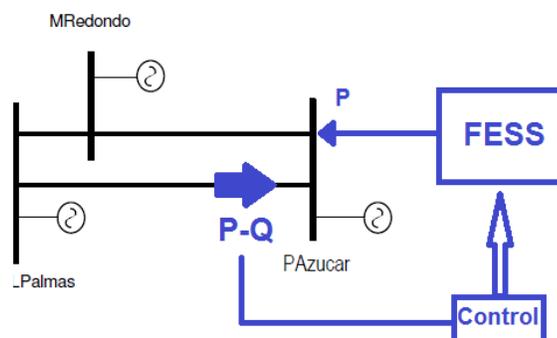
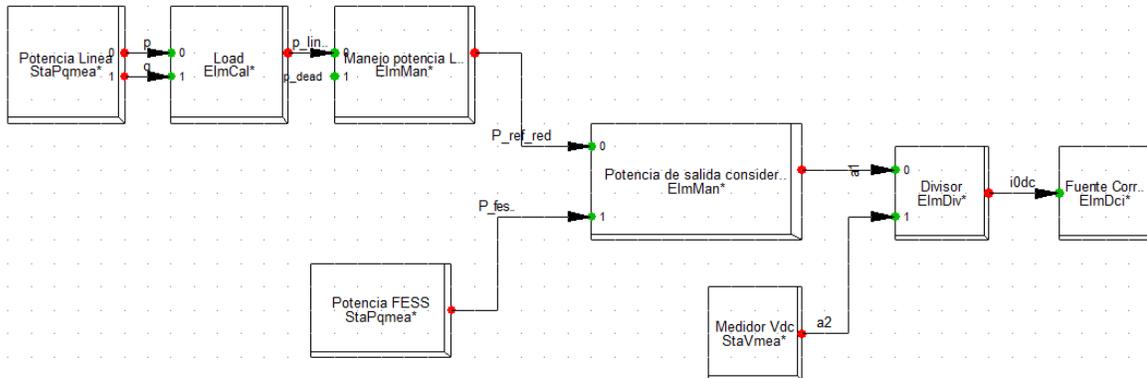


Figura 7.3 Esquema de funcionamiento control de Transferencias

El FESS se conecta a la barra Pan de Azúcar para que la operación influya tanto en el flujo de la línea Nogales-Los Vilos como en el flujo de la línea Las Palmas-Pan de Azúcar.

Se programan dos tipos de control de transferencia que luego se compararán. Ambos obtienen la potencia activa y la reactiva de la línea objetivo y luego calcula la

carga total de la línea. Este cálculo luego pasa por los controles tipo P o PI con banda muerta que obtienen la referencia de potencia activa necesaria como referencia a la fuente de corriente (Figura 7.4).



**Figura 7.4 Control de Transferencias**

El control de Transferencia con control tipo PI opera de la siguiente manera

- Si la línea se encuentra bajo 49% de carga, mantiene al FESS completamente cargado.
- Entre 49% de carga y 50% de carga, el FESS se mantiene activo o en reposo, dependiendo de la carga de la línea.
- Superior al 50%, el FESS opera entregando potencia activa y disminuyendo la carga de la línea dentro de la banda muerta del controlador.

El control de Transferencia con control tipo P opera de la siguiente manera:

- Si la línea se encuentra bajo 49,1% de carga, mantiene al FESS completamente cargado.
- Entre 49,1% de carga y 49,9% de carga, el FESS se mantiene activo o en reposo, dependiendo de la carga de la línea.
- Superior al 49,9%, el FESS opera entregando potencia activa y disminuyendo la carga de la línea dentro de la banda muerta del controlador.

La barra Pan de Azúcar ya posee compensación estática de reactivos (CER), por lo que se considera que no es necesario que el FESS opere además como un STATCOM, lo que en la práctica es posible dado que el puente DC lo permite. La única diferencia es que el control del convertidor de potencia cambia y además el condensador se diseña considerando tanto la potencia activa y la reactiva a compensar.

La capacidad de mejorar la transferencia depende de la potencia instalada del FESS y de la capacidad de almacenamiento. Como se ve en la Figura 7.1, la demanda al norte será cada vez mayor, estimándose un crecimiento mayor a 20MW [39], lo que implica que para evitar al 100% la sobrecarga de la línea, se debería instalar un dispositivo bastante mayor al más grande que actualmente se está evaluando en Estados Unidos.

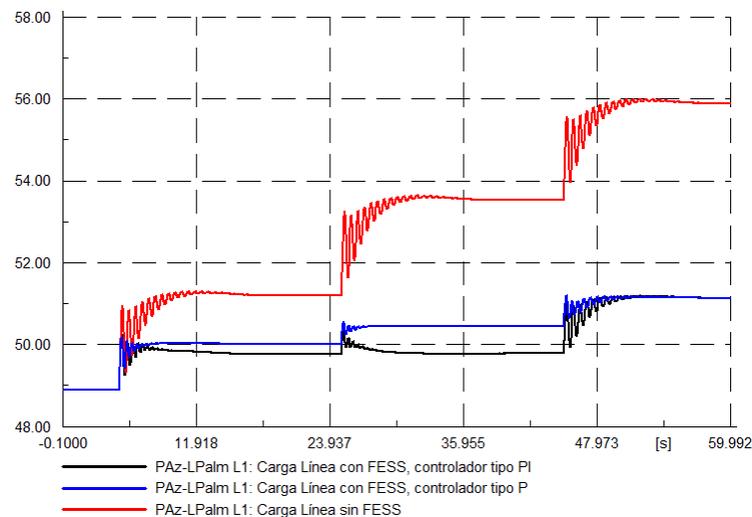
Es por lo anterior que esta medida se ve como paliativa y no como una solución. Se conectará un FESS de 20MW con 5MWh (15 minutos de almacenamiento) de capacidad.

Se presentarán resultados de 3 escenarios:

- Escenario base o Sin FESS.
- Escenario Con FESS, Control tipo proporcional.
- Escenario Con FESS, Control tipo integral.

### 7.3.1 Resultado y análisis

Se programó un escenario ideal en donde la línea se encuentra con 48,96% de carga. Se simularán aumentos en la demanda del norte que resultaran en una sobrecarga de la línea violando el criterio N-1 durante el aumento de la demanda.



**Figura 7.5 Variación de la Carga de la Línea en los Escenarios**

La Figura 7.5 indica las variaciones de carga en la línea Pan de Azúcar en el tiempo para los 3 escenarios. Se considera que el criterio N-1 se rompe cuando la línea se encuentra con una carga mayor al 50%, dado que a la línea le será imposible transmitir toda la potencia si es que se tiene una contingencia que obligue a desconectar uno de los dos circuitos.

En un principio, la línea se encuentra con una carga de un 48,88%. A los 5 segundos se aplica un incremento de carga en el norte de 1,5%, lo que implica una variación cercana a 9MW de potencia activa en su extremo receptor, luego, otro incremento de carga a los 25 segundos de 1,5%, lo que resulta en un incremento total de 18MW, para finalizar con otro incremento de 1,5% llegando a una carga total final de 637MW al norte de Pan de Azúcar. Descontando la generación propia del norte, la carga de la línea finalmente se encontraría a un 56% de carga (línea roja de la Figura 7.5, escenario sin FESS).

Después de la primera perturbación, en cada escenario los controles individuales de cada máquina operan. La máquina que posee reserva en giro corresponde a la hidráulica del sur, por lo que la potencia debe ser entregada por las líneas del tramo analizado, lo que implica que sus cargas comienzan a elevarse. Sin FESS, la línea Pan de Azúcar-Las Palmas es la más afectada llegando a 51,2%.

En el escenario con FESS y control de transferencia tipo PI obliga a operar cuando la línea sobrepasa el 50%, resultando en la inyección de potencia activa en Pan de Azúcar y bajando la carga de la línea a límites aceptables (en este caso a 49,7%).

No se baja la carga de la línea exactamente al 50% debido a que la acción integral del control no lo permite. El control PI no tiene como objetivo operar con la línea exactamente al 50%, sino que opera para llevar la carga de la línea bajo este valor donde se encuentra la banda muerta. Al llegar a la banda muerta, el control deja de actuar, por lo que el valor final se mantiene y no se llega al óptimo del 50%.

Para mejorar lo anterior se programó el tercer escenario, que corresponde a eliminar la parte integral del control y sólo operar con un control proporcional. En este tipo de escenario se debe tener en cuenta que debido su error permanente tampoco se llega a la referencia del 50%, pero se asegura llegar a valores cercanos. Tampoco se asegura de que el valor final sea mayor o menor a 50%, que es la gran desventaja de este control.

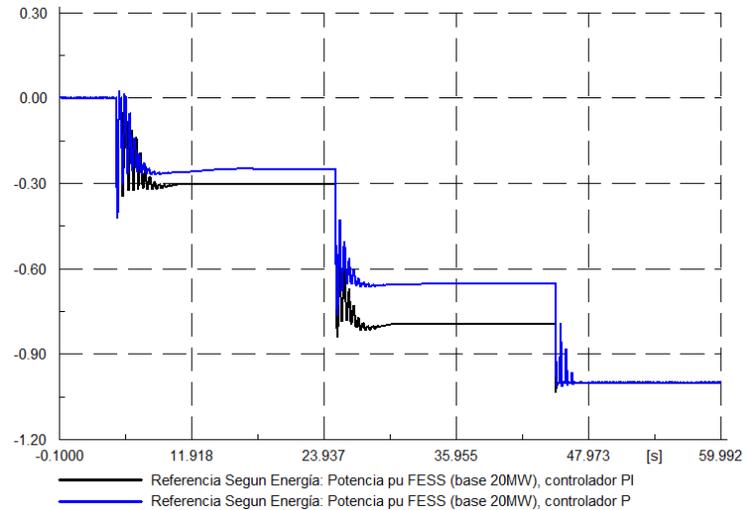
En particular, para la primera perturbación aplicada, el FESS con control proporcional llega al 50,02%, un valor muy cercano al óptimo, pero fuera del rango de banda muerta.

A los 25 segundos, se incrementa nuevamente la carga al extremo norte. En el escenario sin FESS, la carga de la línea se incrementa a 53,65%.

En el escenario con FESS más control tipo PI, la respuesta absorbe todo el incremento de carga, dado que el aumento se realiza cuando la línea opera muy cerca del 50%. En este caso el valor final de la carga también llega al 49,7%.

En el escenario con FESS con control tipo proporcional, la respuesta es inaceptable. El error permanente de este control se acumula y la carga de la línea se estabiliza finalmente en 54,44%, por lo que se podría concluir que este control no sirve para estos propósitos.

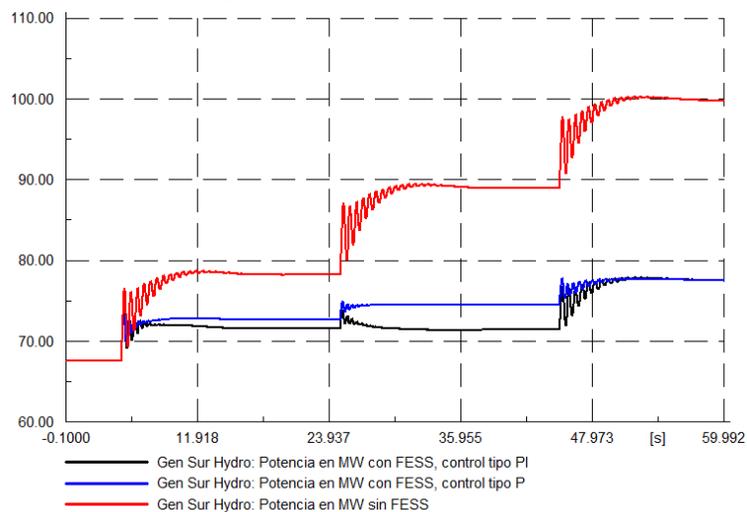
A los 45 segundos, se aplica otro incremento de carga, llegando en total a un incremento de 27MW. En este escenario, ambos controles pierden su capacidad de regulación de carga, dado que el FESS llega a su límite de potencia.



**Figura 7.6 Aporte FESS control de transferencias**

En la Figura 7.6 se muestra el aporte del FESS dado los distintos tipos de controladores en los distintos tiempos. En el control proporcional se obtiene la menor respuesta ante perturbaciones de carga al norte, lo que se traduce en un mal control cuando la potencia de la línea aumenta cuando se encuentra cercana, pero bajo el 50% de carga.

La respuesta con control tipo PI inyecta una mayor cantidad de potencia en comparación con el control tipo P. A los 5 segundos, esta operación es menos óptima, dado que inyecta más energía de lo necesario, pero realiza el objetivo principal que es mantener la carga bajo el 50%.



**Figura 7.7 Aporte de la Generación del Sur**

La capacidad de generación es provista por el sur. En la Figura 7.7 se puede notar como el control del FESS influye en la respuesta de la regulación realizada por el generador hidráulico del sur. Mediante estos gráficos también se puede concluir que la mejor respuesta se tiene en el escenario con FESS con control tipo PI dado que se tiene la menor regulación por parte de los generadores.

### **7.3.1.1 Evaluación Económica**

En la actualidad no existe un marco regulatorio que asegure el pago por el servicio que provee para este tipo de aplicación. Si se quiere evaluar económicamente este dispositivo, se debe evaluar el costo de oportunidad del dispositivo.

En el modo carga, se busca comprar energía al menor precio posible, que es cuando la línea se encuentra desocupada y el sistema eléctrico aguas arriba de Pan de Azúcar toma los valores según el costo marginal del sistema completo, que correspondería al mejor de los casos.

En el modo descarga se opera cuando la línea llega a su límite N-1, lo que asegura entregar energía cuando el sistema del norte se desacopla con el del sur. Esto quiere decir que los costos marginales del norte ya no se calculan considerando las inyecciones del sur, lo que implica calcular los costos marginales teniendo en cuenta los propios costos variables de la generación al norte de Pan de Azúcar, lo que eleva casi al doble los costos marginales de cada barra al norte de la barra Nogales (precios estimados de [39]).

Además, se estima que la generación de las unidades de Guacolda (generación base del norte de Pan de Azúcar) no será suficiente para satisfacer la demanda, por lo que máquinas aún más caras tendrán que aportar su energía para controlar las transferencias por estos tramos, elevando el costo marginal de la barra conectada al FESS.

Para evaluar el FESS entonces se debe estimar:

- Costo Marginal de compra de energía.
- Costo Marginal de venta de energía.
- Energía total comprada diariamente.
- Energía total liberada diariamente.

Para estimar la energía total, se debe conocer la curva de transferencia de la línea. Considerando que los consumos al norte de Pan de Azúcar consisten de una base de consumos mineros “constante” y otra residencial se establece que el criterio óptimo de operación es comprar barato y vender caro una vez al día. El problema luego está determinar cuántos días al año opera el FESS. Se considerará el escenario más favorable que es cuando opera todos los días.

La vida útil teórica del sistema cuándo se opera entre 7 y 13 ciclos de carga y descarga al día es de 20 años [14]. Con una operación como la que se está evaluando, se estima que el sistema tiene 1 ciclo de carga y descarga al día, por lo que se espera que la vida útil se incremente. En este caso se considerará un periodo de evaluación de 40 años.

El costo de inversión se extrapoló de la Tabla 2.2, considerando un factor 1,8 por escala. Es decir, el sistema completo de 20MW con 5MWh de capacidad tiene un costo alrededor de 10,8 millones de dólares.

Si se realiza lo anterior, considerando que la diferencia entre el precio de compra y el de venta promedio anual es de 100mills/kWh, se tiene una TIR (tasa interna de retorno) de -2,8% (ver Anexo 3). El resumen se puede ver en la Tabla 7.1.

Costo inversión	\$ 10.800.000
Costo energía	\$ 50
Venta energía	\$ 150
costo OP_Mant	\$ 25.000
eficiencia	0,9
años	40
<b>TIR</b>	<b>-2,88%</b>

**Tabla 7.1 Evaluación a 40 años, 1 ciclo de operación diario**

Se concluye que este proyecto no es económicamente viable, dado que el periodo de evaluación es de 40 años, se toma una eficiencia de 0,9 que es relativamente alta y su TIR es negativa.

El problema económico de esta aplicación, además que se debe comprar energía para operar, es que opera muy pocas veces en el día. Si el sistema operara más veces al día podría llegar a ser un proyecto atractivo dado que es exactamente la ventaja que tienen los FESS sobre los BESS (su vida útil permanece prácticamente igual con los ciclos de carga y descarga).

Por ejemplo, si se estimaran 2 ciclos de carga y descarga al día, se tendría una TIR de 0,6% en 40 años. Si se utiliza 7 veces al día durante 20 años (que es lo indicado por el proveedor) se tiene una TIR de 8,39%, pero este tipo de operación es improbable en este ejemplo porque cualquier tipo de curva de carga no permite una operación de este estilo.

Un análisis sobre el impacto del número de veces en que el dispositivo se carga y descarga en el día sobre la evaluación económica del mismo tomando los datos básicos de la Tabla 7.2 se puede ver en la Tabla 7.3. De este análisis se puede ver que se esperan VAN positivos considerando una tasa de retorno de un 10% a partir de 8 ciclos de operación esperada diaria.

Energía total FESS [MWh]	\$ 5
Costo energía [mills/kWh]	\$ 50
Venta energía [mills/kWh]	\$ 150
costo OP_Mant [US\$]	\$ 25.000
eficiencia	0,9
años	20

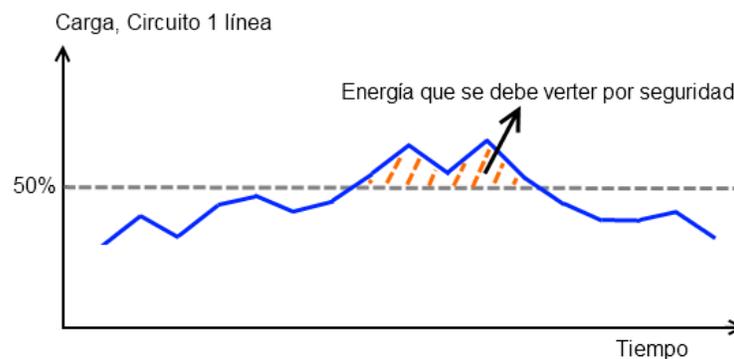
**Tabla 7.2 Datos Básicos de Tabla 7.3**

N° de ciclos diarios	TIR
2	-4,9%
3	-1,3%
4	1,6%
5	4,1%
6	6,3%
7	8,4%
8	10,3%
9	12,2%
10	14,0%
11	15,7%
12	17,4%
13	19,1%
14	20,7%

**Tabla 7.3 N° de ciclos V/S TIR**

## 7.4 Control de Vertimiento Eólico

Con el objetivo de analizar una aplicación donde el costo de almacenar energía es cero, se evalúa una segunda alternativa para el control de transferencias del FESS.

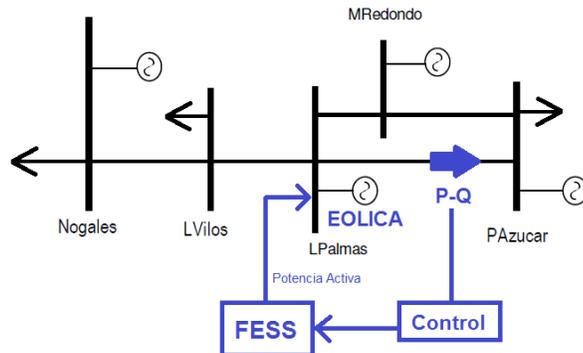


**Figura 7.8 Potencia por la línea debido a Generación Eólica**

Si la línea de doble circuito se encuentra en su límite, cualquier generador eólico conectado a la barra Las Palmas tiene que “verter” la energía que produce para mantener la seguridad del sistema (Figura 7.8). En vez de desechar la energía en

ese momento, se propone almacenarla en el FESS de tal manera de poder liberarla cuando sea conveniente.

Se conecta el FESS en la barra Las Palmas midiendo la transferencia de la línea Las Palmas–Pan de Azúcar.



**Figura 7.9 Esquema de funcionamiento de control de vertimiento**

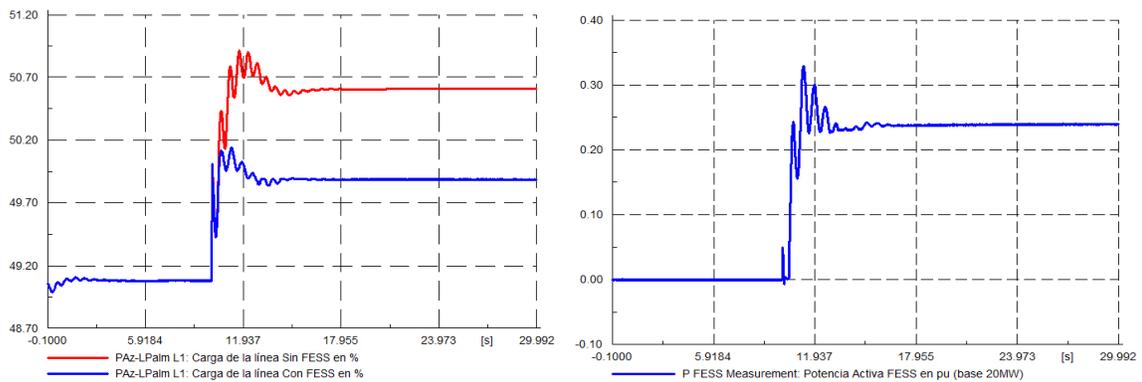
El control es similar al caso anterior. Lo que se busca es controlar la transferencia de la línea en la parte emisora de la de la línea, evitando de esta manera el vertimiento almacenando esa energía. Este control opera de la siguiente manera

- Si la línea se encuentra sobre el 50% y además el parque eólico inyecta energía, el FESS almacena la energía generada por parque.
- Si la línea se encuentra sobre el 50% y el parque eólico no inyecta energía, el FESS se mantiene en reposo.
- Si la línea se encuentra bajo el 50%, el FESS se mantiene en reposo.

Nótese que la operación es similar a la aplicación anterior, por lo que se usó el control ya programado (Figura 7.4), con la diferencia que en este caso el dispositivo debe almacenar energía cuando en la aplicación anterior se liberaba y viceversa, por lo que sólo basta un cambio de signo en los controladores para realizar las simulaciones correspondientes.

Se simulará una generación brusca de 10MW eólicos en la barra Las Palmas en el segundo 10 y se presentarán los escenarios con FESS y sin FESS.

## 7.4.1 Resultado de control de vertimiento



**Figura 7.10 Carga de Línea con control de vertimiento y Potencia FESS**

Como se puede apreciar, el FESS permite que la línea opere en su límite técnico cuándo existe una alta generación eólica no prevista.

La máxima capacidad de absorción de potencia es de 20MW. En las simulaciones solo se llega a absorber cerca de 5MW de potencia activa de los 10MW inyectados dado que la línea aún cuenta con 5MW de potencia activa para llegar al 50% de capacidad.

## 7.4.2 Análisis económico.

El análisis económico de esta aplicación no se encuentra regulado, por lo que se realizará una estimación básica de cómo puede ser valorada esta operación del FESS.

El costo de la energía almacenada es cero, puesto que es energía que se obtiene del viento con el motivo de mantener la seguridad del sistema. La energía puede ser liberada en cualquier hora del día, por lo que el ingreso económico de este tipo de aplicación corresponde a la liberación de la energía absorbida en otro instante del día, con el objetivo de obtener el mayor ingreso posible.

Si se consideran los siguientes valores:

Costo inversión	\$ 10.800.000,0
Costo energía	\$ 0,0
Venta energía	\$ 150,0
costo OP_Mant	\$ 25.000,0
eficiencia	0,9
años	20

**Tabla 7.4 Datos de la evaluación**

Considerando un determinado número de operaciones diarias se obtiene:

N° de ciclos diarios	TIR
2	-0,7%
3	3,5%
4	7,1%
5	10,2%
6	13,1%
7	15,9%
8	18,6%
9	21,2%
10	23,7%
11	26,3%
12	28,8%
13	31,2%
14	33,7%

**Tabla 7.5 Evaluación económica según N° de operaciones**

Luego para un número mínimo de 5 operaciones diarias en 20 años, esta aplicación es económicamente favorable si se considera un rentabilidad mínima de un 10%.

Comparando esta aplicación con la anterior claramente es más favorable. El problema es que es una aplicación riesgosa dado que necesita que dos circunstancias sucedan de forma simultánea: Que la línea se encuentre operando muy cerca de su límite y que la generación eólica aumente. Entonces es necesario previamente analizar o estimar cuándo se dan ambas condiciones. Para ello se debe conocer tanto la curva de carga esperada de la línea como la curva estimada de generación diaria del parque eólico y comparar ambos datos para analizar si efectivamente ambas operaciones son coincidentes, puesto que puede suceder que la mayor generación eólica se dé en horas en que la línea no se encuentra con una carga importante, debiendo descartar esta aplicación como factible.

## Capítulo 8 Conexión al Sistema SING

Se conectará el FESS al SING con el objetivo de utilizarlo como fuente de reserva en giro. En el SING es obligatorio para cada generador en operación tener un 7% de reserva en giro para regulación de frecuencia primaria [32]. Esto obliga a los generadores a operar bajo su carga base, perdiendo eficiencia y cantidad de energía vendida.

El 7% de reserva en giro se divide en un 4% de reserva base y un 3% de reserva adicional. La reserva adicional se reembolsa a las empresas si cumplen ciertas condiciones dado que es considerado un sobre costo del sistema. [32]

Los dispositivos de almacenamiento de energía actualmente son considerados como alternativa válida para proveer el 4% de reserva base y así aumentar su propia generación en un 4%. Actualmente existen dos BESS asociados a dos generadores importantes del SING.

Como alternativa a la instalación de un BESS, se analizará la alternativa en el SING con FESS.

### 8.1 Modelación SING

En esta aplicación, se trató de que la operación del sistema fuera la más parecida posible a la real dado que la respuesta en frecuencia depende de la respuesta de cada uno de los controladores existentes en los generadores actuales. Se logró una modelación del SING en gran detalle gracias a que se creó una red a partir de la información presente en [39].

Se construyó un sistema alrededor de 150 barras, considerando todos los generadores y sus respectivos controladores al año 2012.

Para modelar los proyectos de generación del SING que entraron en operación en los últimos años (2010-2012), se tomó en cuenta su tipo de combustible y se utilizaron controladores de máquinas similares. En este caso se instalaron tres nuevos generadores a carbón relevantes, dado que tienen un costo variable barato e inyectan gran cantidad de potencia. Estos proyectos corresponden a las centrales Andinas, Hornitos y Angamos, cada se conectó a su respectiva barra.

Para modelar el despacho utilizado en la simulación, se tomó un despacho real del SING del mes de febrero de 2012, donde la generación neta total del sistema fue de 2.032MW, considerando una reserva en giro de un 7% y adecuando las demandas en las barras de forma proporcional teniendo como referencia las demandas de [39] para obtener el balance de potencia necesario para la estabilidad de frecuencia, resultando una demanda de 1.930,7MW

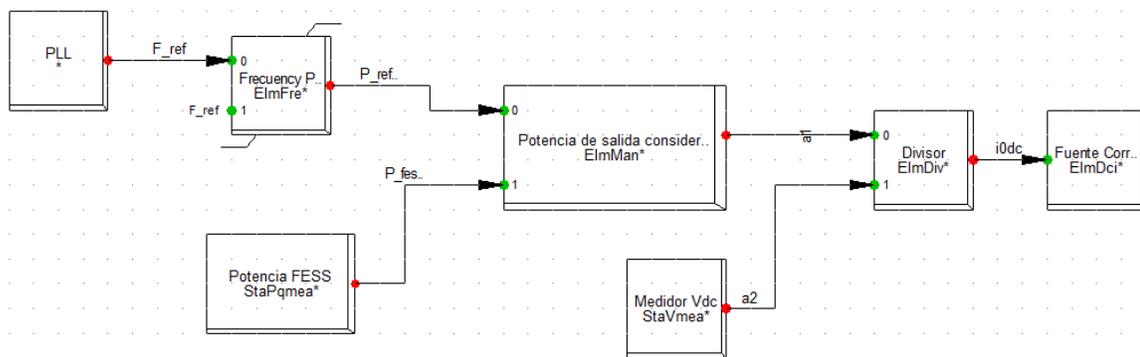
Realizando lo anterior, resultó una reserva en giro cercana a los 150MW, lo que está dentro de la norma mínima del sistema.

## 8.2 Control de frecuencia

El control de frecuencia es muy similar al control de transferencia de la línea programado anteriormente para el SIC, pero esta vez la variable controlada es la frecuencia y no la carga de la línea

- Variable de control: Frecuencia de la barra.
- Variable manipulada: Corriente DC.
- Actuador: Fuente de Corriente.

Se mide primero la frecuencia de la red que se compara con la referencia nominal de 50Hz. El control con banda muerta obtiene la referencia de potencia que el FESS debe entregar para aportar a la regulación de frecuencia primaria.

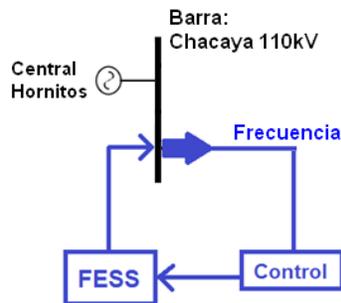


**Figura 8.1 Control de Frecuencia Digilent**

Se conecta a la red según el diagrama de la Figura 8.2. Su control es de tipo PI y funciona según la norma técnica [19], operando de la siguiente forma:

- Si la frecuencia está bajo los 49,8 Hz se inyecta potencia activa de la red.
- Si la frecuencia está sobre los 49,8 Hz y bajo 50,2 Hz el control del FESS no opera.
- Si la frecuencia está sobre el 50,2 Hz se absorbe potencia activa de la red

Se asoció este dispositivo a la central Hornitos, dado que se considera que es la más adecuada por su bajo costo variable, alta capacidad instalada y no tener instalado actualmente un dispositivo de almacenamiento.



**Figura 8.2 Conexión FESS al SING**

La central Hornitos cuenta con una potencia natural de 170MW, por lo que su reserva en giro total es de 11,9MW, de los cuales 6,8MW pertenecen a la reserva base y 5,1MW pertenecen a la reserva adicional. Sin FESS la central Hornitos debería operar inyectando una máxima potencia de 158,1MW, pero con FESS, Hornitos opera a una máxima potencia de 164,9MW, con 5,1MW de reserva adicional y los 6,8MW restantes de reserva los provee el FESS. Esto resumido se puede ver en la Tabla 8.1. Nótese que la instalación del FESS permite mantener la reserva en giro por norma aumentando la generación máxima de la central.

	sin FESS (MW)	con FESS (MW)
<b>Potencia Natural</b>	170	170
<b>Reserva en giro por norma</b>	11,9	11,9
<b>Potencia Máxima de operación</b>	158,1	164,9
<b>Reserva adicional de operación</b>	5,1	5,1
<b>Reserva base en operación</b>	6,8	0
<b>Reserva provista por FESS</b>	0	6,8

**Tabla 8.1 Operación de la Central Hornitos con FESS y sin FESS**

Nótese que a pesar de que está asociada a la central Hornitos, el FESS puede estar instalado en cualquier barra del sistema siempre y cuando tenga disponible el 4% de reserva asociada a Hornitos. En este caso, por simplicidad, se instaló en la misma barra que la central Hornitos.

### 8.3 Simulaciones dinámicas

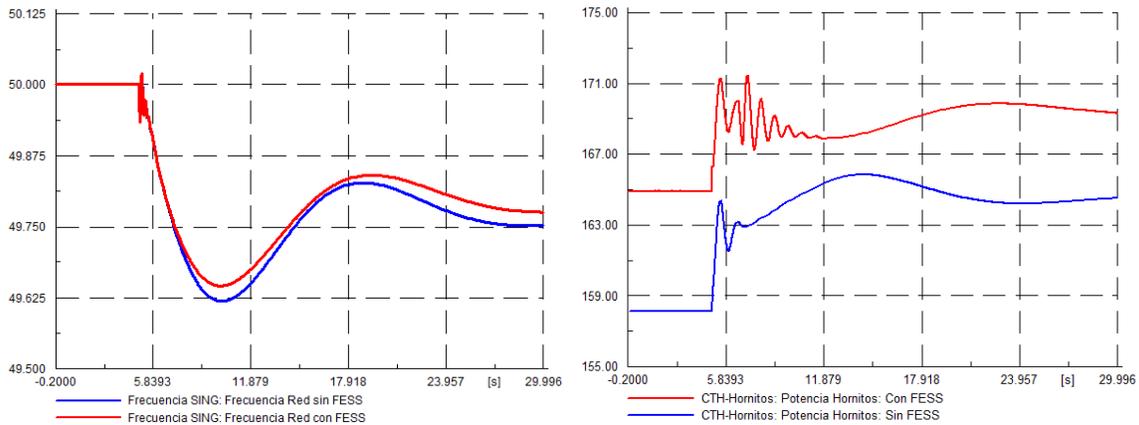
Se realizarán distintos tipos de escenarios para conocer la operación del sistema con FESS y sin FESS.

Los escenarios analizados son:

- Desconexión de un generador mediano
- Desconexión de un generador grande
- Desconexión de una carga mediana
- Desconexión de una carga grande

### 8.3.1 Desconexión de 72 MW generados

Se analizarán dos escenarios de 30 segundos, con FESS y sin FESS ante la falla del generador Tocopilla U13 (implementada como una carbonera con potencia natural de 78,2MW), a los 5 segundos, operando con una consigna de potencia de 72MW, correspondiendo a un 48% de la reserva en giro disponible



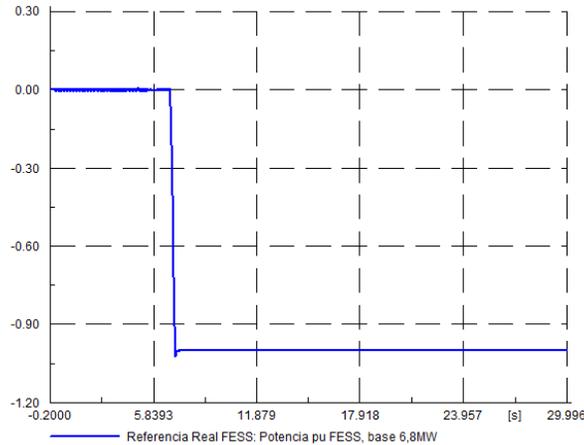
**Figura 8.3 Resultados de la Desconexión de 72MW generados**

En el escenario sin FESS, la regulación de frecuencia se realiza por medio de los controladores de cada máquina. Como la máquina debe aportar toda la reserva en giro, opera aportando 158,1MW a la red. La frecuencia cae a 49,62Hz y termina en 49,75Hz a los 30 segundos.

En el escenario con FESS, en la regulación se inyectan los 6,8MW de potencia del FESS de forma prácticamente instantánea (velocidad de respuesta menor al segundo) sumado a la respuesta de los generadores. La máquina inicialmente puede aumentar su generación a 164,9MW puesto que el resto de reserva en giro la aporta el FESS.

El FESS participa cuando la frecuencia cae por debajo de los 49,8Hz, por lo que no actúa en los primeros segundos de la perturbación. Al operar el FESS, la frecuencia cae finalmente a un valor de 49,65Hz y termina en 49,77Hz.

Nótese que la respuesta de frecuencia del sistema se ve mejorada cuando se inyecta potencia de esta manera donde la diferencia entre los escenarios radica en el incremento de la velocidad de respuesta del FESS, no existiendo una capacidad extra de reserva en giro.

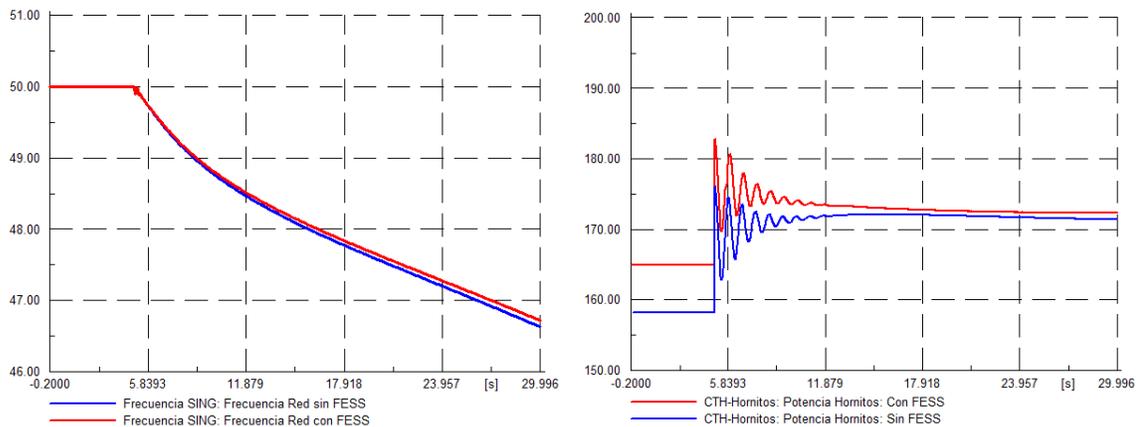


**Figura 8.4 Aporte de potencia Activa FESS**

De los 11,9MW de reserva sin FESS se ocupan cerca de 5,1MW para regular frecuencia, mientras que con FESS se ocupan 11,2MW. El uso de reserva en giro asociado a Hornitos es mayor en el escenario con FESS, dado que además del aporte de 6,8MW del dispositivo de almacenamiento, también operan los controladores de la central que ocupan el 3% de reserva adicional, elevando el aporte total de la central a la regulación de frecuencia primaria.

### 8.3.2 Desconexión de 152MW de generación

Se analizarán dos escenarios de 30 segundos, con FESS y sin FESS ante la falla del generador Andina (implementada como una carbonera con potencia natural de 165MW), a los 5 segundos, operando con una consigna de potencia de 152MW, correspondiendo a un 101,3% de la reserva en giro disponible.

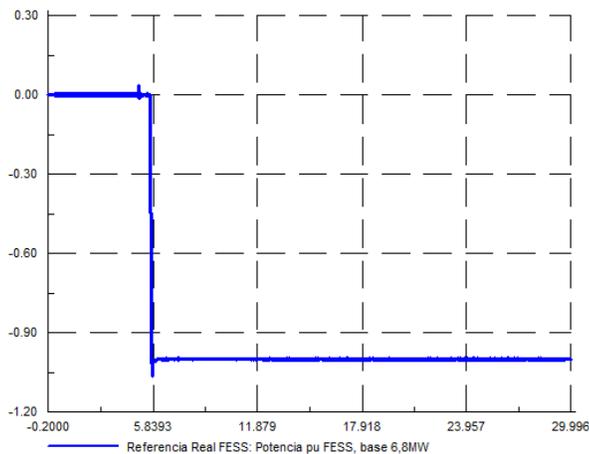


**Figura 8.5 Desconexión Generador Grande**

En este caso, con FESS o SIN FESS, el sistema no tiene la capacidad suficiente de respuesta para poder estabilizar la frecuencia. Dado que se tiene una respuesta más rápida en el escenario con FESS, se puede llegar a un valor final de frecuencia algo

mejor, pero la respuesta del sistema por completo es inaceptable con o sin el dispositivo.

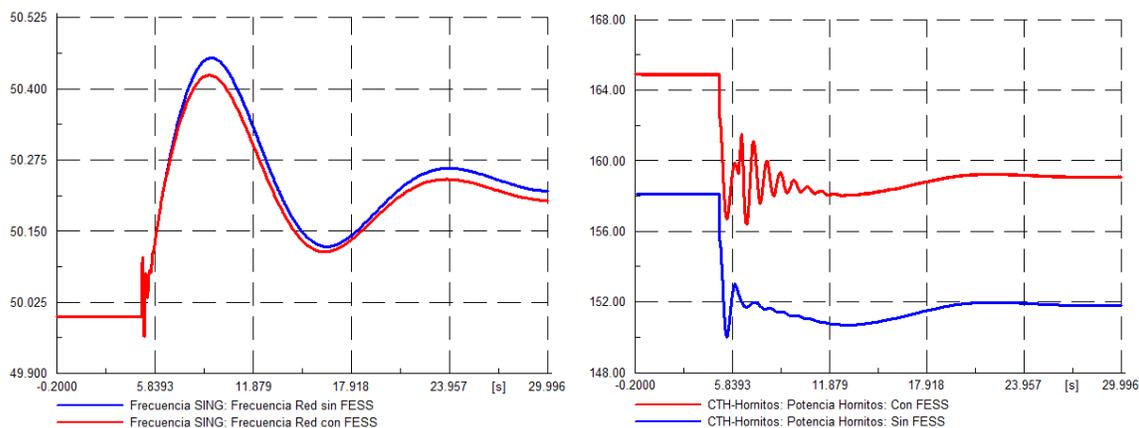
El FESS opera de la misma forma que en la desconexión del generador mediano, pero esta vez opera bajo los 5,8 segundos. (Figura 8.6)



**Figura 8.6 Potencia FESS**

Este caso en realidad sí se estabiliza la frecuencia, no se reflejó en la simulación dado que el sistema no se modeló por completo. Bajo esta solicitud, otros mecanismos de regulación de frecuencia operan (como los esquemas de desconexión de carga o EDAC) que permiten estabilizar la frecuencia en un valor razonable, no es parte de este trabajo modelar este tipo de sistemas de control.

### 8.3.3 Desconexión de Carga

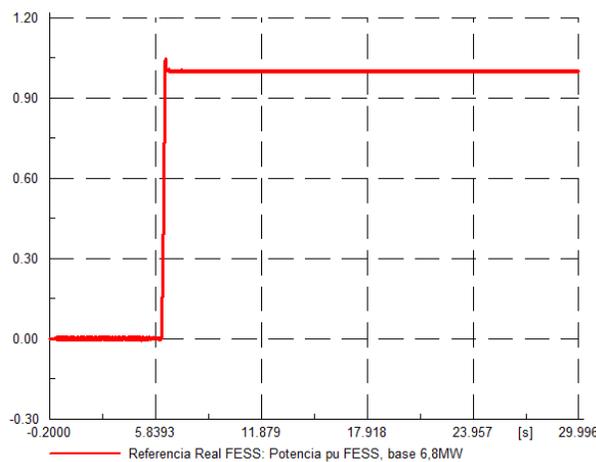


**Figura 8.7 Desconexión de Carga**

En este caso se desconecta una carga de 95MW. En cada escenario operan los controladores de cada máquina para disminuir la potencia generada y poder estabilizar la frecuencia.

El FESS debe absorber energía del sistema operando como carga resistiva para ayudar a la regulación de frecuencia. La diferencia entre el caso sin FESS y con FESS es que al llegar la frecuencia a los 50,2Hz, opera el FESS de forma prácticamente instantánea, representando una carga de 6,8MW, lo que ayuda al sistema a tener una mejor respuesta en frecuencia.

El FESS opera como carga en todo el proceso, incluso si en el proceso la frecuencia baja los 50,2Hz. Esto debido a que la parte integral del controlador tipo PI permite mantener al FESS absorbiendo energía cuándo la frecuencia reingresa a la banda muerta del control. Esto se puede ver en la Figura 8.8 donde el FESS opera desde 5,8 a los 30 segundos, sin dejar de absorber entre los segundos 13 y 20 que es donde la frecuencia se encuentra por debajo de los 50,2Hz.



**Figura 8.8 Operación FESS**

Para desconexión de cargas de 150MW, el sistema se comporta de manera similar y la operación del FESS es idéntica.

### 8.3.4 Evaluación Económica

En la evaluación económica de esta aplicación al igual que la anterior, se evalúa el costo de oportunidad de perder la energía no generada (4% base) dado que no se tiene el dispositivo de almacenamiento de energía.

El costo de inversión del FESS se realizó de la misma forma para el SIC, solo que ahora se tiene 6,8MW con 1,7MWh (15 minutos de operación), lo que resulta en una inversión de 3,6 millones de dólares.

Para calcular la energía anual promedio generada por Hornitos consideró que opera un 85% del tiempo en base, es decir, a plena carga.

En este caso los ingresos del FESS son los ingresos que se obtienen al generar el 4% de reserva en giro.

$$I = (CMg - Cvar) * G * 0,04$$

Si lo anterior se realiza para cada año, considerando un costo variable promedio anual de la central Hornitos de 60mills/kWh y un costo marginal promedio del sistema de 100mills/kWh (es decir una diferencia de 40mills/kWh), la TIR en 20 años resulta de 11,4%, por lo que podría concluirse que es un proyecto económicamente viable.

Energía total FESS [MWh]	1,7
Costo inversión [US\$]	\$ 3.607.200
Costo energía [mills/kWh]	\$ 60
Venta energía [mills/kWh]	\$ 100
Costo OP_Mant [US\$]	\$ 25.000
Pérdidas FESS [%MWh/10hrs]	0,08
Años	20
Disponibilidad Hornitos	85% del tiempo
<b>TIR</b>	<b>11,4%</b>

**Tabla 8.2 Evaluación Operación en el SING**

Si la diferencia del costo marginal del sistema con el costo variable de la central Hornitos disminuye a 17,1mills/kWh, la TIR se vuelve cero. Esto implica un costo marginal promedio anual de 77,1mills/kWh, o que el precio del carbón se eleve haciendo que la central Hornitos tenga un costo variable alto.

## Capítulo 9 Conclusiones

En este trabajo se realizó la modelación, control y simulación de algunas aplicaciones de la tecnología de almacenamiento de energía mediante volantes de inercia con el objetivo principal de presentar esta tecnología en un nivel más detallado y además dar a conocer su versatilidad en sistemas eléctricos de potencia.

Se comenzó describiendo el estado del arte en el almacenamiento presentando tres tecnologías que se compararon con el FESS. Se concluye que uno de los puntos débiles de este dispositivo es el reducido periodo de tiempo de almacenaje además de poseer una baja densidad de energía. El punto que más beneficia su aplicación en sistemas eléctricos de potencia es su robustez, su elevada vida útil y mínimo mantenimiento.

Se prosigue describiendo las características constructivas del FESS. Se detalla las partes que lo componen y cómo varían estos elementos dependiendo de la eficiencia requerida. Se distinguen dos tipos de FESS según su velocidad de rotación, los de baja velocidad o LFESS y los de alta velocidad o HFESS. Los primeros se caracterizan por ser de menor costo, poseer una menor densidad de energía y mayores pérdidas que los segundos. Los HFESS son los utilizados actualmente en las aplicaciones estudiadas, dado que tienen una mayor capacidad de almacenamiento, teniendo eficiencias que superan el 85%.

La presentación de la teoría y aspectos constructivos que se expusieron en los primeros capítulos tuvo como resultado la obtención del modelo eléctrico a estudiar en capítulos posteriores. Este se basó en:

- Una máquina de imanes permanentes superficiales, modelada a través del paquete adicional SimpowerSystem del programa Simulink.
- La masa de inercia se modeló agregando a las ecuaciones de la máquina una inercia elevada.
- Se conectó la máquina a la red a través de un sistema de dos convertidores de potencia, modelados usando los bloques de SimpowerSystem. Este tipo de conexión permitió tener por un lado la frecuencia variable requerida por la máquina y por el otro la frecuencia fija de la red.
- Se diseñó un filtro que permite llevar los estándares de conexión a las máximas exigencias normativas en relación con la generación de armónicos del dispositivo. También se calculó el valor del condensador del puente de voltaje DC.
- El control del sistema se realizó con las herramientas de Simulink.

Para determinar los distintos parámetros del modelo de forma acertada se utilizaron criterios de diseño junto a parámetros típicos encontrados en la literatura.

Luego se presentó la teoría del control implementado para la máquina de imanes permanentes, teniendo en consideración que el control de potencia activa tiene como

objetivo principal manejar adecuadamente la aceleración del volante de inercia. Se estimó conveniente usar dos estrategias de control para elevar el rango de velocidad. Se concluye que lo más indicado en la operación real de los FESS es que estos dispositivos cuenten con una o ambas estrategias con el motivo de maximizar la energía almacenada, la que depende fundamentalmente de los límites técnicos del dispositivo.

El ajuste de los controladores se realizó separando el FESS en dos circuitos equivalentes entre sí. Esto facilitó la tarea de ajuste dado que disminuyó considerablemente los tiempos de cómputo de las simulaciones. Dado que el FESS es un sistema complejo se decidió a priori este tipo de ajuste, quedando como trabajo futuro ajustar los controladores mediante un método matemático que permita obtener los valores óptimos del sistema.

El modelo con su control se simuló bajo distintas solicitaciones. Se analizó la respuesta del sistema frente al escalón (paso de reposo a carga) donde se concluyó que el sistema tiene un tiempo de respuesta del orden de los milisegundos, variando su forma de onda dependiendo de la velocidad de reposo de la máquina. Los mejores resultados se obtuvieron en el rango de velocidad de la estrategia bajo torque constante. Al elevar la velocidad y por consiguiente al cambiar de estrategia a potencia constante se elevó también el sobrevoltaje inicial, pero nunca sobrepasando un 40% del valor de referencia.

El sistema de conexión mediante dos convertidores electrónicos permitió que las perturbaciones de la red sean minimizadas en el lado de la máquina.

También se analizó el paso de carga a descarga. El sistema siguió teniendo un tiempo de respuesta del orden de los milisegundos, pero la mayor sollicitación hizo que la respuesta se presente con mayor oscilación y que se demore más tiempo en llegar a la referencia en relación al cambio de reposo a carga, resultado totalmente esperable.

El diseño, implementación y ajuste del control, a pesar de que se realizó de manera separada en dos circuitos, es satisfactorio. El control demostró ser rápido y preciso manteniendo una referencia de potencia con perturbaciones bajas gracias a la suma de las contribuciones de la operación del filtro y los dos convertidores de potencia. A pesar de que en esta parte no se programó un control de frecuencia, este parámetro, como se explicó en el capítulo 5, se controla mediante el equilibrio de potencia activa generada y consumida, por lo que el control detallado y simulado en esta parte del trabajo permitiría contribuir a la regulación de frecuencia, ya sea primaria o secundaria, implementando además una adecuada referencia de potencia según corresponda. En Estados Unidos se utiliza un modelo de regulación de frecuencia secundaria que considera al FESS como una máquina o un consumo de potencia activa programable, por lo que funciona con un control de potencia como el que se realiza en esta parte, sin un control que tome en cuenta la frecuencia de la red.

Una desventaja que tiene este control y que no se estudia en este trabajo, es que la respuesta depende de los parámetros físicos de la máquina, por lo que en la práctica no se tiene una robustez absoluta. Los cambios de la resistencia de la máquina o de la inductancia por distintos factores afectan en realidad el comportamiento del control, dado que su ajuste se realiza considerando estos valores. El trabajo de análisis del impacto de los parámetros físicos de la máquina no se profundiza por que se escapa de los alcances.

Otro tema que no se profundizó es en las pérdidas del FESS. Se destacó que las pérdidas más importantes corresponden a las que se producen en los rodamientos y por la fricción del aire. Actualmente se utilizan rodamientos magnéticos y se utiliza la rotación en vacío para eliminar en gran parte estas pérdidas, llegando a una eficiencia considerablemente mayor a la tecnología usual con rodamientos convencionales y bajas velocidades.

Después de presentar y analizar los resultados del modelo en Matlab, inicia una segunda etapa de la memoria que es conectar el sistema FESS a algún sistema interconectado de potencia y además aplicar su funcionamiento en diversas circunstancias. Para ello se parte explicando las nociones básicas de la teoría de la regulación de frecuencia en los sistemas eléctricos de potencia de manera general, detallándose este mecanismo en los sistemas SIC y SING.

Para esta etapa se elige como herramienta el programa Digsilent debido a la mayor cantidad de información disponible para modelar, programar y obtener resultados de los sistemas SIC y SING. Se empieza con la explicación del modelo RMS programado, realizando una simplificación fuerte que es modelar la máquina y el inversor conectado a ella mediante una simple fuente de corriente ideal. Para validar la programación así realizada se comparó la respuesta de este sistema con los de Matlab. Se concluye que, a pesar de que ambas respuestas no son iguales, el modelo RMS en Digsilent es válido dado que es bastante similar a la respuesta en Matlab, considerando que las diferencias se aprecian en el orden de los milisegundos y que en esta segunda etapa se analizan respuestas del orden de los segundos. Una diferencia notable es que la respuesta en Digsilent no posee variaciones con respecto al estado inicial de carga del FESS dado que estas diferencias corresponden a la operación de la máquina.

El control del FESS y las simulaciones en los sistemas interconectados se realizaron según las siguientes aplicaciones:

- En el SIC, control de transferencias de una línea

Se modeló un sistema pequeño en comparación con el real, dado que el control de transferencias es un fenómeno local. Se eligió una línea actual con problemas de transferencias y se instaló el FESS en la parte receptora de la energía para controlar su nivel de carga. Se realizaron aumentos de carga en la parte receptora para aumentar la potencia activa por la línea y así presentar escenarios en donde el FESS

opera para mantener la seguridad, aumentando además la capacidad de transmisión total de la línea en una cantidad igual la potencia máxima disponible del FESS.

Los resultados en el SIC fueron satisfactorios. Se pudo concluir que un control tipo P no es adecuado para controlar la carga de la línea y sí lo es un control tipo PI, dado que el control tipo P no asegura la mantención del criterio N-1.

A pesar de que el FESS ayuda a mantener la seguridad del SIC, se calcula que no es un proyecto viable económicamente dado que la inversión inicial del dispositivo es alta en comparación con los ingresos anuales. Se tendría que dar un escenario improbable de varias operaciones de carga y descarga diarias para que su evaluación sea positiva.

- En el SIC, control de vertimiento eólico.

En el mismo sistema anterior, se modeló otro escenario que es cuando la carga de la línea aumenta debido a la generación no programada de un parque eólico instalado en la parte transmisora de la energía.

Para evitar el vertimiento se instala el FESS en la barra del generador eólico, almacenando la energía del viento que se debe desechar debido a que no existe capacidad de transmisión en la línea. En este tipo de aplicación el FESS no aumenta la capacidad de la línea pero sí ayuda a que la línea no se sobrecargue debido a la generación adicional del parque eólico.

Se evaluó el número de operación diaria que se debe presentar para que esta aplicación fuera económicamente viable. Resultó que con la misma cantidad de operaciones diarias que en la aplicación anterior se tiene una TIR mayor, pero a mayor riesgo.

Se concluye que la operación del FESS en este tipo de escenarios es viable técnicamente, pero económicamente se necesita mejor evaluación. A pesar de que se tiene un precio de la energía igual a cero y se vende la energía a un precio elevado, este tipo de operación ocurre cuando dos circunstancias se dan simultáneamente, lo que se considera una operación altamente riesgosa que debe ser estudiada con mayor detalle.

- En el SING, regulación de frecuencia primaria.

Cómo la regulación de frecuencia es un parámetro global, se decidió modelar el SING de manera detallada y luego se asoció la operación del FESS a un generador térmico a carbón que tiene la particularidad de tener un costo variable bajo con altas probabilidades de ser despachado en base.

Los resultados en el SING también fueron satisfactorios. Se programó un control de frecuencia que inyecta o absorbe potencia activa a través del FESS toda vez que la frecuencia de la red se encuentre fuera de la banda permitida por la norma técnica.

La mejora de la velocidad de respuesta de la reserva en giro del generador térmico debido al FESS se traduce en una mejoría en la respuesta de la frecuencia del sistema frente a desequilibrios de potencia activa.

Su evaluación económica es favorable dado que los ingresos tienen que ver con la operación permanente de la reserva en giro del 4% asociado al generador en estudio. Se estima que la TIR es positiva hasta que la diferencia entre el precio de venta de la energía con el precio variable de generación llega a 17,1 mills/kWh.

El periodo de tiempo de la evaluación económica del FESS en los sistemas SIC y SING resulta elevado en relación a otros proyectos en los sistemas interconectados, lo que es una desventaja si es que se tiene un proyecto alternativo con rentabilidad similar a menor cantidad de tiempo. Este sería el caso de comparar actualmente el FESS con el BESS convencional, que es un sistema de almacenamiento más barato que también se pueden utilizar en estas aplicaciones y que se evalúan a horizontes máximos de 15 años.

A pesar que la evaluación económica en el SIC resultó desfavorable, puede que en un futuro esto no sea así debido a la posible disminución de precio de la tecnología o una mejor regulación normativa. De todas maneras se debe tener en cuenta que no se presenta un análisis detallado, por lo que pueden existir otros factores que no se tomaron en cuenta que puedan favorecer estas aplicaciones, como por ejemplo la presencia de posibles economías de escala, una mejor ubicación del dispositivo o una potencia instalada óptima. Se propone como trabajo futuro analizar estos factores además de realizar una evaluación económica adicional de forma sistémica, para ver si es que la instalación del FESS lleva a un menor costo total de la energía por el cambio de costos marginales que significaría realizar un despacho para evitar vertimiento de energía y/o saturación de la línea, lo que implicaría que el FESS, a pesar de no ser rentable para su propietario, sí lo podría ser para el sistema.

La metodología de ajuste y diseño del controlador en Matlab aquí presentado se presenta como una guía adecuada para realizar un diseño de un controlador real de este dispositivo. Además lo programado en Digsilent se presenta como una herramienta que puede ser utilizado por cualquiera que desee realizar estudios en sistemas eléctricos con cualquier tipo de almacenamiento de energía.

En este trabajo se presentan todos los procesos necesarios para presentar en detalle una tecnología. Se modeló, se controló, se simuló y se presentaron resultados de su operación en detalle (Matlab) como su operación en el sistema (Digsilent). Finalmente se evalúa económicamente el dispositivo, por lo que se concluye que tanto el objetivo principal como los secundarios se alcanzaron de forma satisfactoria.

Se considera que este trabajo puede presentarse como una guía referencial completa para cualquier persona que desee conocer este sistema de almacenamiento de energía. En resumen, se dejan como trabajo propuesto los siguientes puntos:

- Estudiar otros tipos de aplicaciones en los Sistemas Interconectados.
- Estudiar las restricciones mecánicas que poseen los FESS y cómo estas afectan su respuesta eléctrica.
- Estudiar en mayor detalle las pérdidas y los parámetros eléctricos del FESS obteniendo valores reales, estudiando además cómo éstos afectan el control.
- Mejorar lo programado en Digsilent, programando además la máquina de imanes permanentes.
- Analizar la mejor ubicación del FESS en el sistema para distintos tipos de aplicaciones.
- Analizar el nivel de carga óptimo que debe poseer el FESS en el sentido de regulación de frecuencia.

## Capítulo 10 Referencias

- 1 Lluís Ripoll Masferrer, “Análisis y diseño de Volantes de Inercia de materiales compuestos”; Universidad de Guadalajara, Tesis, 2005.
- 2 Satish Samineni, “Modeling and Analysis of a Flywheel Energy Storage System for Voltage Sag Correction”, Universidad de Idaho, Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias con mención en Ingeniería Eléctrica, Diciembre, 2003.
- 3 James Cleary, Matthew L. Lazarewicz, Larry Nelson Jr., Robert Rounds, James Arsenault, “Interconnection Study: 5MW of Beacon Power Flywheels on 23kV Line – Tynsgsboro, MA”, IEEE conference publications, 2010, p:285-295.
- 4 Dr. Rahul Walawalkar, Dr. Jay Apt, “Market Analysis of Emerging Electric Energy Storage Systems” DOE/NETL, Final report, Julio 31, 2008.
- 5 Perry I-Pei Tsao, “An Integrated Flywheel Energy Storage System with a Homopolar Inductor Motor/Generator and High-Frequency Drive”, Universidad de California, Berkeley, Tesis para optar al grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica y Ciencias de la Computación, Otoño 2003.
- 6 Maria Inés Lopes Marques, “Design and Control of an Electrical Machine for Flywheel Energy-Storage System”, Instituto Superior Técnico de Lisboa, Tesis para optar al grado de Magíster en Ingeniería Eléctrica y en Computación, Mayo 2008.
- 7 Stanislaw Pirog, Marcin Baszynski, Tomasz Siostrzonek, “The High-Speed Flywheel Energy Storage System”, Universidad de Ciencias y Tecnología, Polonia, Capítulo 3 del libro “Dynamic Modelling”, disponible en línea en <http://www.intechopen.com/books/dynamic-modelling/>.
- 8 Hardi Hoimoja, “Flywheel energy storage: principles and possibilities”, Tallin University of Technology, 3<sup>rd</sup> International Symposium, Actual Problems in Energy and Geotechnology, Kuressaare, p:89-92, Enero, 2006.
- 9 Walter Brokering Christie, Rodrigo Palma Behnke, Luis Vargas Díaz, “Sistemas Eléctricos de Potencia, Ñom Lűfke”, Editorial Prentice Hall-Pearson, 2006.
- 10 Carlos Alberto Suazo Martínez, “Modelo De asignación de Responsabilidades para servicios complementarios de regulación de frecuencia” Universidad De Chile, Tesis para optar al grado de magíster en ciencias de la Ingeniería mención eléctrica y Memoria para optar al título de Ingeniero civil electricista, Santiago, Enero, 2009.

- 11 Pablo Ledesma, "Regulación de Frecuencia y potencia", Universidad Carlos III de Madrid, Apuntes del curso Operación y control de Sistemas Eléctricos, Septiembre, 2008.
- 12 Juan Pablo Valderrama Osorio, "Sistemas de almacenamiento de energía para aplicación en el control primario de Frecuencia", Universidad de Chile, Memoria para optar al título de Ingeniero civil electricista, Marzo, 2011.
- 13 Hongchang Wang, Shuyun Jiang, Zupei Shen, "The Dynamic Analysis of an Energy Storage Flywheel System with Hybrid Bearing Support" Technical Committee on Vibration and Sound, Publicado por: American society of mechanical engineers, New York, Octubre 2009.
- 14 Beacon power Corporation, Página en línea, <[www.beaconpower.com](http://www.beaconpower.com)>.
- 15 Marcelo Gustavo Molina, "Dynamic Modelling and Control Design of Advanced Energy Storage For Power System Applications" CONICET, Instituto de Energía Eléctrica, Universidad Nacional de San Juan Argentina, Capítulo 4 del libro "Dynamic Modelling", disponible en línea en <<http://www.intechopen.com/books/dynamic-modelling/>>.
- 16 Paulo F Riberiro, Brian K. Johnson, Mariesa L. Crow, Aysen Arsoy, Yilu Liu, "Energy Storage System for Advanced Power Applications" IEEE, Invited Paper, p:1744-1756, Diciembre 2001.
- 17 Muhammad H. Rashid, "Power Electronic Handbook", Editorial Academic Press, 2001.
- 18 Enrique L. Carrillo Arroyo, "Modeling and Simulation Of Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System", Universidad de Puerto Rico, Tesis para optar al grado de magíster en ciencias de la Ingeniería mención eléctrica, 2006.
- 19 Comisión Nacional de Energía, "Norma Técnica de seguridad y calidad de servicio", Octubre, 2009.
- 20 Ministerio de Economía Fomento y Construcción, "Decreto con Fuerza de ley N°4", 2007.
- 21 Ministerio de Minería, "Reglamento de la Ley General de Servicios Eléctricos", 1998.
- 22 Wen-Song Chien and Ying-Yu Tzou, "Analysis and design on the reduction of DC-Link electrolytic Capacitor for AC/DC/AC converter Applied to AC Motor Drives", IEEE conference publications, p:275-279, 1998.

- 23 Khaled H. Ahmed, Stephen J. Finney and Barry W. Williams, "Passive Filter Design for three-phase Inverter Interfacing in Distributed Generation", IEEE conference publications, p:1-9, Junio 2007.
- 24 Timothy CY Wang, Zhihong Ye, Gautam Sinha, Xiaoming Yuan, "Output Filter Design for a Grid-interconnected Three-Phase Inverter", IEEE conference publications, Vol.2, p:779-784, 2003.
- 25 José R. Rodríguez, Juan W. Dixon, José R. Espinoza, Jorge Pontt, Pablo Lezana, "PWM Regenerative Rectifiers: State of the Art", IEEE Journals & Magazines, Vol.52, p:5-22, 2005.
- 26 Peter VAS, "Sensorless Vector and direct torque control", Oxford University Press, 1998.
- 27 Parikshith.B.C, Dr.Vinod John, "Higher order output filter design for grid connected power converters", Fifteenth National Power Systems Conference, Diciembre 2008.
- 28 Javier Andrés Escutti Carrasco, "Simulación dinámica de dispositivos SVC y STATCOM interactuando en una misma red", Memoria para optar al título de Ingeniero civil electricista, Universidad de Santiago de Chile, 2011.
- 29 Marco Liserre, Frede Blaabjerg, Steffan Hansen, "Design and Control of an LCL-Filter-Based Three-Phase Active Rectifier", IEEE Journals & Magazines, Vol.41, p:1281-1291, 2005.
- 30 Temporal Power, En línea <<http://temporalpower.com/>>, 2012.
- 31 João Onofre Pereira Pinto, "Analysis of extender constant power speed range of the permanent magnet synchronous machine driven by dual mode inverter control", University of Tennessee, Tesis para optar al grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica, Agosto, 2001.
- 32 Dictamen N° 3-2009, Discrepancia: Procedimiento DP del CDEC-SING, "Tratamiento Dispositivos Tipo Bess", Santiago, 22 de abril de 2009.
- 33 CDEC SING, en línea < [www.cdec-sing.cl/](http://www.cdec-sing.cl/)>, 2012.
- 34 CDEC SIC, en línea <<https://www.cdec-sic.cl/>>, 2012.
- 35 CNE, en línea < [www.cne.cl/](http://www.cne.cl/)>, 2012.
- 36 Digsilent GmbH, "Digsilent Technical Documentation", 2007.
- 37 Digsilent GmbH, "DSL manual", 2005.

- 38 Matthew L. Lazarewicz, James A. Arseneaux, "Status of Pilot Projects Using Flywheels for Frequency Regulation", IEEE Conference Publications, 2006
- 39 Comisión Nacional de Energía, "Estudio de Transmisión Troncal", 2010.
- 40 A. Ter-Gazarian, "Energy storage for power systems", Publicado por The Institution of Electrical Engineers, 1994.
- 41 Universidad de Chile, Apuntes del Curso "Evaluación de Proyectos", 2008.
- 42 Universidad de Chile, Apuntes del Curso "Control de sistemas", 2008.
- 43 Bernard T. Merritt, Robert F. Post, Gary R. Dreifuerst, and Donald A. Bender; "Halbach Array Motor/Generators — A Novel Generalized Electric Machine," October 28, 1994, Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-JC-119050; Halbach Festschrift Symposium, Berkeley, CA; February 3, 1995.

## Capítulo 11 Anexo 1: Diseño Filtro

La distorsión armónica total de conexión del convertidor de potencia a la red es elevada. Ésta depende de varios parámetros como lo son la frecuencia de conmutación, el valor del condensador del puente DC, el valor de la frecuencia fundamental y el contenido armónico del lado DC. Es entonces usual diseñar un filtro de conexión.

Dependiendo del nivel de distorsión máxima que se requiera, se pueden utilizar filtros tipo [23]:

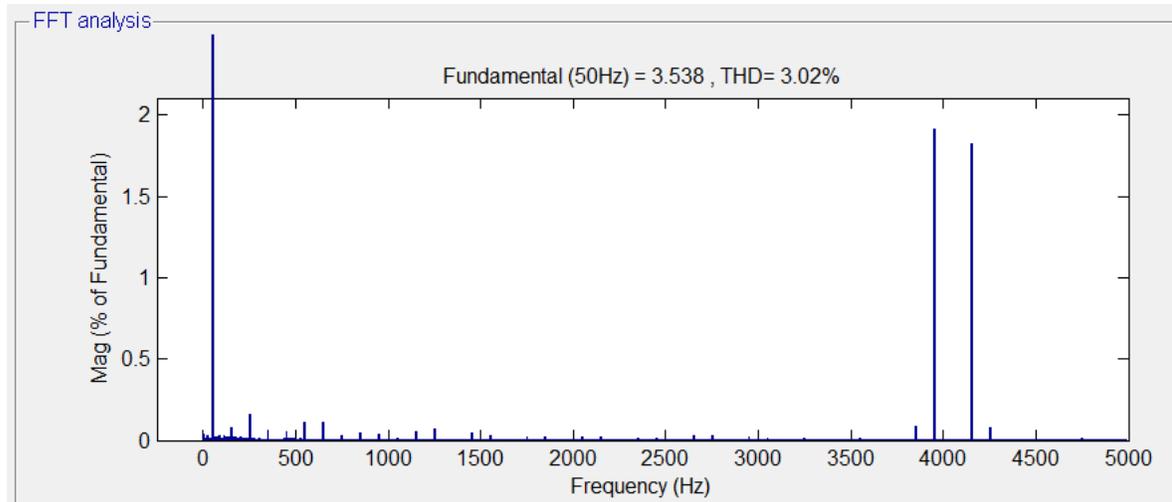
- L: inductancia en serie
- LC: inductancia en serie con condensador en paralelo.
- LCL : inductancia en serie más condensador en paralelo con una segunda inductancia en serie

En este caso se diseñará un filtro que permita conectar el inversor a la red según la normativa de calidad y seguridad de suministro [19]. Esta establece que los niveles de armónicos de corriente deben tener máximos de distorsión armónica según la Tabla 11.1.

Máxima Distorsión Armónica de corriente en el sistema eléctrico expresada como porcentaje del valor de corriente máxima de carga a frecuencia fundamental para tensiones de 220 V a 100 kV						
$I_{sc}/I_L$	Orden de la armónica (armónicas impares)					Índice DI
	<11	11<=H<17	17<=H<23	23<=H<35	35<=H	
<u>&lt;=20*</u>	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
<u>20 - 50</u>	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
<u>50 - 100</u>	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
<u>100 - 1000</u>	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
<u>&gt;=1000</u>	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

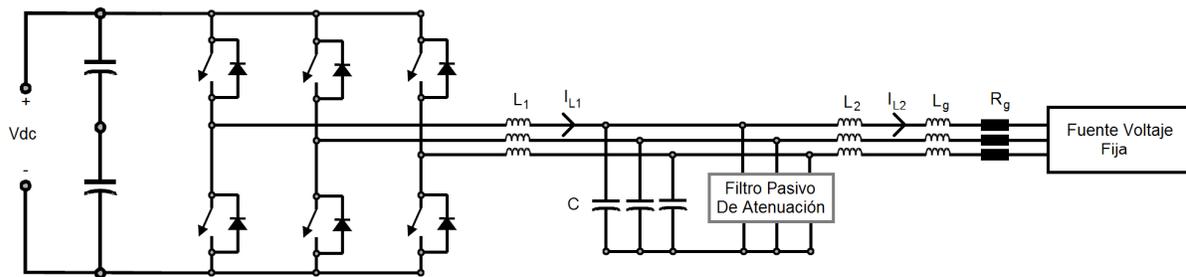
**Tabla 11.1 Niveles Máximos de armónicos de corriente [19]**

Un filtro tipo L no cumple con los valores máximos impuestos por la norma, incluso para los valores más holgados (menor a 1,4% para armónicas impares de orden mayor a la 35). En la Figura 11.1 se analiza su espectro en frecuencia, el nivel de distorsión armónica total (THD) del circuito de conexión a la red está dentro de la norma, pero el porcentaje armónico para componentes mayores a la 35va armónica (1750Hz) queda fuera de ella.



**Figura 11.1 Niveles THD con Filtro Tipo L**

Para que el convertidor de potencia cumpla con la norma técnica, es necesario un filtro de mayor calidad. Un tipo LC también es insuficiente, es por esto que se diseñará un filtro tipo LCL siguiendo la referencia [24] para los mayores estándares de la red (red aislada).



**Figura 11.2 Filtro LCL**

- Siguiendo la Figura 11.2,  $L_1$  se diseña según el ripple de corriente deseado en el inductor. Normalmente se puede elegir un ripple de un 20% de la corriente promedio.

$$L_1 = \frac{1}{8} \frac{V_{dc}}{\Delta I_{L1} f_{sw}} = \frac{1}{8} \cdot \frac{V_{dc}}{0.2 \cdot I_{rated} \cdot f_{sw}} \quad (11.1)$$

Donde  $f_{sw}$  corresponde a la frecuencia de la señal triangular (o de conmutación) del inversor conectado a la red (que se diseñará más adelante).

- El condensador del filtro se elige según el porcentaje de potencia reactiva que se está dispuesto a inyectar al inductor  $L_1$ . Mientras mayor la capacidad, mayor potencia reactiva y se requerirá de mucha mayor corriente, por lo que la

eficiencia disminuye. El condensador tampoco puede ser muy pequeño puesto que la inductancia total resultaría muy elevada.

En este caso se eligió un 10% de la potencia nominal del inversor.

$$C = 10\% \frac{P_{rated}}{6\pi f V_{AC-fn}^2} \quad (11.2)$$

Donde  $f$  corresponde a la frecuencia nominal de la red.

- $L_2$  se diseña según la función de transferencia del filtro completo y sujeto a las especificaciones de la Tabla 11.1. En ella se especifica que para armónicas mayores a la 35 (que es donde se encuentra la mayor cantidad de armónicas generadas por el convertidor), la distorsión armónica debe ser menor al 0,3%.

$$\frac{\Delta I_{L2}}{V_{dc}} = \frac{1}{L_1(L_2 + L_g)Cs^3 + R_gCL_1s^2 + (L_1 + L_2 + L_g)s + R_g} \quad (11.3)$$

Según las ecuaciones (11.1), (11.2) y (11.3) se puede diseñar un filtro adecuado para cualquier conexión, incluso en sistemas aislados donde se tiene la mayor exigencia técnica.

Calculando los valores correspondientes resulta  $L_1 = 1,13mH$ ,  $C = 138\mu F$  y  $L_2 = 272,93\mu H$ . Para redondear valores, se elige  $L_1 = 1,2mH$ ,  $C = 130\mu F$  y  $L_2$  se diseña según el transformador de conexión. Si se considera un transformador de 100kVA y una impedancia de 0,04pu, la inductancia  $L_2$  se puede elegir igual a  $293\mu H$ .

Un análisis del circuito de la Figura 11.2 también permite obtener el valor máximo de  $L_T = L_1 + L_2$ . Despreciando la corriente que consume el condensador, se tiene:

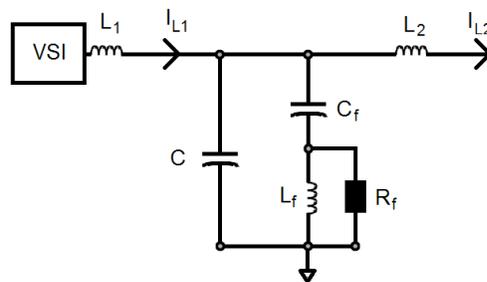
$$|V_{conversor}|^2 = |V_{fuente}|^2 + |L_T \omega I|^2 \Rightarrow L_T \leq \frac{\sqrt{(V_{dc} m_{spwm\_max})^2 - V_{fuente}^2}}{\omega I_{rated}} \quad (11.4)$$

Donde  $m_{spwm\_max}$  corresponde al índice de modulación del inversor, parámetro que se explicará más adelante. Suponiendo un índice de 0.9 se corroboran los valores obtenidos del filtro calculados anteriormente con la desigualdad (11.4). Si no se cumpliera la relación anterior, se debe volver a diseñar los parámetros del filtro con las ecuaciones (11.1), (11.2) y (11.3) con distintas especificaciones técnicas.

Un problema del filtro LCL es que posee frecuencia de resonancia. Si la frecuencia de resonancia está dentro del ancho de banda del sistema de control, entonces son necesarios métodos activos de atenuación (que requieren control adicional). Si la frecuencia de resonancia se encuentra fuera del ancho de banda del sistema, se

pueden utilizar métodos pasivos de atenuación (no requieren de control). En este tipo de aplicaciones normalmente se utilizan métodos pasivos de atenuación. [27]

La atenuación se diseñó siguiendo la referencia [24]. En ella se dan distintos tipos de soluciones pasivas de atenuación, en el que se elige reemplazar el condensador por otro circuito, incluyendo una inductancia y una resistencia en paralelo como se muestra en la Figura 11.3.



**Figura 11.3 Circuito de atenuación de Frecuencia de Resonancia**

Lo importante de este circuito pasivo de atenuación es que se mantenga la capacidad total calculada anteriormente, entonces se debe cumplir que  $C + C_f = 130\mu F$ . En este diseño se elige  $C = 80\mu F$  de manera arbitraria, por lo que  $C_f = 50\mu F$ .

La inductancia se diseña de la siguiente forma:

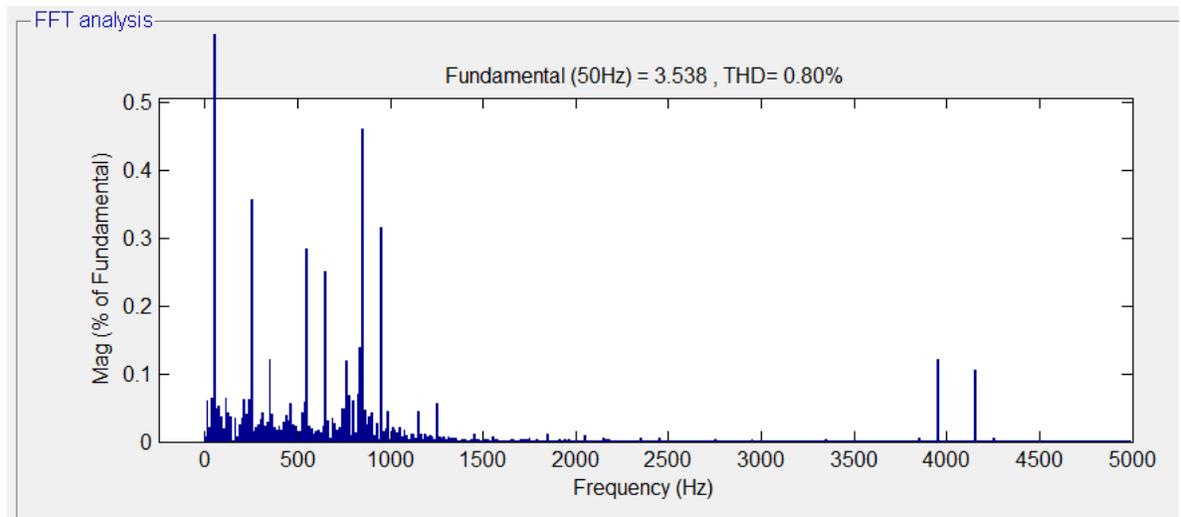
$$L_f = \frac{1}{(2\pi \cdot f \cdot n)^2 C_f} \quad (11.5)$$

Donde  $n$  es número de la armónica generada alrededor de la frecuencia de resonancia del filtro que se calcula según la ecuación (11.6).

$$f_{res} = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} \quad (11.6)$$

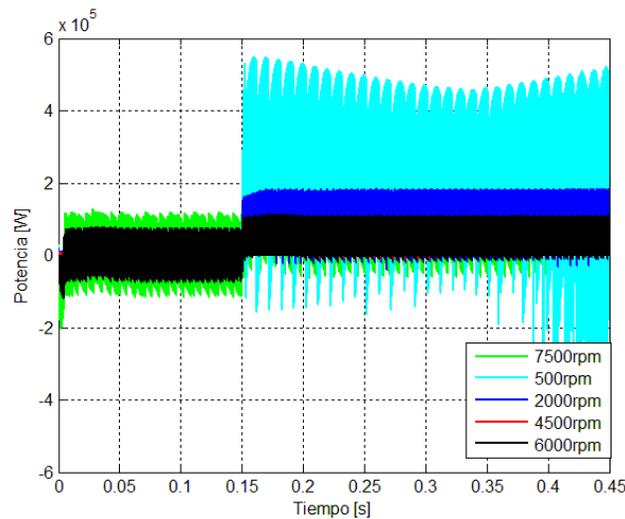
Realizando los cálculos  $n \approx 18$ , lo que implica un  $L_f = 625\mu H$

Conectando este tipo de filtro, la distorsión armónica total baja a 0,8% y el nivel armónico impar sobre la 35va armónica baja a valores menores de 0,3%, que era lo esperado. Los otros componentes armónicos se mantienen dentro de la norma.



**Figura 11.4 Niveles THD con Filtro Tipo LCL**

## Capítulo 12 Anexo 2: Sobre Respuestas en Matlab



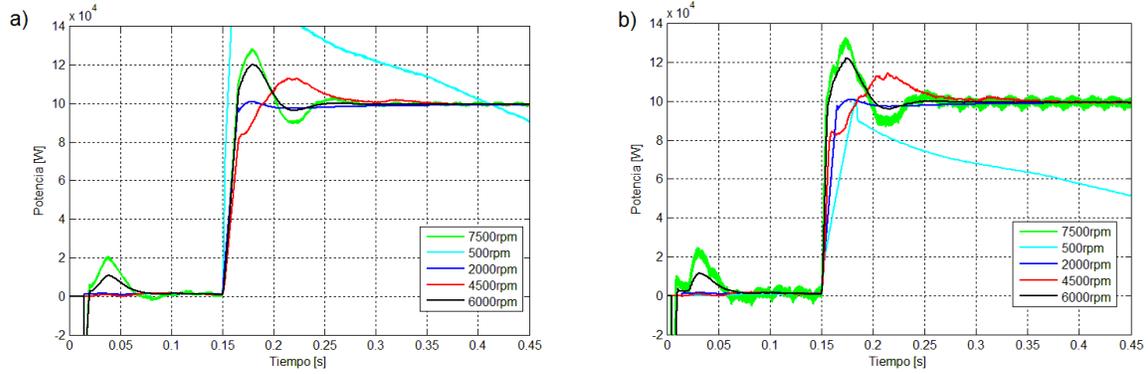
**Figura 12.1 Potencia Instantánea Real**

La potencia instantánea real se ve en la Figura 12.1. Nótese que tiene una gran cantidad de armónicos debido a la conexión directa con el convertidor de potencia, por lo que se decidió que este gráfico no aporta a la comprensión del comportamiento.

Se estimó conveniente promediar la potencia instantánea para analizar los resultados. Esto implica que las formas de onda de salida dependerán de la forma de promediar los resultados, por lo que se expondrá el razonamiento realizado en este trabajo para exponer alguno de estos.

La primera forma de promediar los resultados fue mediante una ventana móvil de ancho igual a la frecuencia eléctrica de la máquina eléctrica. Los resultados son los que se exponen en el capítulo 4, Figura 4.1 o Figura 12.2 b).

Una segunda forma de exponer los resultados es con una ventana móvil de ancho fijo. Se supuso en este trabajo que este tipo de resultado no es el correcto para el lado de la máquina dado que la frecuencia varía, por lo que el promedio temporal debería corresponder al periodo de la frecuencia eléctrica correspondiente. El resultado con una ventana de ancho fijo se ve en la Figura 12.2 a).



**Figura 12.2 a) Potencia Banda Fija; b) Potencia Banda Variable**

Nótese que con ventana fija, a menor velocidad de la máquina, menor es el tiempo de subida, mientras que con ventana móvil no existe una relación a simple vista, pero sí se puede comparar con los resultados del lado de la red (Figura 4.7), donde los tiempos de subida se ordenan de la misma forma que en la Figura 12.2 a).

## Capítulo 13 Anexo 3: Evaluaciones económicas

### 13.1 Estimación Económica en el SIC TIR 2,88%

año	Inversión	OP_Mant	Cmg Sistema	C Var	Energía Diaria Entregada	Energía Diaria Consumida	Total Diario	Total Anual
	[US\$]	[US\$]	[mills/kwahr]	[mills/kWh]	[MWh]	[MWh]	[US\$]	[US\$]
0	\$ 10.800.000,0	\$ 0,0	0	\$ 0,0	0,00	0,00		-\$ 10.800.000,0
1	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
2	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
3	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
4	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
5	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
6	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
7	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
8	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
9	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
10	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
11	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
12	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
13	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
14	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
15	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
16	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
17	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
18	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
19	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
20	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
21	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
22	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
23	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
24	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
25	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
26	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
27	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
28	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
29	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
30	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
31	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8

<b>32</b>	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
<b>33</b>	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
<b>34</b>	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
<b>35</b>	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
<b>36</b>	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
<b>37</b>	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
<b>38</b>	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
<b>39</b>	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8
<b>40</b>	\$ 0,0	\$ 25.000,0	\$ 150,0	\$ 50,0	5,00	5,56	\$ 472,2	\$ 140.277,8

Resumen:

Costo inversión	\$ 10.800.000,0
Costo energía	\$ 50
Venta energía	\$ 150
costo OP_Mant	\$ 25.000,0
eficiencia	0,9
años	40
<b>TIR</b>	<b>-2,88%</b>

## 13.2 Análisis de operación SIC Día v/s TIR

N° Op.	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
año	[MUS\$]	[MUS\$]	[MUS\$]	[MUS\$]	[MUS\$]	[MUS\$]	[MUS\$]	[MUS\$]	[MUS\$]	[MUS\$]	[MUS\$]	[MUS\$]	[MUS\$]
0	-\$ 10,8	-\$ 10,8	-\$ 10,8	-\$ 10,8	-\$ 10,8	-\$ 10,8	-\$ 10,8	-\$ 10,8	-\$ 10,8	-\$ 10,8	-\$ 10,8	-\$ 10,8	-\$ 10,8
1	\$ 0,3	\$ 0,5	\$ 0,6	\$ 0,8	\$ 1,0	\$ 1,1	\$ 1,3	\$ 1,5	\$ 1,6	\$ 1,8	\$ 2,0	\$ 2,1	\$ 2,3
2	\$ 0,3	\$ 0,5	\$ 0,6	\$ 0,8	\$ 1,0	\$ 1,1	\$ 1,3	\$ 1,5	\$ 1,6	\$ 1,8	\$ 2,0	\$ 2,1	\$ 2,3
3	\$ 0,3	\$ 0,5	\$ 0,6	\$ 0,8	\$ 1,0	\$ 1,1	\$ 1,3	\$ 1,5	\$ 1,6	\$ 1,8	\$ 2,0	\$ 2,1	\$ 2,3
4	\$ 0,3	\$ 0,5	\$ 0,6	\$ 0,8	\$ 1,0	\$ 1,1	\$ 1,3	\$ 1,5	\$ 1,6	\$ 1,8	\$ 2,0	\$ 2,1	\$ 2,3
5	\$ 0,3	\$ 0,5	\$ 0,6	\$ 0,8	\$ 1,0	\$ 1,1	\$ 1,3	\$ 1,5	\$ 1,6	\$ 1,8	\$ 2,0	\$ 2,1	\$ 2,3
6	\$ 0,3	\$ 0,5	\$ 0,6	\$ 0,8	\$ 1,0	\$ 1,1	\$ 1,3	\$ 1,5	\$ 1,6	\$ 1,8	\$ 2,0	\$ 2,1	\$ 2,3
7	\$ 0,3	\$ 0,5	\$ 0,6	\$ 0,8	\$ 1,0	\$ 1,1	\$ 1,3	\$ 1,5	\$ 1,6	\$ 1,8	\$ 2,0	\$ 2,1	\$ 2,3
8	\$ 0,3	\$ 0,5	\$ 0,6	\$ 0,8	\$ 1,0	\$ 1,1	\$ 1,3	\$ 1,5	\$ 1,6	\$ 1,8	\$ 2,0	\$ 2,1	\$ 2,3
9	\$ 0,3	\$ 0,5	\$ 0,6	\$ 0,8	\$ 1,0	\$ 1,1	\$ 1,3	\$ 1,5	\$ 1,6	\$ 1,8	\$ 2,0	\$ 2,1	\$ 2,3
10	\$ 0,3	\$ 0,5	\$ 0,6	\$ 0,8	\$ 1,0	\$ 1,1	\$ 1,3	\$ 1,5	\$ 1,6	\$ 1,8	\$ 2,0	\$ 2,1	\$ 2,3
11	\$ 0,3	\$ 0,5	\$ 0,6	\$ 0,8	\$ 1,0	\$ 1,1	\$ 1,3	\$ 1,5	\$ 1,6	\$ 1,8	\$ 2,0	\$ 2,1	\$ 2,3
12	\$ 0,3	\$ 0,5	\$ 0,6	\$ 0,8	\$ 1,0	\$ 1,1	\$ 1,3	\$ 1,5	\$ 1,6	\$ 1,8	\$ 2,0	\$ 2,1	\$ 2,3
13	\$ 0,3	\$ 0,5	\$ 0,6	\$ 0,8	\$ 1,0	\$ 1,1	\$ 1,3	\$ 1,5	\$ 1,6	\$ 1,8	\$ 2,0	\$ 2,1	\$ 2,3
14	\$ 0,3	\$ 0,5	\$ 0,6	\$ 0,8	\$ 1,0	\$ 1,1	\$ 1,3	\$ 1,5	\$ 1,6	\$ 1,8	\$ 2,0	\$ 2,1	\$ 2,3
15	\$ 0,3	\$ 0,5	\$ 0,6	\$ 0,8	\$ 1,0	\$ 1,1	\$ 1,3	\$ 1,5	\$ 1,6	\$ 1,8	\$ 2,0	\$ 2,1	\$ 2,3
16	\$ 0,3	\$ 0,5	\$ 0,6	\$ 0,8	\$ 1,0	\$ 1,1	\$ 1,3	\$ 1,5	\$ 1,6	\$ 1,8	\$ 2,0	\$ 2,1	\$ 2,3
17	\$ 0,3	\$ 0,5	\$ 0,6	\$ 0,8	\$ 1,0	\$ 1,1	\$ 1,3	\$ 1,5	\$ 1,6	\$ 1,8	\$ 2,0	\$ 2,1	\$ 2,3
18	\$ 0,3	\$ 0,5	\$ 0,6	\$ 0,8	\$ 1,0	\$ 1,1	\$ 1,3	\$ 1,5	\$ 1,6	\$ 1,8	\$ 2,0	\$ 2,1	\$ 2,3
19	\$ 0,3	\$ 0,5	\$ 0,6	\$ 0,8	\$ 1,0	\$ 1,1	\$ 1,3	\$ 1,5	\$ 1,6	\$ 1,8	\$ 2,0	\$ 2,1	\$ 2,3
20	\$ 0,3	\$ 0,5	\$ 0,6	\$ 0,8	\$ 1,0	\$ 1,1	\$ 1,3	\$ 1,5	\$ 1,6	\$ 1,8	\$ 2,0	\$ 2,1	\$ 2,3
<b>TIR</b>	<b>-4,9%</b>	<b>-1,3%</b>	<b>1,6%</b>	<b>4,1%</b>	<b>6,3%</b>	<b>8,4%</b>	<b>10,3%</b>	<b>12,2%</b>	<b>14,0%</b>	<b>15,7%</b>	<b>17,4%</b>	<b>19,1%</b>	<b>20,7%</b>

### 13.3 Estimación económica en el SING

año	OP_Mant	Cmg Barra Sistema	C Var	Energía Anual Año	Energía Comprada Año (Pérdidas)	Total ingresos	Total Egresos	TOTAL
	[US\$]	[mills/kwhr]	[mills/kWh]	[MWh]	[MWh]	[US\$]	[US\$]	[US\$]
0	\$ 0,0	\$ 0,0	\$ 0,0	\$ 0,0	\$ 0,0	\$ 0,0	\$ 0,0	-\$ 3.607.200,0
1	\$ 25.000	\$ 100,0	\$ 60,0	12.434,8	117,0	\$ 497.392,8	\$ 32.022	\$ 465.370,8
2	\$ 25.000	\$ 100,0	\$ 60,0	12.434,8	117,0	\$ 497.392,8	\$ 32.022	\$ 465.370,8
3	\$ 25.000	\$ 100,0	\$ 60,0	12.434,8	117,0	\$ 497.392,8	\$ 32.022	\$ 465.370,8
4	\$ 25.000	\$ 100,0	\$ 60,0	12.434,8	117,0	\$ 497.392,8	\$ 32.022	\$ 465.370,8
5	\$ 25.000	\$ 100,0	\$ 60,0	12.434,8	117,0	\$ 497.392,8	\$ 32.022	\$ 465.370,8
6	\$ 25.000	\$ 100,0	\$ 60,0	12.434,8	117,0	\$ 497.392,8	\$ 32.022	\$ 465.370,8
7	\$ 25.000	\$ 100,0	\$ 60,0	12.434,8	117,0	\$ 497.392,8	\$ 32.022	\$ 465.370,8
8	\$ 25.000	\$ 100,0	\$ 60,0	12.434,8	117,0	\$ 497.392,8	\$ 32.022	\$ 465.370,8
9	\$ 25.000	\$ 100,0	\$ 60,0	12.434,8	117,0	\$ 497.392,8	\$ 32.022	\$ 465.370,8
10	\$ 25.000	\$ 100,0	\$ 60,0	12.434,8	117,0	\$ 497.392,8	\$ 32.022	\$ 465.370,8
11	\$ 25.000	\$ 100,0	\$ 60,0	12.434,8	117,0	\$ 497.392,8	\$ 32.022	\$ 465.370,8
12	\$ 25.000	\$ 100,0	\$ 60,0	12.434,8	117,0	\$ 497.392,8	\$ 32.022	\$ 465.370,8
13	\$ 25.000	\$ 100,0	\$ 60,0	12.434,8	117,0	\$ 497.392,8	\$ 32.022	\$ 465.370,8
14	\$ 25.000	\$ 100,0	\$ 60,0	12.434,8	117,0	\$ 497.392,8	\$ 32.022	\$ 465.370,8
15	\$ 25.000	\$ 100,0	\$ 60,0	12.434,8	117,0	\$ 497.392,8	\$ 32.022	\$ 465.370,8
16	\$ 25.000	\$ 100,0	\$ 60,0	12.434,8	117,0	\$ 497.392,8	\$ 32.022	\$ 465.370,8
17	\$ 25.000	\$ 100,0	\$ 60,0	12.434,8	117,0	\$ 497.392,8	\$ 32.022	\$ 465.370,8
18	\$ 25.000	\$ 100,0	\$ 60,0	12.434,8	117,0	\$ 497.392,8	\$ 32.022	\$ 465.370,8
19	\$ 25.000	\$ 100,0	\$ 60,0	12.434,8	117,0	\$ 497.392,8	\$ 32.022	\$ 465.370,8
20	\$ 25.000	\$ 100,0	\$ 60,0	12.434,8	117,0	\$ 497.392,8	\$ 32.022	\$ 465.370,8