

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Memoria de Título

Modelado y simulación de un sistema de almacenamiento de energía potencial gravitacional de masas sólidas.

Memoria para optar al título de
Ingeniero Civil Electrónico

Alumno
Manuel Alejandro Posada Nahuelán

Profesor Guía
Dr. Samir Kouro Renaer

Profesor Co-Referente
Dr. Cesar Silva Jiménez

15 de Junio de 2026, Valparaíso, Chile

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Modelado y simulación de un sistema de almacenamiento de energía potencial gravitacional de masas sólidas

Nombre del candidato(a): Manuel Alejandro Posada Nahuelán

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Electrónica

Campus: Casa Central **Departamento:** Electrónica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Samir Felipe Kouro Renaer, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

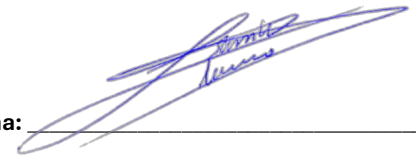
☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 15-06-2026 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 15-06-2026 **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Hay que trabajar, hay que aprender, hay que comer,
hay que descansar... y también hay que jugar
-Maestro Roshi

Dedicado a mi madre, padre y hermana, gracias por todo.

AGRADECIMIENTOS

Primero que nada, quiero darle las gracias a todas las personas que, de una forma u otra, cruzaron su camino con el mío durante este tiempo. A los que estuvieron en las buenas, en las malas: gracias por la energía, las risas y por aguantarme el ritmo. Sin ese empujón colectivo, esto no sería lo mismo.

A mis padres, Margarita y José, por ser mi brújula y mis mejores maestros. Gracias por enseñarme que el valor de las cosas no está en lo que se tiene, sino en el esfuerzo y la perseverancia para conseguirlas. Les agradezco infinitamente por todo lo que me dieron y, sobre todo, por aquello que no pudieron darme pero que me enseñó a valorar el camino. Gracias por creer en mí incluso cuando yo no lo hacía; su fe ha sido mi motor. A mi hermana Belén, gracias por ser esa persona que sabe perfectamente cómo sacarme de mis casillas y, aun así, ser mi mayor motivación. A pesar de que nos molestamos constantemente, eres mi pequeñita y mi todo. Gracias por enseñarme que el apoyo también viene con una broma pesada de por medio. Te quiero, aunque a veces no te soporte. Un agradecimiento especial a Ever, el perro más cariñoso que conocí; gracias por tu compañía incondicional, por tanto y perdón por tan poco. También a Donatello, por su calma y por ser parte de nuestra historia. Aunque ya no estén, su huella sigue intacta.

A mis amigos de la vida, gracias por ser mi vía de escape. Aunque no nos veamos seguido, gracias por las risas, por las rabias frente al PC y por esas charlas largas saltando cofres en Minecraft. Gracias por estar ahí para distraerme de todo y por la lealtad de tantos años.

Mención a mi profesor guía, Samir Kouro, por ir mucho más allá de la enseñanza. Gracias por sus palabras, por motivarme tanto en clases como en nuestras reuniones y, sobre todo, por enseñarme a confiar en mí mismo durante todo el desarrollo de este trabajo

Gracias a todos quienes estuvieron y a los que siguen aquí.

RESUMEN

Este trabajo presenta el estudio y modelado de un sistema de almacenamiento de energía potencial gravitacional de masas sólidas, una tecnología emergente diseñada para mitigar la intermitencia de las energías renovables a gran escala. A diferencia de los sistemas electroquímicos tradicionales, esta solución utiliza el principio físico de elevación y descenso de bloques de material de alta densidad para almacenar y liberar energía eléctrica de forma mecánica.

El objetivo central es analizar el funcionamiento dinámico del sistema y su interacción con la red eléctrica. Para ello, se desarrolla un modelo que integra la mecánica de las masas con una etapa de electrónica de potencia basada en un convertidor *back-to-back* y una máquina síncrona de imanes permanentes (PMSM). Se implementan estrategias de control vectorial (VOC y FOC) para garantizar una gestión bidireccional eficiente del flujo de potencia, permitiendo que el sistema actúe como una carga durante los excedentes de generación y como un generador ante picos de demanda.

Los resultados destacan que las baterías gravitacionales ofrecen ventajas críticas frente a las baterías de litio: una vida útil superior a 30 años sin degradación, nulo riesgo de incendio y el uso de materiales sostenibles. Esta investigación valida la viabilidad técnica de una tecnología que ya ha comenzado su implementación global (como el proyecto Rudong en China), posicionándola como una alternativa robusta y de bajo impacto ambiental para la transición energética actual.

Palabras clave: Almacenamiento de energía, baterías gravitacionales, electrónica de potencia, convertidor back-to-back, estabilidad de red, energías renovables.

ABSTRACT

This work presents the study and modeling of a solid mass gravitational energy storage system, an emerging technology designed to mitigate the intermittency of large-scale renewable energy sources. Unlike traditional electrochemical systems, this solution utilizes the physical principle of lifting and lowering high-density material blocks to store and release electrical energy mechanically.

The main objective is to analyze the system's dynamic performance and its interaction with the electrical grid. To this end, a model is developed that integrates the mechanical dynamics of the masses with a power electronics stage based on a back-to-back converter and a permanent magnet synchronous machine (PMSM). Vector control strategies (VOC and FOC) are implemented to ensure efficient bidirectional power flow management, allowing the system to act as a load during generation surpluses and as a generator during peak demand.

The results highlight that gravitational batteries offer critical advantages over lithium-ion batteries: a lifespan exceeding 30 years without degradation, zero fire risk, and the use of sustainable materials. This research validates the technical feasibility of a technology that has already begun its global implementation (such as the Rudong project in China), positioning it as a robust, low-environmental-impact alternative for the current energy transition.

Keywords: Energy storage, gravity batteries, power electronics, back-to-back converter, grid stability, renewable energy.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS i

RESUMEN ii

Resumen ii

ABSTRACT iii

Abstract iii

ÍNDICE DE FIGURAS vii

ABREVIACIONES ix

1. INTRODUCCIÓN 1
- 1.1. Contexto Energético y Motivación . . . 1
- 1.2. Definición del Problema . . . 1
- 1.3. Objetivos del trabajo . . . 2
  - 1.3.1. Objetivo General . . . 2
  - 1.3.2. Objetivos específicos . . . 2
- 1.4. Metodología de Trabajo . . . 3
  - 1.4.1. Alcances y Limitaciones . . . 3
- 1.5. Resumen de los Capítulos . . . 4

2. ESTADO DEL ARTE Y FUNDAMENTOS TÉCNICOS 6
- 2.1. Sistemas de Almacenamiento de Energía (ESS) . . . 6
- 2.2. Baterías de Gravedad de Masas Sólidas (SGES) . . . 7
  - 2.2.1. Principios de operación y física asociada . . . 8
  - 2.2.2. Revisión bibliográfica y soluciones existentes . . . 8
  - 2.2.3. Solución comercial de referencia: Energy Vault (EVx) . . . 9
- 2.3. Conversión Electromecánica y de Potencia . . . 10
  - 2.3.1. Máquina Síncrona de Imanes Permanentes (PMSM) . . . 10

2.3.2. Topología del Convertidor de Potencia 11
2.4. Estrategias de Control 11

3. MODELADO MATEMÁTICO Y ESTRATEGIA DE CONTROL 13
3.1. Descripción del Sistema Propuesto 13
3.2. Dinámica del Rectificador Lado Red (Grid-Side) 13
3.2.1. Modelo vectorial en coordenadas estacionarias 14
3.2.1.1. Modelo en Coordenadas de Fase (abc) 14
3.2.1.2. Representación mediante Vector Espacial 15
3.2.1.3. Modelo en Coordenadas Estacionarias ($\alpha\beta$) . . . 16
3.2.2. Modelo en el marco síncrono (dq) 16
3.2.3. Dinámica del Bus de Corriente Continua (DC-Link) . . . 18
3.3. Sincronización y Estimación de Ángulo (PLL) 19
3.3.1. Detector de Fase y Transformada Global 20
3.3.2. Estimación de Magnitud y Normalización 20
3.3.3. Filtro de Bucle y Generación de Ángulo (VCO) 21
3.4. Estrategia de Control Orientado al Voltaje (VOC) 21
3.4.1. Diseño del Lazo Interno de Corriente 22
3.4.2. Estrategia de Desacoplo y Control 23
3.4.3. Diseño del Lazo Externo de Voltaje 24
3.5. Modelado Dinámico de la Máquina Síncrona (PMSM) 25
3.5.1. Modelo vectorial en coordenadas estacionarias 25
3.5.1.1. Modelo en Coordenadas Estacionarias ($\alpha\beta$) . . . 26
3.5.2. Modelo matemático en coordenadas dq 27
3.5.3. Torque Electromagnético y Dinámica Mecánica 28
3.6. Estrategia de Control de Campo Orientado (FOC) 29
3.6.1. Diseño del Lazo Interno de Corriente 30
3.6.2. Generación de Referencias de Corriente (MTPA) 31
3.6.3. Diseño del Lazo Externo de Velocidad 32

4. VALIDACIÓN UNITARIA Y SIMULACIÓN DE SUBSISTEMAS 33
4.1. Entorno de Simulación 33
4.2. Validación del Lado Red (GSC) 33
4.2.1. Parámetros y Condiciones Nominales 34
4.2.2. Diseño y Sintonización del Lazo Interno de Corriente . . . 35
4.2.3. Diseño del Lazo Externo de Tensión DC 38
4.2.4. Respuesta Dinámica del Rectificador PWM (AFE) . . . 39
4.3. Validación del Lado Máquina (MSC) 41
4.3.1. Parámetros y Condiciones Nominales 41
4.3.2. Diseño y Sintonización del Lazo Interno de Corriente . . . 42
4.3.3. Estrategia Máximo Torque por Amperio (MTPA) 43
4.3.4. Diseño y Sintonización del Lazo Externo de Velocidad . . 43

4.3.5. Respuesta Dinámica del Lado Máquina (MSC) 44
4.3.5.1. Análisis de Velocidad, Torque y Corrientes . . . 44

5. INTEGRACIÓN Y VALIDACIÓN ELECTROMECÁNICA DEL SISTEMA 47
5.1. Integración del Sistema de Potencia: Configuración Back-to-Back . 47
5.2. Modelación y Parametrización de la Planta Mecánica 48
5.3. Estrategia de Control Supervisor y Lógica de Operación 50
5.4. Análisis de Ciclos de Operación 50
5.4.1. Funcionamiento del Ciclo de Carga (Almacenamiento) . . 51
5.4.2. Funcionamiento del Ciclo de Descarga (Generación) . . . 52
5.5. Análisis de Resultados 53
5.5.1. Desempeño durante el Ciclo de Almacenamiento (Izaje) . . 53
5.5.2. Desempeño durante el Ciclo de Generación (Freno Regenerativo) 56
5.6. Síntesis de la Validación y Transición a Nivel de Red 60

6. ESTUDIO DE CASO: INTEGRACIÓN A LA RED Y COMPENSACIÓN FOTOVOLTAICA 61
6.1. Definición del Perfil Cinemático y Potencia Base 62
6.2. Perfil Operativo de la Red y Capacidad Nominal del SGESS . . . 63
6.3. Validación de Estrategias de Escalamiento: Experimentos Progresivos 65
6.3.1. Experimento 1: Operación de una Unidad Aislada 65
6.3.2. Experimento 2: Escalamiento Temporal (Operación en Relevo) 66
6.3.3. Experimento 3: Escalamiento en Amplitud (Operación en Paralelo) 67
6.3.4. Experimento 4: Operación Combinada Matricial (Paralelo y Relevo) 69
6.4. Síntesis del Capítulo 70

7. CONCLUSIONES 71
7.1. Conclusiones Generales 71
7.2. Contribuciones de la Memoria 72
7.3. Trabajos Futuros 73

A. SIMULACIONES 75
A.1. Simulación convertidor de 2 niveles AFE con estrategia control VOC 75
A.2. Simulación convertidor de 2 niveles conectado a PMSM con estrategia control FOC 76
A.3. Simulación convertidor Back To Back conectado a PMSM y SGES . 77

REFERENCIAS 78

REFERENCIAS 78

Índice de figuras

2.1. Clasificación de las ESS [3]. 6
2.2. Visualización de las cuatro topologías principales de almacenamiento por gravedad sólida (SGES). 9
2.3. Planta EVx en Rudong, China (25 MW / 100 MWh), utilizada como referencia para el modelado en esta memoria [15]. 10
2.4. Diagramas de las disposiciones constructivas de motores PMSM. . 11

3.1. Esquema eléctrico del rectificador activo (AFE) y su interfaz de conexión a la red. 14
3.2. Representación del vector espacial en el plano complejo para el convertidor AFE. 16
3.3. Representación de los términos de acoplamiento en el marco de referencia *dq*. 18
3.4. Diagrama de bloques general del sistema SRF-PLL. 19
3.5. Arquitectura del detector de fase basado en transformaciones de coordenadas. 20
3.6. Diagrama de bloques de la estrategia de control en cascada VOC. . 22
3.7. Diagrama de bloques de la compensación por *feed-forward* en la estrategia VOC. 24
3.8. Representación esquemática de la máquina síncrona de imanes permanentes. 25
3.9. Modelado circuital de la PMSM en el marco de referencia rotatorio *dq*. 27
3.10. Interacción y acoplamiento dinámico entre los ejes *d* y *q* de la máquina. 28
3.11. Diagrama de bloques general de la estrategia de control FOC para la PMSM. 29
3.12. Esquema de compensación por *feed-forward* en el control de corrientes de la PMSM. 31

4.1. Diagrama de bloques del controlador PI en su forma paralela. . . 36
4.2. Diagrama de bloques del controlador PI con estrategia Anti-Windup mediante integración condicional. 37

4.3. Respuesta dinámica del AFE ante variaciones de consigna de tensión y escalones de carga en el bus DC. 40
4.4. Respuesta dinámica de la PMSM: seguimiento de velocidad, par eléctrico, corrientes *dq* y corrientes de fase. 45

5.1. Diagrama de bloques de la cadena de conversión electromecánica del SGES, ilustrando la interconexión bidireccional entre la red eléctrica, el convertidor estático Back-to-Back y el accionamiento PMSM. . . 47
5.2. Evolución de la posición del gancho y el bloque junto a la velocidad mecánica durante el ciclo de carga (izaje desde el suelo). 54
5.3. Balance de potencias en el sistema: potencia de red (P_{gsc}), potencia mecánica (P_{msc}) y potencia en el bus DC. 55
5.4. Variables eléctricas del sistema: tensión del bus DC y corrientes de fase del estator. 56
5.5. Evolución de la posición del gancho y el bloque junto a la velocidad mecánica durante el ciclo de descarga (freno regenerativo). . . . 57
5.6. Balance de potencias durante la generación: potencia mecánica (P_{msc}), potencia de red (P_{gsc}) y potencia en el bus DC (P_{dc}). . . 58
5.7. Variables eléctricas durante la generación: tensión del bus DC y corrientes de fase del estator operando en cuarto cuadrante. . . . 59

6.1. Diagrama de bloques de la interconexión entre la planta fotovoltaica (PV), el sistema de almacenamiento gravitacional (SGESS) y la red eléctrica. 61
6.2. Experimento 1: Operación de un bloque aislado compensando eventos de exceso (absorción) y déficit (inyección) del 5 % durante 101 s. . 66
6.3. Experimento 2: Operación en relevo. Dos bloques secuenciales compensando un evento del 5 % durante 202 s. 67
6.4. Experimento 3: Operación en paralelo. Dos bloques simultáneos compensando un evento del 10 % durante 101 s. 68
6.5. Experimento 4: Operación combinada. Cuatro bloques en paralelo y relevo compensando un evento del 10 % durante 202 s. 69

A.1. Esquemáticos completos del GSC en PLECS. 75
A.2. Esquemáticos completos del GSC en PLECS. 76
A.3. Esquemáticos completos del sistema conectado a SGES en PLECS. . 77

ABREVIACIONES

Mayúsculas

AFE	: active front end
ARES	: advanced rail energy storage
B2B	: back-to-back
CAES	: compressed air energy storage
CES	: chemical energy storage
DC	: direct current
EMS	: energy management system
ESS	: energy storage systems
EVx	: energy vault platform architecture
FOC	: field-oriented control
GESS	: gravity energy storage systems
GSC	: grid side converter
GUI	: graphical user interface
IDE	: integrated development environment
IPMSM	: interior permanent magnet synchronous machine
LIDAR	: light detection and ranging
LTI	: linear time-invariant
M-SGES	: mountain-based solid gravity energy storage
MES	: mechanical energy storage
MPC	: model predictive control
MSC	: machine side converter
MTPA	: maximum torque per ampere
PCC	: point of common coupling
PHS	: pumped hydroelectric storage
PI	: proporcional integral
PLECS	: piece-wise linear electrical circuit simulation
PLL	: phase locked loop
PMSM	: permanent magnet synchronous machine
PV	: photovoltaic
PWM	: pulse width modulation

R-SGES : rail-based solid gravity energy storage
S-SGES : shaft-based solid gravity energy storage
SGES : solid gravity energy storage
SGESS : solid gravity energy storage system
SMES : superconducting magnetic energy storage
SPMSM : surface permanent magnet synchronous machine
SR : set-reset
SRF : synchronous reference frame
T-SGES : tower-based solid gravity energy storage
TES : thermal energy storage
THD : total harmonic distortion
VOC : voltage oriented control
VSC : voltage source converter

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto Energético y Motivación

El aumento acelerado en la generación eléctrica a partir de fuentes renovables ha impulsado el desarrollo de tecnologías de almacenamiento capaces de mitigar su variabilidad e intermitencia intrínsecas. En este escenario, las baterías gravitacionales (*Gravity Energy Storage Systems*, GESS) surgen como una alternativa prometedora frente a las soluciones electroquímicas tradicionales, destacando por su bajo impacto ambiental, alta durabilidad y la capacidad de almacenar energía mecánica mediante el desplazamiento de masas.

A diferencia de otros sistemas, las GESS utilizan principios físicos simples para acumular y liberar energía, lo que las posiciona como una opción viable tanto para el respaldo energético como para la prestación de servicios auxiliares, tales como la regulación de frecuencia.

La motivación de este trabajo reside en que la integración efectiva de estas baterías en los sistemas eléctricos requiere un modelado preciso que contemple tanto su dinámica mecánica como la electrónica de potencia necesaria para su conversión y control. Por ello, resulta fundamental desarrollar un modelo representativo que permita evaluar su comportamiento dinámico, estabilidad y eficiencia operativa ante diversos escenarios de la red, tales como variaciones de carga y operación en régimen transitorio.

1.2. Definición del Problema

A pesar de la madurez de las tecnologías de almacenamiento convencionales, estas presentan limitaciones críticas ante los nuevos requerimientos de la red eléctrica. Las baterías electroquímicas de ion-litio enfrentan desafíos de sostenibilidad debido al impacto ambiental de la extracción de materiales y su

degradación química, lo que limita su vida útil operativa. Por otro lado, los sistemas de bombeo hidráulico, aunque eficientes, están condicionados por restricciones geográficas severas y un alto impacto en el entorno.

En este contexto, las baterías gravitacionales (GESS) surgen como una solución mecánica robusta y de bajo impacto ambiental. Sin embargo, su implementación efectiva presenta un problema técnico complejo: la necesidad de una integración precisa entre la dinámica de masas y el control de la electrónica de potencia. Actualmente, existe una brecha en el desarrollo de modelos representativos que permitan evaluar simultáneamente la conversión de energía potencial, el control bidireccional de potencia y la estabilidad del sistema al interactuar con la red ante variaciones de carga o regímenes transitorios.

Sin un modelado y simulación detallados que validen estos componentes, no es posible asegurar la eficiencia operativa ni la factibilidad técnica de las GESS como proveedoras de servicios auxiliares y respaldo energético.

1.3. Objetivos del trabajo

1.3.1. Objetivo General

El objetivo principal de este proyecto es desarrollar un modelo computacional que represente el funcionamiento de una batería gravitacional conectada a una red eléctrica, integrando tanto su componente mecánico como la electrónica de potencia requerida para su adecuada integración y control.

1.3.2. Objetivos específicos

Para dar cumplimiento al objetivo general, se proponen las siguientes metas específicas:

- Realizar una revisión bibliográfica del estado del arte de las baterías gravitacionales, analizando sus fundamentos físicos, configuraciones de conexión a red y requisitos de electrónica de potencia asociados.
- Desarrollar un modelo físico simplificado del sistema mecánico que describa el movimiento de masas y la conversión entre energía potencial y eléctrica.
- Diseñar las estrategias de control y seleccionar la topología de conversión (inversor, rectificador o convertidor DC-DC) que permita el intercambio bidireccional de energía entre la batería y la red eléctrica.
- Implementar el sistema completo en un entorno de simulación computacional (como MATLAB/Simulink o PLECS), integrando los modelos mecánicos, eléctricos y sus respectivos controladores.

- Evaluar el comportamiento dinámico del sistema mediante la simulación de diversos escenarios operativos, tales como variaciones de carga, inyección de potencia en demanda máxima y prestación de servicios auxiliares.
- Analizar la factibilidad técnica del diseño propuesto en términos de eficiencia energética, estabilidad, calidad de potencia y capacidad de seguimiento de referencias.

1.4. Metodología de Trabajo

Para el desarrollo de esta memoria, se propone una metodología dividida en etapas consecutivas que aseguran la integración de los sistemas mecánicos y eléctricos:

1. **Revisión bibliográfica y análisis conceptual:** Investigación del estado del arte de las GESS, sus fundamentos físicos y los requisitos de electrónica de potencia para conexión a red.
2. **Modelado del sistema mecánico:** Creación de un modelo físico simplificado que describa el movimiento de las masas y la conversión de energía potencial a eléctrica.
3. **Diseño de electrónica de potencia y control:** Selección de topologías de conversión para el intercambio bidireccional de energía y diseño de estrategias de control de potencia activa y reactiva.
4. **Implementación y simulación:** Integración de los modelos en un entorno computacional (como MATLAB/Simulink) bajo condiciones operacionales realistas.
5. **Análisis de escenarios y resultados:** Evaluación del desempeño ante variaciones de carga y servicios auxiliares, analizando eficiencia, estabilidad y calidad de potencia.

1.4.1. Alcances y Limitaciones

Alcances:

- El trabajo contempla el desarrollo de un modelo funcional y representativo de una batería de gravedad conectada a la red.
- Se incluye el diseño de controladores básicos para regular la transferencia de potencia y asegurar la estabilidad del lazo de control.
- La validación se realizará exclusivamente mediante simulaciones computacionales en escenarios de operación transitoria y régimen permanente.

Limitaciones:

- El modelo mecánico será simplificado, enfocándose en la conversión de energía sin profundizar en pérdidas por fricción mecánica compleja o desgaste de materiales a largo plazo.
- No se contempla la implementación de un prototipo físico ni pruebas experimentales en laboratorio, limitándose al entorno de simulación.
- El análisis de la red eléctrica se centrará en condiciones operacionales representativas (cargas variables, servicios auxiliares) sin considerar fallas severas de la red de transmisión a gran escala.

1.5. Resumen de los Capítulos

Este documento está dividido en siete capítulos.

El **Capítulo 1** presenta la introducción general del trabajo, incluyendo el contexto energético, la motivación, la definición del problema, los objetivos y la metodología empleada.

El **Capítulo 2** desarrolla el estado del arte y los fundamentos técnicos necesarios para comprender el sistema propuesto. Se revisan los sistemas de almacenamiento de energía, las baterías gravitacionales de masas sólidas (SGES), sus principios de operación, soluciones existentes y la electrónica de potencia asociada, además de las principales estrategias de control.

El **Capítulo 3** aborda el modelado matemático y las estrategias de control del sistema. Se describe el modelado del rectificador lado red, la dinámica del enlace DC, el sistema de sincronización (PLL), el control orientado al voltaje (VOC), así como el modelado de la máquina síncrona de imanes permanentes (PMSM) y el control de campo orientado (FOC).

El **Capítulo 4** presenta la validación unitaria y la simulación de los subsistemas eléctricos. Se analizan por separado el convertidor lado red (GSC/AFE) y el convertidor lado máquina (MSC), incluyendo parámetros nominales, diseño y sintonización de lazos de control internos y externos, y evaluación de sus respuestas dinámicas.

El **Capítulo 5** aborda la integración y validación electromecánica del sistema completo bajo una configuración *back-to-back*. Se desarrolla un modelo de alta fidelidad de la planta mecánica inspirada en la tecnología EVx y se implementa la estrategia de control supervisor. A través de la simulación de los ciclos completos de almacenamiento (izaje) y generación (freno regenerativo), se analiza el flujo energético, validando el balance de potencias, el respeto de los límites térmicos y la estricta

estabilidad eléctrica del bus DC frente a la carga gravitatoria.

El **Capítulo 6** trata los casos de aplicaciones reales a los cuales se puede someter el sistema, evaluando su evolución hacia un Sistema de Almacenamiento de Energía Gravitacional Sólido (SGESS) acoplado dinámicamente a una red eléctrica. Específicamente, se analiza su integración con una planta de generación fotovoltaica industrial con el objetivo de mitigar la intermitencia inherente del recurso solar. A través de simulaciones progresivas, el capítulo demuestra cómo la coordinación de múltiples bloques gravitatorios —utilizando estrategias de escalamiento en paralelo y en relevo continuo— permite superar las limitaciones físicas de una unidad aislada, garantizando que el sistema conjunto logre satisfacer una demanda de potencia estable y continua para la red.

El **Capítulo 7** contiene las conclusiones generales del trabajo, las contribuciones de la memoria y las líneas de trabajo futuro propuestas.

Finalmente, en el **Apéndice A** se presentan los esquemáticos de las simulaciones detalladas de cada subsistema y del sistema integrado.

Capítulo 2

ESTADO DEL ARTE Y FUNDAMENTOS TÉCNICOS

Para comenzar a entender el rol de las baterías gravitacionales, es necesario contextualizar las tecnologías de almacenamiento actuales.

2.1. Sistemas de Almacenamiento de Energía (ESS)

El almacenamiento de energía es un pilar fundamental para la estabilidad de la red eléctrica moderna, facilitando la integración masiva de fuentes renovables intermitentes. Como se detalla en la Figura 2.1, los Sistemas de Almacenamiento de Energía (ESS) se categorizan en cinco grupos principales según el principio físico de conversión: electroquímico, químico, eléctrico, térmico y mecánico [1, 2]. Esta taxonomía permite identificar la tecnología más apta según la velocidad de respuesta y la densidad energética requerida.

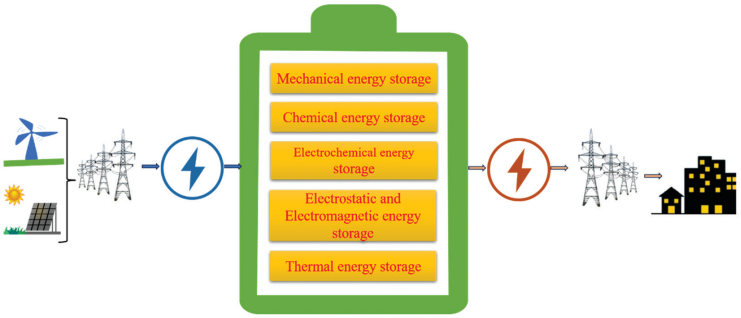


Figura 2.1: Clasificación de las ESS [3].

A continuación, se describen las características principales de cada tipo:

- **Almacenamiento Químico (CES):** Se basa en la producción de combustibles sintéticos, principalmente hidrógeno y metano. Permiten almacenamiento estacional de gran capacidad, aunque la eficiencia del ciclo completo (*round-trip efficiency*) suele ser baja en comparación con otras tecnologías [1].
- **Almacenamiento Eléctrico:** Comprende tecnologías como supercondensadores y almacenamiento magnético superconductor (SMES). Se distinguen por su altísima densidad de potencia y capacidad de respuesta casi instantánea, ideales para la calidad de la energía y estabilidad de red [1].
- **Almacenamiento Electroquímico:** Incluye las baterías primarias y secundarias (recargables) como las de iones de litio (Li-ion) y plomo-ácido. Dominan el mercado actual por su alta densidad energética y modularidad. Las baterías secundarias funcionan invirtiendo procesos químicos mediante una corriente externa, siendo el plomo-ácido la tecnología más tradicional, mientras que el Li-ion lidera en electrónica y electromovilidad [3, 4].
- **Almacenamiento Térmico (TES):** Almacena energía calentando o enfriando un medio de almacenamiento (agua, sales fundidas, materiales de cambio de fase) para su uso posterior en calefacción, refrigeración o generación de energía. Es clave para reducir la demanda energética en edificios y valorizar el calor solar, utilizando calor sensible o latente [5].
- **Almacenamiento Mecánico (MES):** Utiliza energía cinética o potencial para almacenar electricidad en periodos de baja demanda. Las tecnologías principales incluyen volantes de inercia (*flywheels*), aire comprimido (CAES) y bombeo hidráulico (PHS). Este último representa la mayor capacidad instalada mundialmente debido a su larga vida útil, aunque está limitado por la geografía [2, 6].

Pese a las ventajas del PHS, las restricciones geográficas han impulsado la investigación en **Baterías de Gravedad de Masas Sólidas (SGES)**. Estas buscan replicar la física del bombeo hidráulico utilizando masas sólidas (hormigón o compósito) en lugar de agua, eliminando la necesidad de presas y permitiendo una instalación versátil, constituyendo el foco principal de este trabajo.

2.2. Baterías de Gravedad de Masas Sólidas (SGES)

Las Baterías de Gravedad de Masas Sólidas (SGES) emergen como una solución sostenible para el almacenamiento de energía de larga duración. A diferencia de las baterías electroquímicas, las SGES ofrecen una vida útil teórica superior a 50 años, alta eficiencia de ciclo (*round-trip efficiency*) y no sufren degradación de capacidad con el tiempo [7].

2.2.1. Principios de operación y física asociada

El funcionamiento se fundamenta en el almacenamiento de energía potencial gravitatoria (E_p) mediante la elevación de masas sólidas. Durante los periodos de baja demanda o exceso de generación renovable, el sistema utiliza motores eléctricos para elevar bloques de masa m a una altura h, almacenando energía según la ecuación básica:

$$E_p = m \cdot g \cdot \Delta h \tag{2.1}$$

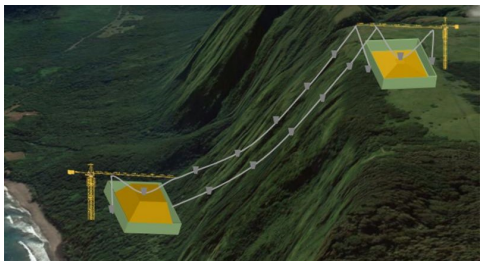
Donde g es la aceleración de gravedad. Durante la descarga, la masa desciende controladamente y los motores operan como generadores, inyectando potencia a la red [8].

2.2.2. Revisión bibliográfica y soluciones existentes

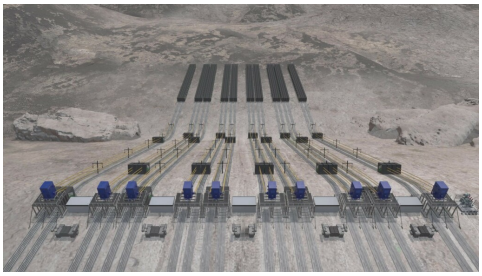
Según la literatura reciente, existen diversas topologías adaptadas a diferentes entornos geográficos y necesidades de aplicación [7, 8]:

- **Mountain-Based Solid Gravity Energy Storage (M-SGES):** Propuesta por Hunt et al. [9], esta tecnología aprovecha pendientes pronunciadas en zonas montañosas para transportar materiales (como arena o grava) entre dos estaciones a diferente altura. Es una alternativa directa al bombeo hidráulico en zonas sin recursos hídricos.
- **Rail-Based Solid Gravity Energy Storage (R-SGES):** Tecnologías como *Advanced Rail Energy Storage* (ARES) utilizan vagones pesados que se desplazan sobre vías férreas en pendiente. La energía se almacena al subir los vagones y se recupera mediante frenado regenerativo al bajar [7].
- **Shaft-Based Solid Gravity Energy Storage (S-SGES):** Utilizan pozos verticales (como minas abandonadas) para suspender grandes pesos. Al estar confinados bajo tierra, tienen un impacto visual nulo y pueden ofrecer tiempos de respuesta muy rápidos [7].
- **Tower-Based Solid Gravity Energy Storage (T-SGES):** Representados por los primeros prototipos de Energy Vault, utilizan una grúa de múltiples brazos para apilar bloques de hormigón o compuesto en un anillo concéntrico. Este diseño validó la física del levantamiento de bloques antes de evolucionar a estructuras cerradas [8].

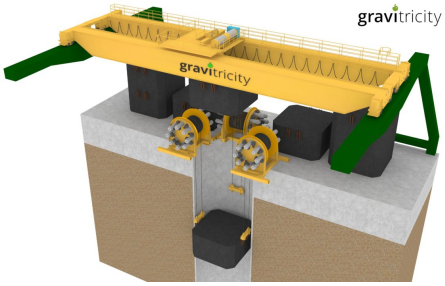
Para facilitar la comprensión de estas diferencias estructurales, la Figura 2.2 presenta una comparativa visual de las cuatro topologías descritas. En ella se aprecia cómo cada variante se adapta a una condición de terreno específica, desde el uso de laderas naturales hasta la verticalidad estricta de pozos y torres.



(a) M-SGES: Aprovechamiento de pendientes naturales [10].



(b) R-SGES: Sistema de vagones pesados sobre rieles [11].



(c) S-SGES: Pesos suspendidos en pozos verticales [12].



(d) T-SGES: Estructuras de grúas para apilamiento de bloques [13].

Figura 2.2: Visualización de las cuatro topologías principales de almacenamiento por gravedad sólida (SGES).

2.2.3. Solución comercial de referencia: Energy Vault (EVx)

La evolución tecnológica de los sistemas T-SGES derivó en la arquitectura **EVx**, la cual constituye el objeto de estudio principal de este trabajo. A diferencia de las grúas expuestas a la intemperie, el EVx es una estructura modular prismática que protege los componentes móviles y optimiza la densidad de energía mediante un sistema de elevación lineal, tal como se aprecia en la Figura 2.3 [8]. El exponente más destacado es el proyecto ubicado en **Rudong, China** (2023), con una capacidad de **100 MWh** y una potencia de **25 MW** [14, 15]. El principal desafío radica en la sincronización precisa de los convertidores para estabilizar el bus DC durante las maniobras de aceleración y frenado de las masas.



Figura 2.3: Planta EVx en Rudong, China (25 MW / 100 MWh), utilizada como referencia para el modelado en esta memoria [15].

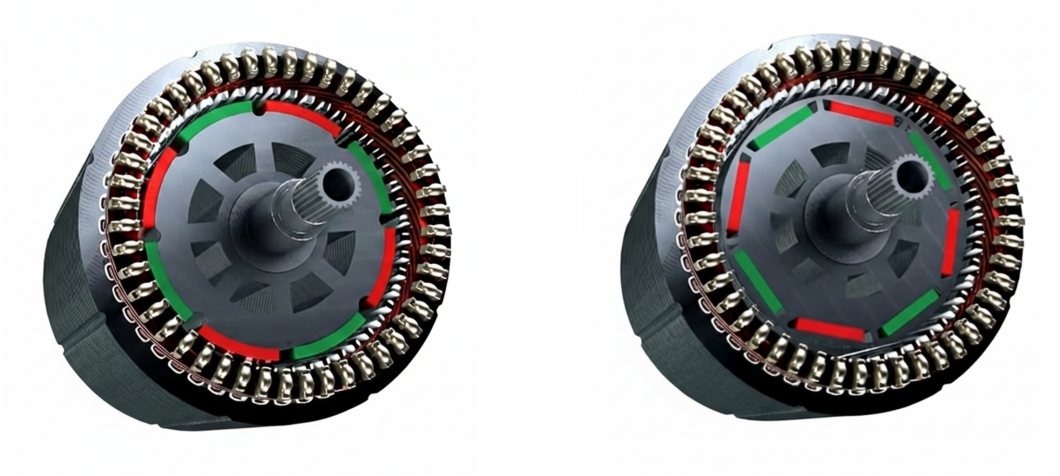
2.3. Conversión Electromecánica y de Potencia

La cadena de conversión de energía es la etapa crítica que vincula el sistema mecánico gravitacional con la red eléctrica. Esta etapa debe ser capaz de operar en cuatro cuadrantes, gestionando tanto la elevación (modo motor) como el descenso (modo generador) con alta eficiencia.

2.3.1. Máquina Síncrona de Imanes Permanentes (PMSM)

En aplicaciones de levantamiento de cargas pesadas, la PMSM se ha consolidado como la tecnología estándar debido a su alta eficiencia. Constructivamente, se clasifican según la disposición de los imanes en el rotor [16]:

- **SPMSM (Surface PMSM):** Los imanes están montados sobre la superficie del rotor. El motor se comporta magnéticamente como si tuviera un entrehierro uniforme, generando torque casi exclusivamente por el flujo de los imanes.
- **IPMSM (Interior PMSM):** Los imanes se insertan dentro de la estructura de hierro del rotor. Esta configuración introduce una mayor **robustez mecánica** contra fuerzas centrífugas y permite generar un **torque de reluctancia** adicional debido a la asimetría magnética del rotor. Esto resulta en una mayor capacidad de torque total, ideal para vencer la inercia de los bloques en el arranque.



(a) Motor SPMSM [17]. (b) Motor IPMSM [17].

Figura 2.4: Diagramas de las disposiciones constructivas de motores PMSM.

Por estas razones, se selecciona la máquina **IPMSM** como la ideal para el sistema de batería de gravedad.

2.3.2. Topología del Convertidor de Potencia

Para gestionar el flujo bidireccional de energía entre la red y la máquina IPMSM, se utiliza un convertidor **Back-to-Back (B2B)** [18]. Esta configuración une dos convertidores de fuente de voltaje (VSC) a través de un bus de corriente continua (DC-Link), permitiendo un desacople total:

- **GSC (Grid Side Converter):** Mantiene estable el voltaje del bus DC y asegura la calidad de la energía inyectada a la red.
- **MSC (Machine Side Converter):** Controla el torque y la velocidad de la máquina, permitiendo que los bloques operen a la velocidad óptima independientemente de la frecuencia de la red.

2.4. Estrategias de Control

El desempeño dinámico de la batería de gravedad depende de las estrategias de control aplicadas:

- **GSC - Control Orientado al Voltaje (VOC):** Se utiliza VOC con moduladores PWM para operar con una frecuencia de conmutación fija. Esto permite un espectro de armónicos predecible, facilitando el cumplimiento de los códigos de red [19].

- **MSC - Control de Campo Orientado (FOC):** Se opta por FOC debido a su capacidad para operar con un bajo rizado (*ripple*) de torque y corriente. Dado que el sistema manipula bloques suspendidos, la suavidad en la generación de torque es prioritaria para evitar vibraciones mecánicas que comprometan la estructura del edificio EVx [20].

Capítulo 3

MODELADO MATEMÁTICO Y ESTRATEGIA DE CONTROL

En este capítulo se presenta el modelado fenomenológico y el diseño de los lazos de control para el sistema de conversión de energía propuesto. El estudio abarca desde la dinámica de los filtros de red hasta las estrategias avanzadas de control para elconvertidor AFE y la máquina de imanes permanentes.

3.1. Descripción del Sistema Propuesto

El sistema de conversión de energía se basa en una topología *back-to-back* que permite el flujo bidireccional de potencia. Esta configuración consta de un rectificador activo frontal (*Active Front End*, AFE), un enlace de corriente continua (bus DC) y un inversor encargado de accionar una máquina síncrona de imanes permanentes (IPMSM). El control coordinado de estas etapas garantiza que la energía mecánica proveniente de las masas gravitacionales se integre de forma eficiente y estable a la red eléctrica.

3.2. Dinámica del Rectificador Lado Red (Grid-Side)

La primera etapa de conversión vincula la red eléctrica con el bus de continua. Para el modelado, se considera el esquema del rectificador AFE conectado a través de un filtro inductivo, como se ilustra en la Figura 3.1.

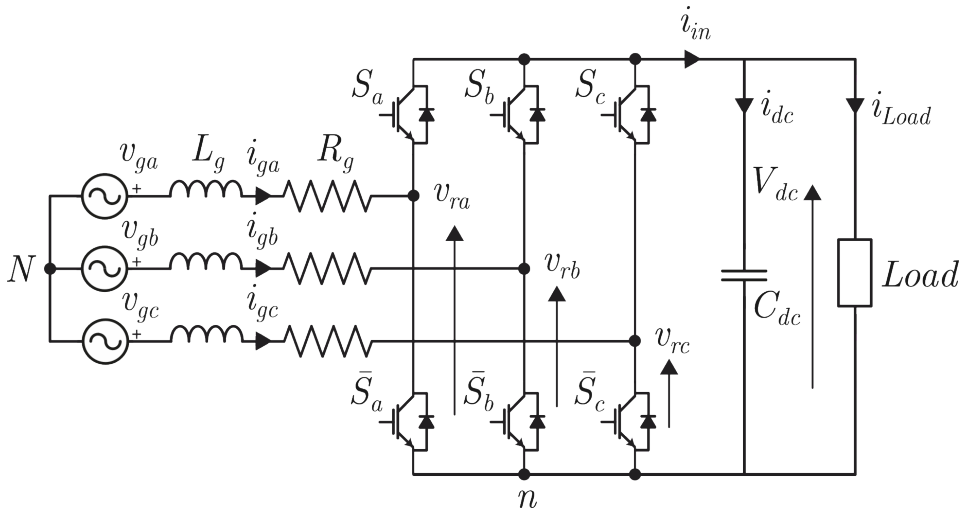


Figura 3.1: Esquema eléctrico del rectificador activo (AFE) y su interfaz de conexión a la red.

3.2.1. Modelo vectorial en coordenadas estacionarias

3.2.1.1. Modelo en Coordenadas de Fase (abc)

La dinámica eléctrica de la conexión a la red mediante el filtro inductivo L_g con resistencia parásita R_g se rige por la ley de voltajes de Kirchhoff. Considerando la diferencia de potencial entre el neutro de la red (N) y el punto neutro flotante del convertidor (n), el sistema se describe mediante las ecuaciones en (3.1):

$$\begin{cases} v_{ga} = R_g i_{ga} + L_g \dfrac{di_{ga}}{dt} + v_{ra} + v_{Nn} \\ v_{gb} = R_g i_{gb} + L_g \dfrac{di_{gb}}{dt} + v_{rb} + v_{Nn} \\ v_{gc} = R_g i_{gc} + L_g \dfrac{di_{gc}}{dt} + v_{rc} + v_{Nn} \end{cases} \tag{3.1}$$

En este modelo, las tensiones aplicadas por el AFE en cada rama ($v_{ra,b,c}$) se definen respecto al punto medio del enlace de continua. Estas magnitudes dependen de los estados de conmutación de los interruptores de potencia y de la tensión total del bus DC (v_{dc}), según la relación expresada en (3.2):

$$v_{rk} = S_k \frac{v_{dc}}{2} \quad \text{con } k \in \{a, b, c\} \tag{3.2}$$

Por otro lado, la tensión de desplazamiento del neutro (v_{Nn}) aparece como consecuencia directa de la condición de neutro aislado, la cual impide la circulación de la componente de secuencia cero. Esta tensión se determina mediante (3.3):

$$v_{Nn} = -\frac{v_{ra} + v_{rb} + v_{rc}}{3} \tag{3.3}$$

Los parámetros y variables que componen el modelo de fase se definen a continuación:

- $v_{ga,b,c}$: Tensiones de fase de la red eléctrica referidas al neutro N.
- $i_{ga,b,c}$: Corrientes de línea que circulan a través del filtro serie.
- $v_{ra,b,c}$: Tensiones de polo del convertidor referidas al punto medio del bus DC.
- v_{Nn}: Tensión de modo común entre el neutro de la red y el del convertidor.
- v_{dc}: Tensión del enlace de corriente continua.
- $S_{a,b,c}$: Estados de conmutación de los semiconductores por fase.
- R_g, L_g: Resistencia e inductancia del filtro de entrada, respectivamente.

3.2.1.2. Representación mediante Vector Espacial

Para simplificar el análisis y reducir el orden de las ecuaciones, se utiliza la representación de vectores espaciales. Se introduce el operador de rotación complejo a definido en (3.4), el cual representa un desplazamiento angular de 120° en el plano complejo:

$$a = e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \tag{3.4}$$

A partir de este operador, se definen los vectores espaciales de tensión de red ($\vec{v}_g$), corriente ($\vec{i}_g$) y tensión del convertidor ($\vec{v}_r$) mediante la transformación general indicada en (3.5):

$$\vec{x} = \frac{2}{3}(x_a + a x_b + a^2 x_c) \tag{3.5}$$

Al aplicar esta transformación al sistema de ecuaciones de fase (3.1), el término de tensión de modo común v_{Nn} queda asociado al factor $(1 + a + a^2)$. Debido a la identidad geométrica de las raíces de la unidad presentada en (3.6):

$$1 + a + a^2 = 0 \tag{3.6}$$

Dicha componente de modo común se anula, permitiendo obtener una descripción dinámica compacta. La evolución temporal del sistema en el marco estacionario queda determinada por la ecuación vectorial (3.7):

$$\vec{v}_g = R_g \vec{i}_g + L_g \frac{d\vec{i}_g}{dt} + \vec{v}_r \tag{3.7}$$

En esta expresión, $\vec{v}_g$ representa el vector de tensión de red, $\vec{i}_g$ el vector de corriente de línea y $\vec{v}_r$ el vector de tensión generado por las conmutaciones del AFE.

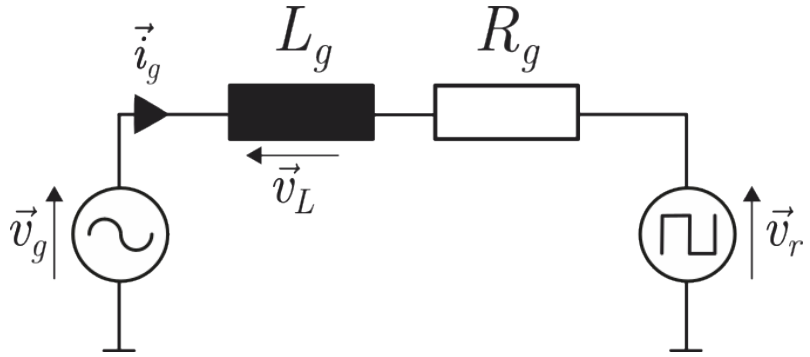


Figura 3.2: Representación del vector espacial en el plano complejo para el convertidor AFE.

3.2.1.3. Modelo en Coordenadas Estacionarias ($\alpha\beta$)

La Transformada de Clarke permite proyectar las variables trifásicas originales sobre un marco de referencia ortogonal estacionario. Para cualquier conjunto de variables x_{abc}, la transformación matricial para obtener las componentes $\alpha\beta$ se define en (3.8):

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \tag{3.8}$$

A través de estas componentes ortogonales, es posible reconstruir el vector espacial complejo como $\vec{x}^{(\alpha\beta)} = x_\alpha + jx_\beta$. Al aplicar esta operación a la dinámica del sistema, se obtiene el modelo vectorial en el marco estacionario (3.9):

$$\vec{v}_g^{(\alpha\beta)} = R_g \vec{i}_g^{(\alpha\beta)} + L_g \frac{d\vec{i}_g^{(\alpha\beta)}}{dt} + \vec{v}_r^{(\alpha\beta)} \tag{3.9}$$

Finalmente, al descomponer (3.9) en sus ejes real e imaginario, se obtienen las ecuaciones desacopladas por eje presentadas en (3.10):

$$\begin{cases} v_{g\alpha} = R_g i_{g\alpha} + L_g \dfrac{di_{g\alpha}}{dt} + v_{r\alpha} \\ v_{g\beta} = R_g i_{g\beta} + L_g \dfrac{di_{g\beta}}{dt} + v_{r\beta} \end{cases} \tag{3.10}$$

3.2.2. Modelo en el marco síncrono (dq)

Para obtener magnitudes constantes en el tiempo (continuas) durante el estado estacionario, se aplica la Transformada de Park. Esta técnica proyecta los vectores

espaciales sobre un marco de referencia que gira a la frecuencia síncrona de la red (ω_g).

La transición entre el marco estacionario ($\alpha\beta$) y el marco rotatorio (dq) se realiza mediante una rotación angular. El vector espacial en el marco síncrono se vincula con el marco estacionario mediante la expresión exponencial definida en (3.11):

$$\vec{x}_g^{(dq)} = \vec{x}_g^{(\alpha\beta)} e^{-j\hat{\theta}} \tag{3.11}$$

Esta relación se puede representar en forma matricial, lo que permite proyectar las componentes ortogonales sobre los ejes que giran a la velocidad angular del sistema, tal como se muestra en (3.12):

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \\ -\sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \tag{3.12}$$

Al derivar la expresión (3.11) respecto al tiempo, surge el término de acoplamiento cruzado debido a la naturaleza rotatoria del sistema de referencia. El modelo dinámico vectorial resultante en este marco se presenta en (3.13):

$$\vec{v}_g^{(dq)} = R_g \vec{i}_g^{(dq)} + L_g \frac{d\vec{i}_g^{(dq)}}{dt} + j\omega_g L_g \vec{i}_g^{(dq)} + \vec{v}_r^{(dq)} \tag{3.13}$$

Al separar la ecuación vectorial en sus componentes de eje directo (d) y de cuadratura (q), se obtiene el modelo dinámico final en el dominio del tiempo descrito en el sistema (3.14):

$$v_{gd} = R_g i_{gd} + L_g \frac{di_{gd}}{dt} - \omega_g L_g i_{gq} + v_{rd} \tag{3.14a}$$

$$v_{gq} = R_g i_{gq} + L_g \frac{di_{gq}}{dt} + \omega_g L_g i_{gd} + v_{rq} \tag{3.14b}$$

En las expresiones (3.14a) y (3.14b), se destacan los términos de acoplamiento cruzado, los cuales representan la interacción mutua entre ambos ejes debido a la rotación del marco de referencia. Esta interacción se ilustra esquemáticamente en la Figura 3.3.

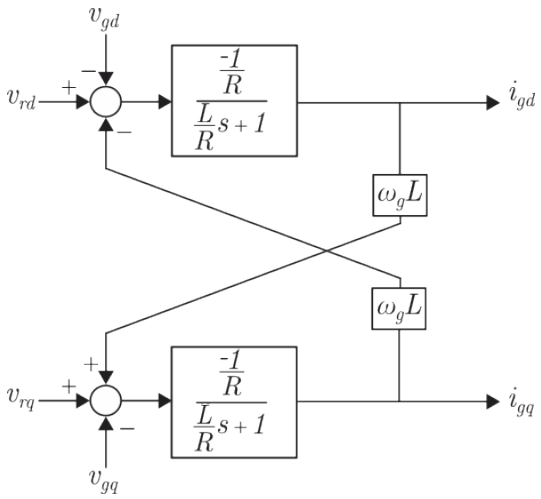


Figura 3.3: Representación de los términos de acoplamiento en el marco de referencia dq.

3.2.3. Dinámica del Bus de Corriente Continua (DC-Link)

El enlace de corriente continua actúa como un pulmón de energía que desacopla la frecuencia de la red eléctrica de la frecuencia variable de la máquina síncrona. La dinámica del voltaje en el bus (v_{dc}) se determina aplicando la ley de corrientes de Kirchhoff en el nodo del capacitor C_{dc}. Considerando el balance de flujos, la variación de tensión en el tiempo depende de la diferencia entre la corriente rectificada proveniente de la red (i_{in}) y la corriente demandada por el lado de la máquina (i_L), según la ecuación (3.15):

$$C_{dc}\frac{dv_{dc}}{dt} = i_{in} - i_L \tag{3.15}$$

Para relacionar i_{in} con las variables de corriente alterna, se aplica un balance de potencia activa instantánea entre el lado AC y el lado DC. Despreciando las pérdidas en los semiconductores del convertidor, la potencia entregada por la red debe igualar a la potencia recibida por el bus DC:

$$P_{DC} = P_{AC} \implies v_{dc} \cdot i_{in} = \frac{3}{2}\left(v_{gd}\, i_{gd} + v_{gq}\, i_{gq}\right) \tag{3.16}$$

Al emplear un marco de referencia síncrono alineado con el voltaje de red, la componente en cuadratura se anula ($v_{gq} = 0$) y la tensión de eje directo coincide con la magnitud de fase de la red ($v_{gd} = v_g$), de modo que la transferencia de potencia activa depende exclusivamente de la corriente del eje directo (i_{gd}). Despejando i_{in} de la igualdad de potencias, se obtiene la relación (3.17):

$$i_{in}(t) = \frac{3}{2}\,\frac{v_g}{v_{dc}}\, i_{gd}(t) \tag{3.17}$$

Sustituyendo esta expresión en la dinámica del capacitor, se obtiene el modelo que vincula el rectificador con el voltaje del bus en (3.18):

$$C_{dc}\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{3}{2}\frac{v_g}{v_{dc}}\,i_{gd} - i_L \tag{3.18}$$

Nótese que este modelo es no lineal debido al producto v_g/v_{dc}, lo cual es relevante para el diseño del controlador. En esta expresión, i_L representa una perturbación externa cuyo comportamiento está definido por el modo de operación del sistema de almacenamiento:

- **Modo Motor ($i_L > 0$):** El sistema extrae corriente del bus para elevar la masa gravitacional, tendiendo a descargar el capacitor.
- **Modo Generador ($i_L < 0$):** El sistema inyecta corriente al bus durante el descenso de la masa, tendiendo a elevar la tensión del capacitor.

3.3. Sincronización y Estimación de Ángulo (PLL)

Para garantizar la implementación robusta del control en el marco síncrono, es imperativo estimar con precisión el ángulo de fase de la red ($\hat{\theta}$). El algoritmo de Marco de Referencia Síncrono (SRF-PLL) logra este objetivo mediante un lazo de control que alinea de forma dinámica el eje d del marco rotatorio con el vector de tensión de red $\vec{v}_g$. El esquema general de este lazo de control se presenta en la Figura 3.4.

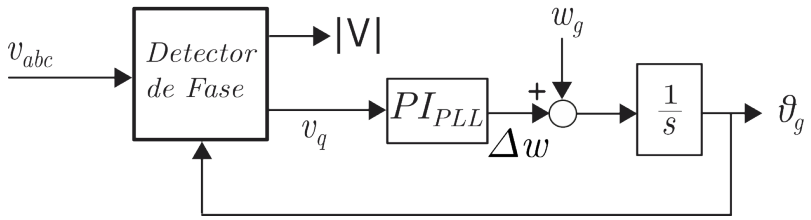


Figura 3.4: Diagrama de bloques general del sistema SRF-PLL.

Por otro lado, la estructura interna del detector de fase, encargada de extraer la información de error del sistema trifásico, se ilustra detalladamente en la Figura 3.5.

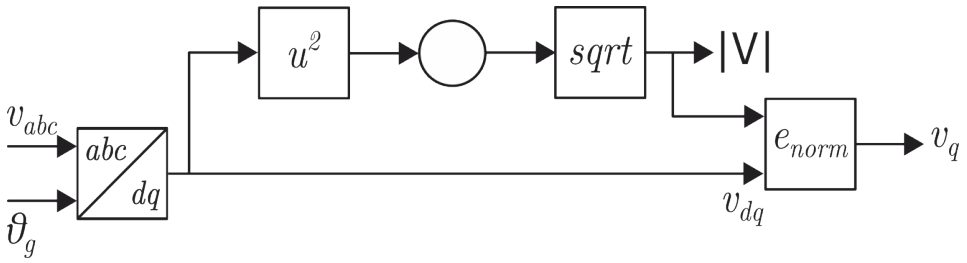


Figura 3.5: Arquitectura del detector de fase basado en transformaciones de coordenadas.

Para facilitar la comprensión del funcionamiento del SRF-PLL, se definen los siguientes tres componentes fundamentales:

3.3.1. Detector de Fase y Transformada Global

Combinando la transformación de Clarke detallada en (3.8) con la rotación matricial descrita en (3.12), se obtiene la matriz de transformación de Park global. Esta matriz, presentada en (3.19), permite convertir directamente las variables de fase *abc* al marco síncrono *dq*:

$$\begin{bmatrix} v_{gd} \\ v_{gq} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta} - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\hat{\theta} + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\hat{\theta}) & -\sin(\hat{\theta} - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\hat{\theta} - \frac{2\pi}{3} + \pi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ga} \\ v_{gb} \\ v_{gc} \end{bmatrix} \tag{3.19}$$

En este esquema, la componente de cuadratura v_{gq} actúa como la señal de error del bucle. Cuando el PLL se encuentra en estado de enganche (*lock*), el sistema de control fuerza que $v_{gq} \to 0$, indicando que el ángulo estimado $\hat{\theta}$ sigue fielmente al ángulo real de la red θ.

3.3.2. Estimación de Magnitud y Normalización

Para asegurar que la dinámica del lazo sea independiente de las variaciones en la amplitud de la tensión de red, se calcula primero la magnitud del vector de tensión mediante la norma de sus componentes en (3.20):

$$|V| = \sqrt{v_{gd}^2 + v_{gq}^2} \tag{3.20}$$

Posteriormente, esta señal se utiliza para normalizar el error de fase antes de que este ingrese al controlador. Como se observa en (3.21), se incluye un término de seguridad ϵ (un valor positivo muy pequeño) para evitar indeterminaciones matemáticas en caso de una ausencia total de tensión en la red:

$$e_{norm} = \frac{v_{gq}}{\text{máx}(|V|, \epsilon)} \tag{3.21}$$

3.3.3. Filtro de Bucle y Generación de Ángulo (VCO)

El error normalizado e_{norm} se procesa a través de un controlador Proporcional-Integral (PI), cuya salida representa la corrección de frecuencia $\Delta\omega$. La suma de esta corrección con la frecuencia nominal de la red ω_g constituye la frecuencia angular estimada, la cual es integrada para generar el ángulo de fase final según la expresión (3.22):

$$\hat{\theta} = \int \left(\omega_g + K_p e_{norm} + K_i \int e_{norm}\, dt \right) dt \tag{3.22}$$

Este ángulo $\hat{\theta}$ cierra el lazo de retroalimentación de la transformación de Park, asegurando la orientación del marco de referencia *dq* con respecto al vector de tensión de red, cumpliendo la condición $v_q = 0$.

3.4. Estrategia de Control Orientado al Voltaje (VOC)

Una vez obtenido el ángulo de orientación mediante el PLL, la estrategia de Control Orientado al Voltaje (*Voltage Oriented Control*, VOC) se implementa mediante una estructura de control en cascada. Esta arquitectura, ilustrada en la Figura 3.6, se compone de dos niveles jerárquicos:

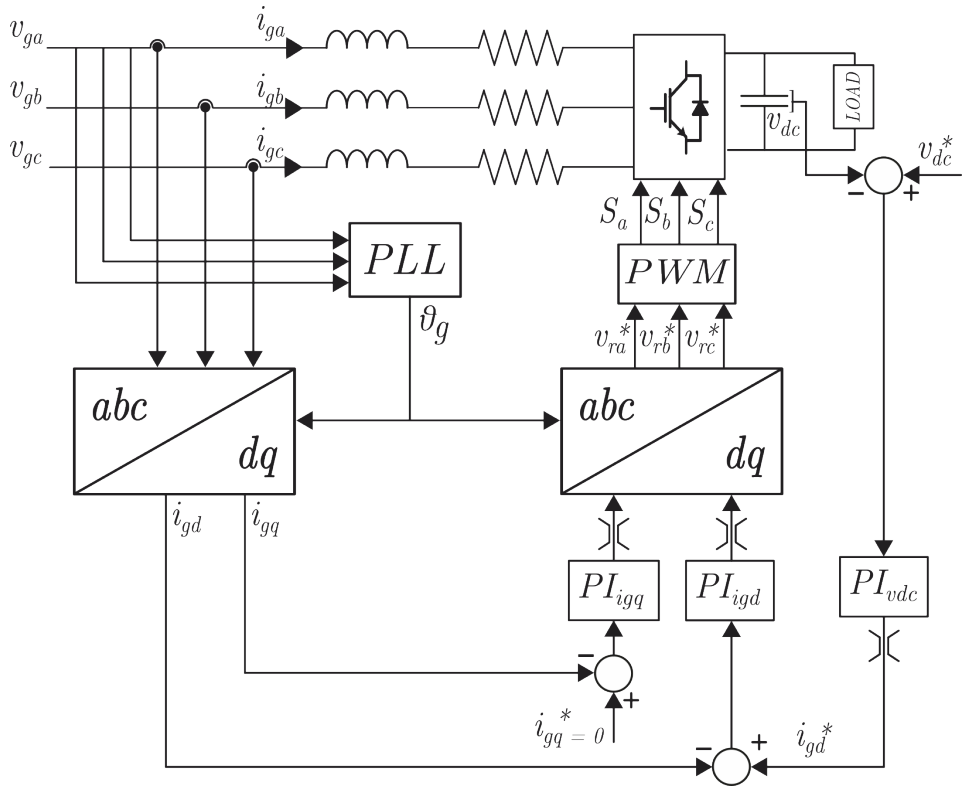


Figura 3.6: Diagrama de bloques de la estrategia de control en cascada VOC.

1. **Lazo interno de corriente:** Encargado de regular las componentes i_{gd} e i_{gq} con una dinámica rápida. En términos de control de máquinas, este lazo es el equivalente al control de torque.

2. **Lazo externo de voltaje:** Regula la tensión del bus de continua v_{dc} generando la referencia de corriente activa i_{gd}^*. Su dinámica es más lenta para garantizar la estabilidad del sistema, siendo equivalente al lazo de velocidad.

3.4.1. Diseño del Lazo Interno de Corriente

Bajo una correcta orientación proporcionada por el PLL, el eje directo d se alinea permanentemente con el vector de tensión de la red $\vec{v}_g$. Esta condición simplifica significativamente las variables de control, imponiendo las restricciones presentadas en (3.23):

$$\begin{cases} v_{gd} \approx |\vec{v}_g| \\ v_{gq} = 0 \end{cases} \tag{3.23}$$

Modelo en el dominio de Laplace

Al aplicar la transformada de Laplace a las ecuaciones dinámicas del sistema detalladas previamente en (3.14a) y (3.14b), y considerando la condición de orientación ($v_{gq} = 0$), se obtiene el balance de voltajes en el dominio de la frecuencia:

$$\text{Eje } d: \quad V_{gd}(s) = (R_g + sL_g)I_{gd}(s) - \omega_g L_g I_{gq}(s) + V_{rd}(s) \tag{3.24}$$

$$\text{Eje } q: \quad 0 = (R_g + sL_g)I_{gq}(s) + \omega_g L_g I_{gd}(s) + V_{rq}(s) \tag{3.25}$$

Para el diseño del controlador, se reordenan las expresiones aislando la caída en la impedancia del filtro a la izquierda y separando la acción de control de las perturbaciones a la derecha, resultando en las ecuaciones (3.26) y (3.27):

$$\underbrace{(L_g s + R_g)I_{gd}(s)}_{\text{Dinámica Planta}} = \underbrace{-V_{rd}(s)}_{\text{Acción Control}} + \underbrace{[V_{gd}(s) + \omega_g L_g I_{gq}(s)]}_{\text{Perturbaciones}} \tag{3.26}$$

$$\underbrace{(L_g s + R_g)I_{gq}(s)}_{\text{Dinámica Planta}} = \underbrace{-V_{rq}(s)}_{\text{Acción Control}} + \underbrace{[-\omega_g L_g I_{gd}(s)]}_{\text{Perturbaciones}} \tag{3.27}$$

De este análisis se desprenden dos conclusiones fundamentales:

- La **planta nominal** a controlar es la impedancia del filtro L_g y R_g. Nótese que la entrada de control (V_{rd}, V_{rq}) posee un signo negativo, lo que indica que un incremento en la tensión del rectificador se opone al flujo de corriente desde la red.
- Existen componentes de **perturbación** aditivos: la tensión de red v_{gd} y los voltajes inducidos por el acoplamiento entre ejes ($\omega_g L_g i$).

Función de Transferencia de la Planta

Para obtener la función de transferencia necesaria para el sintonizado, se aísla la relación entre la variable manipulada y la controlada, omitiendo temporalmente las perturbaciones. Dado que la dinámica eléctrica es simétrica para ambos ejes, se define una única planta nominal $G_i(s)$ en (3.28):

$$G_i(s) = \frac{I_{gd}(s)}{V_{rd}(s)} = \frac{I_{gq}(s)}{V_{rq}(s)} = \frac{-1}{L_g s + R_g} \tag{3.28}$$

3.4.2. Estrategia de Desacoplo y Control

Acoplamiento entre ejes

Como se observa en las expresiones de balance (3.26) y (3.27), la dinámica del eje d depende de la corriente del eje q (y viceversa) debido a los términos de rotación $\pm\omega_g L_g i$. Este fenómeno de acoplamiento cruzado dificulta el control independiente de la potencia activa y reactiva.

Compensación por Feed-forward

Para mitigar este efecto, se implementa una estrategia de pre-alimentación (*feed-forward*), la cual consiste en inyectar el valor de las perturbaciones conocidas directamente a la salida de los controladores. Si se definen u_d y u_q como las salidas de los reguladores PI, las referencias de tensión finales v_{rd}^* y v_{rq}^* se calculan mediante el sistema (3.29):

$$\begin{cases} v_{rd}^* = -u_d + (v_{gd} + \omega_g L_g i_{gq}) \\ v_{rq}^* = -u_q - (\omega_g L_g i_{gd}) \end{cases} \tag{3.29}$$

El diagrama de bloques que representa esta compensación se ilustra en la Figura 3.7.

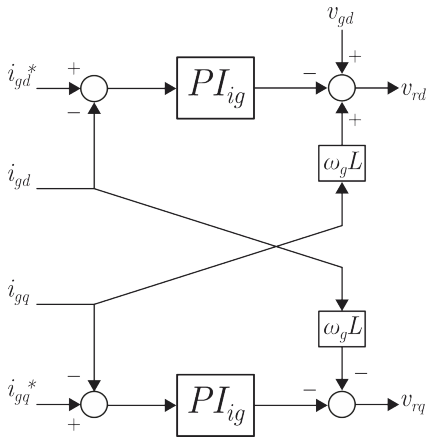


Figura 3.7: Diagrama de bloques de la compensación por *feed-forward* en la estrategia VOC.

3.4.3. Diseño del Lazo Externo de Voltaje

El propósito de este lazo es mantener la estabilidad en la tensión del bus de continua (v_{dc}) actuando sobre la referencia de corriente activa i_{gd}^*. Esto garantiza el equilibrio de potencias entre la red eléctrica y el sistema de almacenamiento.

Modelo en el dominio de Laplace

Aplicando la transformada de Laplace a la dinámica del capacitor definida en (3.15), se obtiene la ecuación de balance de corrientes en el dominio de la frecuencia (3.30):

$$\underbrace{sC_{dc}V_{dc}(s)}_{\text{Dinámica Planta}} = \underbrace{I_{gd}(s)}_{\text{Acción Control}} - \underbrace{I_L(s)}_{\text{Perturbación}} \tag{3.30}$$

A partir de esta relación se observa que:

- La **planta nominal** es puramente integradora y depende del valor de la capacitancia C_{dc}. A diferencia del lazo interno, aquí la acción de control posee un signo positivo, ya que la inyección de corriente desde la red carga el bus.
- La **perturbación** $I_L(s)$ representa la corriente del inversor. En un sistema *back-to-back*, esta es bidireccional, actuando como carga durante la elevación de masas y como fuente durante el frenado regenerativo.

Función de Transferencia de la Planta

Despreciando la corriente de carga I_L, se establece la función de transferencia que relaciona la corriente activa con el voltaje del bus en (3.31):

$$G_v(s) = \frac{V_{dc}(s)}{I_{gd}(s)} = \frac{1}{sC_{dc}} \tag{3.31}$$

3.5. Modelado Dinámico de la Máquina Síncrona (PMSM)

La unidad de accionamiento del sistema gravitacional se basa en una máquina síncrona de imanes permanentes (PMSM). A diferencia de las máquinas de inducción, la PMSM ofrece una mayor densidad de torque y eficiencia, características esenciales para la manipulación de grandes masas. El esquema conceptual de la máquina se presenta en la Figura 3.8.

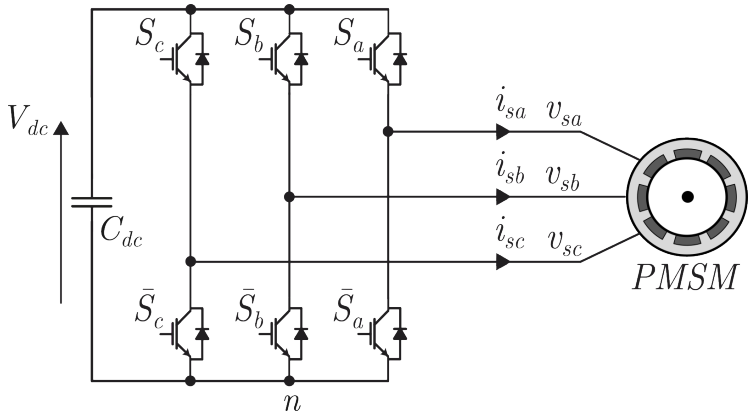


Figura 3.8: Representación esquemática de la máquina síncrona de imanes permanentes.

3.5.1. Modelo vectorial en coordenadas estacionarias

La dinámica eléctrica del estator se rige por la ley de voltajes de Kirchhoff. Debido a la rotación del rotor, el flujo magnético enlazado varía con el tiempo,

induciendo tensiones en los devanados. El sistema de ecuaciones de voltaje para las tres fases se describe en (3.32):

$$\begin{cases} v_{sa} = R_s i_{sa} + \dfrac{d\psi_{sa}}{dt} \\ v_{sb} = R_s i_{sb} + \dfrac{d\psi_{sb}}{dt} \\ v_{sc} = R_s i_{sc} + \dfrac{d\psi_{sc}}{dt} \end{cases} \tag{3.32}$$

A diferencia de un filtro estático, la relación entre flujo y corriente en una PMSM es compleja debido a la saliencia del rotor (anisotropía). Las inductancias propias y mutuas varían de forma sinusoidal en función de la posición eléctrica del rotor θ_r, como se muestra en (3.33):

$$\begin{cases} L_{aa} = L_{\sigma s} + \overline{L}_s + \Delta L \cos(2\theta_r) \\ L_{bb} = L_{\sigma s} + \overline{L}_s + \Delta L \cos(2\theta_r + 2\pi/3) \\ L_{cc} = L_{\sigma s} + \overline{L}_s + \Delta L \cos(2\theta_r - 2\pi/3) \end{cases} \tag{3.33}$$

De esta forma, la ecuación de flujo magnético matricial (3.34) integra tanto la componente inductiva variante como el flujo constante aportado por los imanes permanentes (ψ_{PM}):

$$\boldsymbol{\psi}_s^{abc} = \mathbf{L}_s(\theta_r)\mathbf{i}_s^{abc} + \boldsymbol{\psi}_{PM}^{abc}(\theta_r) \tag{3.34}$$

Los parámetros involucrados en el modelo de fase son:

- $v_{s(abc)}, i_{s(abc)}$: Tensiones y corrientes de fase en el estator.
- $\psi_{s(abc)}$: Flujos totales enlazados por los devanados estatóricos.
- R_s: Resistencia del devanado del estator por fase.
- $\overline{L}_s, \Delta L$: Inductancia media y componente de saliencia del rotor, respectivamente.
- θ_r: Posición eléctrica del rotor.

3.5.1.1. Modelo en Coordenadas Estacionarias ($\alpha\beta$)

Al aplicar la Transformada de Clarke, el sistema se reduce a dos fases ortogonales; sin embargo, la dependencia respecto a la posición del rotor persiste debido a la anisotropía ($\Delta L \neq 0$). El vector espacial de flujo en el marco estacionario revela un término de acoplamiento complejo conjugado en (3.35):

$$\vec{\psi}_s^{(\alpha\beta)} = \overline{L}_s \vec{i}_s^{(\alpha\beta)} + \Delta L e^{j2\theta_r} (\vec{i}_s^{(\alpha\beta)})^* + \psi_{PM} e^{j\theta_r} \tag{3.35}$$

La dinámica eléctrica vectorial queda definida por la caída resistiva y la variación temporal del flujo magnético, según (3.36):

$$\vec{v}_s^{(\alpha\beta)} = R_s \vec{i}_s^{(\alpha\beta)} + \frac{d\vec{\psi}_s^{(\alpha\beta)}}{dt} \tag{3.36}$$

Al expandir los términos trigonométricos dependientes de θ_r en (3.35), las derivadas temporales generan fuerzas contraelectromotrices variantes en el tiempo. Esta característica impide el uso de controladores lineales simples en este marco de referencia, motivando la transición hacia un sistema de coordenadas rotatorio.

3.5.2. Modelo matemático en coordenadas dq

Para obtener un modelo con parámetros constantes, se aplica la Transformada de Park, proyectando las variables sobre un marco que gira síncronamente con el rotor a una velocidad ω_r. En este marco, se definen las inductancias constantes de los ejes directo y en cuadratura mediante (3.37):

$$L_d = \overline{L}_s + L_{\sigma s} + \Delta L \quad \text{y} \quad L_q = \overline{L}_s + L_{\sigma s} - \Delta L \tag{3.37}$$

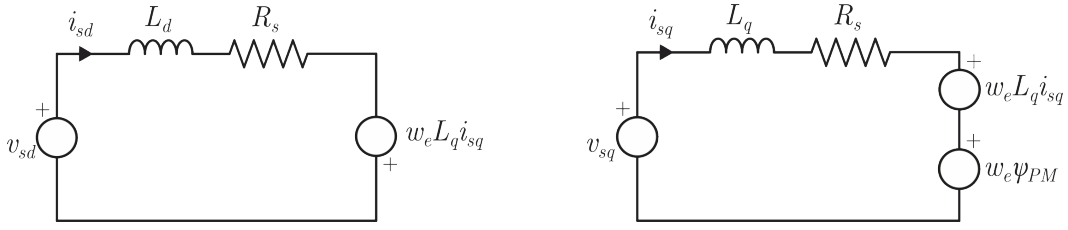
La derivada temporal del flujo en este marco rotatorio introduce una componente de tensión rotacional. La dinámica vectorial resultante se expresa en (3.38):

$$\vec{v}_s^{(dq)} = R_s \vec{i}_s^{(dq)} + \frac{d\vec{\psi}_s^{(dq)}}{dt} + j\omega_r \vec{\psi}_s^{(dq)} \tag{3.38}$$

Sustituyendo las expresiones de flujo para cada eje ($\psi_{sd} = L_d i_{sd} + \psi_{PM}$ y $\psi_{sq} = L_q i_{sq}$), se obtiene el modelo dinámico escalar presentado en el sistema (3.39):

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + L_d \dfrac{di_{sd}}{dt} - \omega_e L_q i_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + L_q \dfrac{di_{sq}}{dt} + \omega_e L_d i_{sd} + \omega_e \psi_{PM} \end{cases} \tag{3.39}$$

Este sistema de ecuaciones puede representarse mediante circuitos equivalentes para cada eje, como se ilustra en la Figura 3.9. El acoplamiento dinámico entre ambos ejes, derivado de la rotación, se detalla esquemáticamente en la Figura 3.10.



(a) Circuito equivalente en el eje d.

(b) Circuito equivalente en el eje q.

Figura 3.9: Modelado circuital de la PMSM en el marco de referencia rotatorio dq.

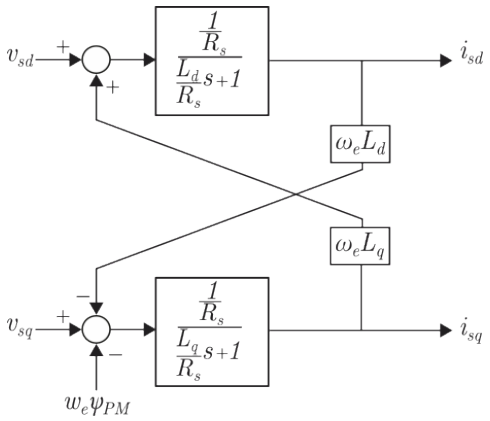


Figura 3.10: Interacción y acoplamiento dinámico entre los ejes d y q de la máquina.

3.5.3. Torque Electromagnético y Dinámica Mecánica

El torque electromagnético (T_e) desarrollado por la máquina IPMSM se deriva del balance de potencias. Para una máquina con saliencia, la expresión general se define en (3.40):

$$T_e = \frac{3}{2} p \left[\psi_{PM} i_{sq} + (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq}\right] \tag{3.40}$$

Esta relación identifica los dos mecanismos de producción de par:

1. **Torque de Alineación:** Proporcional al flujo de los imanes. Es el componente dominante y lineal respecto a la corriente i_{sq}.
2. **Torque de Reluctancia:** Originado por la asimetría geométrica del rotor ($L_d - L_q$). Este término no lineal permite optimizar el desempeño de la máquina mediante el control de la corriente i_{sd}.

Finalmente, la evolución de la velocidad mecánica se rige por la segunda ley de Newton para sistemas rotatorios. El balance de torques en el eje se describe en (3.41):

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \tag{3.41}$$

Donde los parámetros mecánicos se definen como:

- ω_m: Velocidad angular mecánica del rotor.
- p: Número de pares de polos magnéticos ($\omega_r = p \cdot \omega_m$).
- J: Inercia total del conjunto motor-carga.
- T_L: Torque de carga, que actúa como una perturbación externa.
- B: Coeficiente de fricción viscosa del sistema.

3.6. Estrategia de Control de Campo Orientado (FOC)

En las máquinas síncronas de imanes permanentes, las variables del estator presentan fuertes acoplamientos y una dependencia directa de la posición angular del rotor. El objetivo de la estrategia de Control de Campo Orientado (*Field Oriented Control*, FOC) es proyectar estas variables sobre un marco de referencia rotatorio dq alineado con el flujo del rotor. Esto permite linealizar el modelo dinámico y desacoplar el control del flujo (i_{sd}) del control de torque (i_{sq}), facilitando el uso de controladores PI clásicos.

El esquema de control se implementa mediante una estructura en cascada, análoga a la utilizada en el convertidor de red (VOC), como se detalla en la Figura 3.11.

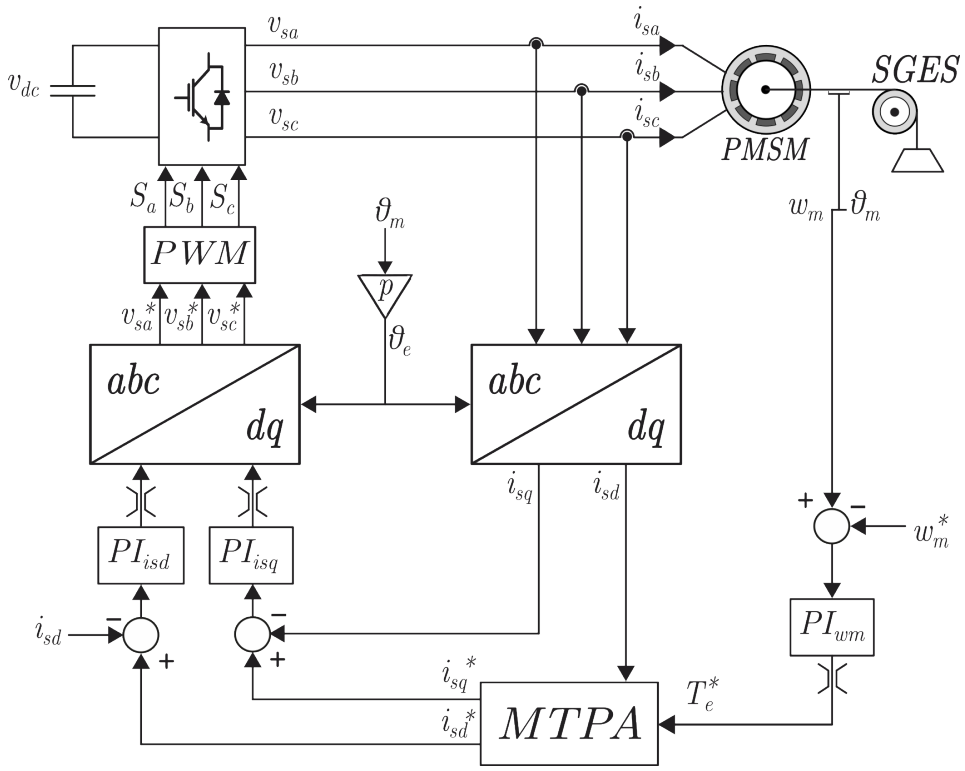


Figura 3.11: Diagrama de bloques general de la estrategia de control FOC para la PMSM.

1. **Lazo interno de corriente:** Regula las componentes i_{sd} e i_{sq} con un ancho de banda elevado para asegurar una respuesta transitoria rápida.

2. **Lazo externo de velocidad:** Regula la velocidad mecánica ω_m, generando la demanda de torque T_e^* necesaria para el movimiento de las masas.

3.6.1. Diseño del Lazo Interno de Corriente

Para el diseño del control en modo motor, se adopta la convención receptora: la corriente se considera positiva al ingresar al estator (consumo de potencia) y el torque es positivo cuando favorece la aceleración del sistema.

Modelo en el dominio de Laplace

Partiendo de las ecuaciones dinámicas escalares presentadas en (3.39), se aplica la transformada de Laplace. Para el diseño de los reguladores, se aísla la dinámica eléctrica del estator a la izquierda y se agrupan las perturbaciones y acoplamientos a la derecha, obteniendo las expresiones (3.42) y (3.43):

$$\underbrace{(L_d s + R_s) I_{sd}(s)}_{\text{Dinámica Planta}} = \underbrace{V_{sd}(s)}_{\text{Acción Control}} + \underbrace{\omega_e L_q I_{sq}(s)}_{\text{Perturbación}} \tag{3.42}$$

$$\underbrace{(L_q s + R_s) I_{sq}(s)}_{\text{Dinámica Planta}} = \underbrace{V_{sq}(s)}_{\text{Acción Control}} - \underbrace{(\omega_e L_d I_{sd}(s) + \omega_e \psi_{PM})}_{\text{Perturbación}} \tag{3.43}$$

De este análisis se concluye lo siguiente:

- La **planta nominal** en cada eje es un sistema de primer orden RL. Es importante notar que, debido a la saliencia de la máquina IPMSM, las inductancias difieren por eje ($L_d \neq L_q$).
- Los términos de **perturbación** incluyen el acoplamiento cruzado inducido por la rotación ($\omega_r L i$) y la fuerza contraelectromotriz generada por el flujo de los imanes ($\omega_r \psi_{PM}$).

Función de Transferencia de la Planta

Omitiendo momentáneamente las perturbaciones, se definen las funciones de transferencia fundamentales para el sintonizado de los controladores PI en cada eje (3.44):

$$G_{id}(s) = \frac{1}{L_d s + R_s}, \quad G_{iq}(s) = \frac{1}{L_q s + R_s} \tag{3.44}$$

Estrategia de Desacoplo

Para lograr un control independiente de las corrientes, se implementa una compensación por *feed-forward*. El controlador calcula las tensiones inducidas y las suma a la salida de los reguladores PI (u_d, u_q), generando las referencias de voltaje finales para el modulador (v_{sd}^*, v_{sq}^*) según el sistema (3.45):

$$\begin{cases} v_{sd}^* = u_d - \omega_e L_q i_{sq} \\ v_{sq}^* = u_q + (\omega_e L_d i_{sd} + \omega_e \psi_{PM}) \end{cases} \tag{3.45}$$

Esta estructura de compensación, ilustrada en la Figura 3.12, permite cancelar matemáticamente las no linealidades, permitiendo que cada lazo opere sobre una planta lineal.

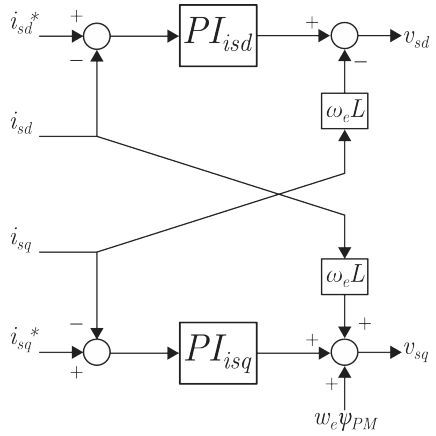


Figura 3.12: Esquema de compensación por *feed-forward* en el control de corrientes de la PMSM.

3.6.2. Generación de Referencias de Corriente (MTPA)

La estrategia de Máximo Torque por Amperio (*Maximum Torque Per Ampere*, MTPA) tiene como objetivo satisfacer la demanda de par electromagnético minimizando la magnitud de la corriente estatórica. Esto optimiza la eficiencia del sistema al reducir drásticamente las pérdidas por efecto Joule.

Análisis del Torque Electromagnético

Retomando la ecuación del par (3.40), se identifican las contribuciones de alineación y reluctancia:

$$T_e = \underbrace{\frac{3}{2} p \psi_{PM} i_{sq}}_{\text{Par de Alineación}} + \underbrace{\frac{3}{2} p (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq}}_{\text{Par de Reluctancia}} \tag{3.46}$$

En máquinas IPMSM con saliencia inversa ($L_d < L_q$), la diferencia ($L_d - L_q$) es negativa. Para que el par de reluctancia contribuya positivamente al torque total, es necesario inyectar una corriente i_{sd} negativa, lo cual desplaza el vector de corriente hacia el segundo cuadrante del plano dq.

Derivación de la Trayectoria Óptima

El punto de operación óptimo se encuentra donde las curvas de torque constante son tangentes a los círculos de corriente mínima. Resolviendo la condición de

optimización, se obtiene la expresión para la corriente de eje directo de referencia (3.47):

$$i_{sd}^{*} = \frac{\psi_{PM}}{2(L_d - L_q)} - \sqrt{\left(\frac{\psi_{PM}}{2(L_d - L_q)}\right)^2 + (i_{sq}^{*})^2} \tag{3.47}$$

Para la implementación práctica en el controlador, las referencias (i_{sd}^{*}, i_{sq}^{*}) se calculan en función del torque demandado T_e^{*} mediante el sistema de ecuaciones (3.48):

$$i_{sd}^{*} = \frac{\psi_{PM}}{2(L_d - L_q)} - \sqrt{\left(\frac{\psi_{PM}}{2(L_d - L_q)}\right)^2 + (i_{sq}^{*})^2} \tag{3.48}$$

$$i_{sq}^{*} = \frac{T_e^{*}}{\frac{3}{2}p\left[\psi_{PM} + (L_d - L_q)i_{sd}\right]} \tag{3.49}$$

3.6.3. Diseño del Lazo Externo de Velocidad

El lazo de velocidad regula la magnitud mecánica ω_m actuando sobre el torque electromagnético. Esta etapa genera la referencia de torque T_e^{*} (y consecuentemente i_{sq}^{*}) para los lazos internos de corriente.

Modelo en el dominio de Laplace

Aplicando la transformada de Laplace a la ecuación mecánica de Newton (3.41) y reorganizando los términos para identificar la dinámica de la planta, se obtiene (3.50):

$$\underbrace{J \cdot s\omega_m(s)}_{\text{Dinámica Planta}} = \underbrace{T_e(s)}_{\text{Acción Control}} - \underbrace{[T_L(s) + B \cdot \omega_m(s)]}_{\text{Perturbaciones}} \tag{3.50}$$

A partir de esta expresión se determina que:

- La **planta nominal** se comporta como un sistema puramente inercial (integrador $1/Js$).
- Las **perturbaciones** externas corresponden al torque de carga T_L y a la fricción viscosa $B\omega_m$.

Función de Transferencia de la Planta

Considerando los efectos de fricción y carga como perturbaciones externas, la función de transferencia utilizada para el sintonizado del controlador de velocidad es:

$$G_{\omega_m}(s) = \frac{\omega_m(s)}{T_e(s)} = \frac{1}{Js} \tag{3.51}$$

Capítulo 4

VALIDACIÓN UNITARIA Y SIMULACIÓN DE SUBSISTEMAS

El objetivo de este capítulo es validar el funcionamiento de los distintos subsistemas de forma aislada antes de proceder a la integración total del sistema de almacenamiento. Esta validación unitaria permite verificar que los modelos dinámicos y las condiciones de diseño propuestas responden de acuerdo a los requerimientos técnicos establecidos.

4.1. Entorno de Simulación

Las simulaciones se llevan a cabo en el software PLECS (*Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation*), una herramienta especializada en el modelado y análisis de sistemas de electrónica de potencia complejos. Este entorno permite simular con alta fidelidad tanto los componentes pasivos como los semiconductores de potencia, ofreciendo una ejecución eficiente de los algoritmos de control digital y permitiendo capturar con precisión los transitorios de conmutación. A su vez, el software permite la integración de componentes de otros dominios físicos, como el térmico y el mecánico, lo que garantiza una mayor precisión y completitud en la validación de la dinámica global del sistema de almacenamiento.

4.2. Validación del Lado Red (GSC)

Esta sección presenta el diseño detallado y la validación del convertidor del lado de la red (*Grid Side Converter*, GSC). Dado que la metodología de control vectorial empleada servirá de base para subsistemas posteriores, se detalla aquí

el procedimiento analítico de definición de parámetros y cálculo de condiciones nominales.

4.2.1. Parámetros y Condiciones Nominales

Para el diseño de los controladores del GSC operando como rectificador activo (AFE), se establecen los parámetros nominales del sistema presentados en la Tabla 4.1. Estos valores definen el punto de operación base para el cálculo de ganancias y la definición de límites operativos.

Parámetro	**Símbolo**	**Valor**
Tensión de línea de la red (RMS)	$V_{g,LL}$	690 V
Frecuencia de la red	f_g	50 Hz
Potencia activa nominal	P_{nom}	1 MW
Resistencia del filtro por fase	R_g	0.1 Ω
Inductancia del filtro por fase	L_g	1 mH
Capacitancia del enlace DC	C_{dc}	6.6 mF
Frecuencia de conmutación	f_{sw}	2 kHz

Tabla 4.1: Parámetros del sistema para el diseño del GSC.

A partir de estos parámetros, es necesario calcular las condiciones críticas de operación que condicionan el diseño del control.

Corriente Nominal de Entrada

La corriente nominal de entrada (valor pico) determina la capacidad de corriente requerida por los semiconductores y sirve como referencia para los esquemas de saturación y *anti-windup*. Su magnitud se calcula considerando la potencia nominal y la tensión de red mediante la ecuación (4.1):

$$\hat{I}_g = \frac{\sqrt{2}P_{nom}}{\sqrt{3}V_{g,LL}} \tag{4.1}$$

Sustituyendo los valores de la Tabla 4.1 en la ecuación (4.1), se obtiene una corriente pico de aproximadamente $\hat{I}_g \approx 1184{,}5$ A.

Tensión Mínima del Enlace DC

Para garantizar la controlabilidad de las corrientes y evitar la saturación en la modulación PWM, la tensión del enlace de corriente continua (V_{dc}) debe ser suficiente para contrarrestar la tensión de red y la caída de tensión en la inductancia del filtro a potencia nominal. Esta condición se evalúa mediante la expresión (4.2):

$$V_{dc} \geq \sqrt{3\left(\hat{V}_g^2 + (\omega_g L_g \hat{I}_g)^2\right)} \tag{4.2}$$

Considerando una tensión de fase pico $\hat{V}_g \approx 563{,}1$ V y la caída inductiva $\omega_g L_g \hat{I}_g \approx 371{,}8$ V, el requerimiento mínimo resulta en $V_{dc} \geq 1170$ V. Con base en este resultado, se selecciona una tensión operativa de enlace DC de 1300 V, proporcionando un margen de seguridad adecuado para la operación del convertidor.

4.2.2. Diseño y Sintonización del Lazo Interno de Corriente

El control de corriente se basa en una estructura desacoplada en el marco de referencia sincrónico dq. A continuación, se describe el modelado de la planta y la sintonización analítica de los controladores PI para asegurar el seguimiento de referencias con la dinámica deseada.

Modelado de la Planta y Requerimientos

Considerando la dinámica eléctrica del filtro de entrada, la función de transferencia que vincula la tensión del convertidor con la corriente de línea en el dominio de Laplace es común para los ejes d y q, tal como se definió en (3.28):

$$G_i(s) = \frac{I_{gd}(s)}{V_{rd}(s)} = \frac{I_{gq}(s)}{V_{rq}(s)} = \frac{-1}{L_g s + R_g} \tag{4.3}$$

Sustituyendo los parámetros nominales ($L_g = 1$ mH, $R_g = 0{,}1\Omega$) y expresando la planta en la forma estándar de primer orden $G(s) = \frac{K}{\tau s+1}$, se obtiene:

$$G_i(s) = \frac{-10}{0{,}01s + 1} \tag{4.4}$$

Donde la ganancia estática es $K = -10$ y la constante de tiempo eléctrica es $\tau = 0{,}01$ s. Para el diseño del controlador, se establecen los siguientes requerimientos de desempeño dinámico:

- **Ancho de banda:** $f_c = 400$ Hz, lo que equivale a una frecuencia angular de corte $\omega_c \approx 2513{,}3$ rad/s.
- **Amortiguamiento:** $\xi = 0{,}707$, para asegurar una respuesta con sobrepaso mínimo y buen compromiso entre velocidad y estabilidad.

Sintonización del controlador - Metodología de Asignación de Polos

Se propone un controlador de tipo Proporcional-Integral (PI) cuya estructura general en el dominio de Laplace se define en (4.5):

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p s + K_i}{s} \tag{4.5}$$

Esta estructura, conocida como forma paralela, se representa mediante el diagrama de bloques de la Figura 4.1. En ella, la señal de error se procesa de forma independiente por una ganancia proporcional K_p y una rama integral K_i/s.

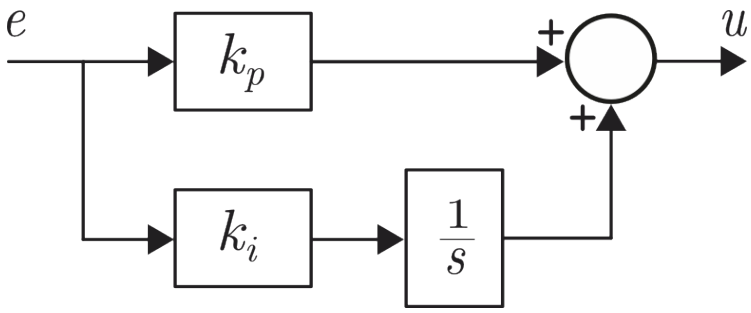


Figura 4.1: Diagrama de bloques del controlador PI en su forma paralela.

El procedimiento de sintonización se realiza igualando el polinomio característico del sistema en lazo cerrado con un polinomio prototipo de segundo orden.

1. Ecuación característica en lazo cerrado: La función de transferencia de lazo cerrado con realimentación unitaria satisface la ecuación $1+C(s)G(s)=0$. Sustituyendo las expresiones anteriores:

$$1+\left(\frac{K_{p,ig}s+K_{i,ig}}{s}\right)\left(\frac{-10}{0{,}01s+1}\right)=0 \tag{4.6}$$

2. Expansión del polinomio: Agrupando términos según las potencias de s y normalizando el coeficiente de mayor orden, se obtiene el polinomio característico real del sistema en (4.7):

$$s^2+(100-1000K_{p,ig})s-1000K_{i,ig}=0 \tag{4.7}$$

3. Igualación con el polinomio deseado: El polinomio característico deseado se define en función de la frecuencia natural ω_n y el factor de amortiguamiento ξ:

$$P_{des}(s)=s^2+2\xi\omega_n s+\omega_n^2 \tag{4.8}$$

Se asume la relación de diseño $\omega_n=\omega_c/2\approx 1256{,}6$ rad/s. Igualando los coeficientes de (4.7) y (4.8), se obtienen las condiciones en (4.9):

$$\begin{cases}100-1000K_{p,ig}=2\xi\omega_n\\ -1000K_{i,ig}=\omega_n^2\end{cases} \tag{4.9}$$

4. Cálculo de las ganancias: Sustituyendo los valores numéricos, se obtienen los parámetros de sintonización finales:

$$K_{p,ig}=\frac{100-2(0{,}707)(1256{,}6)}{1000}\approx -1{,}677 \tag{4.10}$$

$$K_{i,ig} = -\frac{(1256{,}6)^2}{1000} \approx -1579 \tag{4.11}$$

Implementación del Desacoplo y Anti-Windup

Para garantizar un desempeño robusto ante las no linealidades y los acoplamientos dinámicos, se incorporan mecanismos de compensación adicionales.

Desacoplo de Ejes: Debido a que las ecuaciones dinámicas en el marco dq presentan términos cruzados dependientes de la velocidad, se añade una compensación de *feedforward* según lo descrito en (3.29). Esto cancela la interacción entre ejes, permitiendo que cada controlador regule su corriente como un sistema SISO independiente.

Estrategia Anti-Windup mediante Clamping: Para evitar la saturación del integrador cuando la tensión de comando excede los límites físicos del convertidor, se implementa una estrategia de integración condicional o *clamping*.

Para esta implementación, el controlador se reestructura en su forma serie (Figura 4.2), donde la constante de tiempo integral (T_i) se define en (4.12):

$$T_{i,ig} = \frac{K_{p,ig}}{K_{i,ig}} \approx \frac{-1{,}677}{-1579} \approx 1{,}06 \text{ ms} \tag{4.12}$$

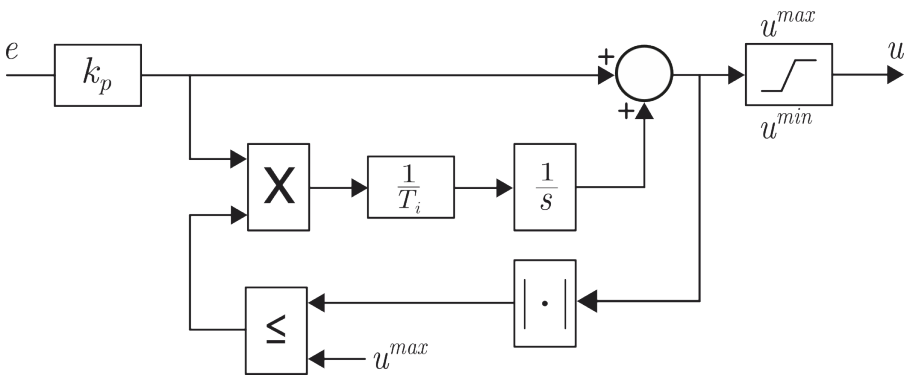


Figura 4.2: Diagrama de bloques del controlador PI con estrategia Anti-Windup mediante integración condicional.

El algoritmo opera monitoreando el valor de la señal de control previa a la saturación. Si el actuador alcanza su límite de operación, la acumulación del error en el bloque integral se detiene inmediatamente, evitando el sobreimpulso excesivo y permitiendo una recuperación rápida una vez que el sistema retorna al rango lineal.

4.2.3. Diseño del Lazo Externo de Tensión DC

El control de la tensión del bus de corriente continua tiene como objetivo mantener el balance de potencia activa entre la red y la carga, garantizando un nivel de tensión constante y estable para la correcta operación del inversor del lado máquina.

Modelado de la Planta

Despreciando las pérdidas conmutativas en el convertidor y las pérdidas resistivas en el filtro, la dinámica de la tensión v_{dc} depende del balance de corrientes en el capacitor C_{dc}. La función de transferencia que relaciona la corriente activa de referencia i_{gd}^* con la tensión del enlace DC se modela como un integrador puro:

$$G_v(s) = \frac{V_{dc}(s)}{I_{gd}(s)} = \frac{1}{C_{dc}s} \tag{4.13}$$

Sustituyendo el valor de la capacitancia nominal ($C_{dc} = 6{,}6$ mF), se obtiene la planta simplificada:

$$G_v(s) \approx \frac{151{,}5}{s} \tag{4.14}$$

Sintonización del Controlador

Para regular la tensión del bus DC, se propone un controlador PI cuya estructura corresponde a la forma paralela definida en (4.5). Dado que este lazo es externo al de corriente, su dinámica debe ser considerablemente más lenta para evitar interacciones inestables en la estructura en cascada. Se establecen los siguientes criterios de diseño:

- **Ancho de banda:** $f_c = 40$ Hz ($\omega_c \approx 251{,}3$ rad/s), cumpliendo con la separación de una década respecto al lazo interno.
- **Amortiguamiento:** $\xi = 0{,}707$.

Aplicando el método de asignación de polos a la planta integradora, las expresiones analíticas para las ganancias se definen en función de la frecuencia natural deseada ω_n:

$$K_{p,vdc} = 2\xi\omega_n C_{dc}, \quad K_{i,vdc} = \omega_n^2 C_{dc} \tag{4.15}$$

Considerando un diseño con $\omega_n = \omega_c/2 \approx 125{,}7$ rad/s, los valores numéricos resultantes son:

$$K_{p,vdc} \approx 1{,}16, \quad K_{i,vdc} \approx 104{,}22 \tag{4.16}$$

La función de transferencia del controlador de tensión resulta entonces:

$$C_{Vdc}(s) = \frac{1{,}16s + 104{,}22}{s} \tag{4.17}$$

Implementación Anti-Windup

Para el lazo externo, la saturación ocurre cuando la demanda de corriente activa i_{gd}^{*} excede el límite máximo permitido por el convertidor ($\hat{I}_g$). Siguiendo la metodología de **clamping** detallada en la sección 4.2.2, se utiliza la estructura serie para deshabilitar la acción integral durante la saturación.

La constante de tiempo integral para este lazo se calcula como:

$$T_{i,vdc} = \frac{K_{p,vdc}}{K_{i,vdc}} \approx 0{,}011 \text{ s} \tag{4.18}$$

Esta implementación asegura que la referencia de corriente no se incremente indefinidamente ante perturbaciones severas de carga o huecos de tensión en la red, permitiendo que el sistema recupere la regulación del bus DC de forma inmediata una vez que cesa la condición de saturación.

4.2.4. Respuesta Dinámica del Rectificador PWM (AFE)

Tras el sintonizado analítico de los lazos de control, se valida la robustez del esquema *Voltage Oriented Control* (VOC) mediante un perfil de simulación en PLECS. El sistema es sometido a variaciones de consigna de voltaje y escalones de carga para evaluar la estabilidad del enlace de corriente continua (V_{dc}) y la capacidad de desacoplo entre las componentes de potencia activa y reactiva. Los resultados se presentan en la Figura 4.3.

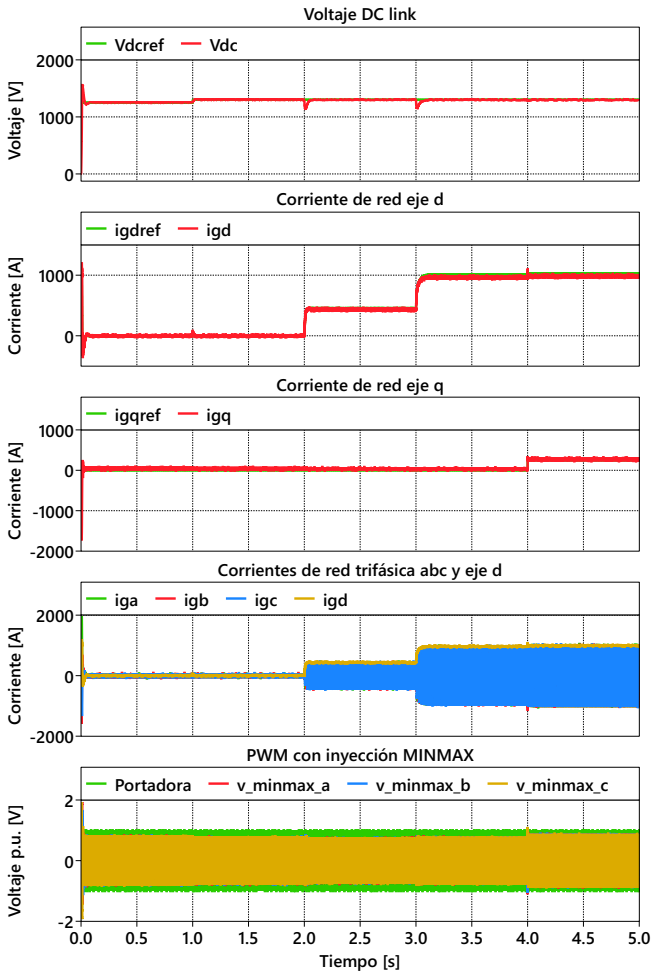


Figura 4.3: Respuesta dinámica del AFE ante variaciones de consigna de tensión y escalones de carga en el bus DC.

La respuesta temporal del sistema exhibe las siguientes etapas operativas, permitiendo verificar el desempeño de los controladores diseñados:

- $t = 0$ **a** $t = 1$ **s (Arranque y estado estacionario):** El sistema inicia con una referencia de $V_{dc} = 1250$ V en condición de vacío. El controlador PI de voltaje mantiene el balance energético compensando únicamente las pérdidas internas del convertidor y del filtro, manteniendo las corrientes de entrada (i_{abc}) en valores mínimos y en fase con los voltajes de red (factor de potencia unitario).

- $t = 1$ **a** $t = 2$ **s (Seguimiento de referencia de voltaje):** En $t = 1$ s, se aplica un escalón incrementando el *setpoint* a 1300 V. El lazo externo de voltaje responde aumentando la consigna de corriente de eje directo (i^*_{gd}) para cargar el banco de capacitores. El sistema alcanza el nuevo estado estacionario de forma amortiguada y sin sobreoscilaciones, validando la sintonía del compensador de voltaje.
- $t = 2$ **a** $t = 3$ **s (Primer escalón de carga):** En $t = 2$ s se conecta una resistencia de carga de 5 Ω. Al demandar potencia activa de forma súbita, se observa un subimpulso (*undershoot*) transitorio en V_{dc}. El control reacciona incrementando la corriente i_d para suplir la demanda; una vez equilibradas las potencias, el voltaje se estabiliza nuevamente en el valor de consigna con un error de estado estacionario nulo.
- $t = 3$ **a** $t = 4$ **s (Carga en paralelo y robustez):** En $t = 3$ s se acopla una segunda resistencia en paralelo. Esto provoca una caída transitoria adicional en el bus DC que es rápidamente corregida por el lazo de control. La corriente de red aumenta proporcionalmente para sustentar la carga total de aproximadamente 675 kW, demostrando la robustez del sistema ante variaciones dinámicas de la carga.
- $t = 4$ **a** $t = 5$ **s (Control de potencia reactiva y desacoplo):** Se modifica la referencia de corriente de cuadratura (i_{gq}) de 0 a 250 A para inyectar potencia reactiva a la red. Se comprueba la efectividad del desacoplo del control vectorial: la variación abrupta en el eje q no perturba el voltaje del bus DC (ligado al eje d), confirmando la precisión de los términos de compensación por *feedforward*.

4.3. Validación del Lado Máquina (MSC)

En esta sección se aborda el diseño detallado de la estructura de control y la posterior validación en simulación del convertidor del lado máquina (*Machine Side Converter*, MSC). A diferencia del GSC, cuyo objetivo es la gestión de la energía en el bus DC, este subsistema es el responsable de regular el par electromagnético y la velocidad del generador síncrono de imanes permanentes de imanes interiores (IPMSM) utilizando la estrategia de Control Orientado a Campo (FOC).

4.3.1. Parámetros y Condiciones Nominales

La máquina bajo estudio es un generador de 2 MW diseñado para aplicaciones de acople directo (*Direct Drive*). La aplicación objetivo corresponde a un Sistema de Almacenamiento de Energía por Gravedad Sólida (SGES). En este contexto, la masa suspendida es constante, lo que exige que el generador proporcione su torque mecánico nominal de forma continua para sostener o elevar la carga en los ciclos de carga y descarga energética.

Los parámetros eléctricos y mecánicos que definen la planta a controlar se detallan en la Tabla 4.2. Los valores de flujo y corriente han sido expresados en su magnitud pico vectorial para facilitar el diseño de los lazos de control en el marco de referencia dq.

Parámetro	**Símbolo**	**Valor**
Potencia Nominal	P_{nom}	2 MW
Velocidad Nominal Mecánica	$\omega_{m,nom}$	22.5 rpm
Pares de polos	p	30
Flujo de Imanes Permanentes (Pico)	ψ_{PM}	6.641 Wb
Inductancia de eje directo	L_d	1.21 mH
Inductancia de eje en cuadratura	L_q	2.31 mH
Resistencia de estator	R_s	0.73 mΩ
Corriente Nominal del Estator (Pico)	$I_{s,max}$	2641.4 A
Torque Mecánico Nominal	T_{nom}	852.77 kNm
Inercia Total del Conjunto	J	70,000 kg·m^2
Frecuencia de conmutación	f_{sw}	2 kHz

Tabla 4.2: Parámetros del generador IPMSM y condiciones del sistema SGES.

Dado que el convertidor de red (AFE) está dimensionado para operar a una potencia de 1 MW, el MSC debe limitar la inyección de potencia en estado estacionario a este mismo valor para no comprometer la estabilidad del enlace DC. Como en el sistema SGES la carga mecánica es constante (torque $\approx$ 852,77 kNm), la estrategia operativa consiste en limitar la velocidad cinemática a la mitad de su valor nominal ($\omega_{m,max} = 11{,}25$ rpm).

Para garantizar una operación segura y estable durante las pruebas dinámicas, se establecen los siguientes límites operativos en los controladores:

- **Saturación de Torque:** El límite de salida del regulador de velocidad se establece en $\pm$853 kNm. Este ajuste es crítico para proveer el margen dinámico necesario que permita acelerar la inercia del sistema durante los transitorios de consigna.
- **Límite de Corriente:** El vector espacial de corriente se satura en su valor nominal pico $I_{s,max} = 2641{,}4$ A para proteger los semiconductores del MSC.
- **Límite de Tensión (Anti-Windup):** Determinado por la disponibilidad del bus de continua ($V_{dc} = 1300$ V), donde la máxima tensión de fase fundamental sintetizable mediante modulación vectorial es $\approx$ 750,5 V.

4.3.2. Diseño y Sintonización del Lazo Interno de Corriente

El control de corriente de la máquina se implementa en el marco de referencia síncrono dq. Debido a la saliencia inversa del IPMSM ($L_q > L_d$), la planta más

restrictiva para el diseño del control corresponde al eje en cuadratura. Sustituyendo los parámetros de la Tabla 4.2 ($L_q = 2{,}31$ mH, $R_s = 0{,}73$ mΩ), la función de transferencia de la planta es:

$$G_{iq}(s) = \frac{1}{L_q s + R_s} = \frac{1369{,}8}{3{,}16s + 1} \tag{4.19}$$

Para un ancho de banda de $f_c = 400$ Hz ($\omega_c \approx 2513$ rad/s) y un factor de amortiguamiento $\xi = 0{,}707$, se realiza la sintonización mediante asignación de polos. Asumiendo una frecuencia natural $\omega_n = \omega_c/2 \approx 1256{,}6$ rad/s, se obtienen las ganancias:

$$K_{p,msc} = 2\xi\omega_n L_q - R_s \approx 4{,}10 \tag{4.20}$$

$$K_{i,msc} = \omega_n^2 L_q \approx 3648 \tag{4.21}$$

Dada la similitud en el orden de magnitud de las inductancias, se adoptan estas ganancias de forma simétrica para ambos controladores (d y q). Se implementa una estrategia de *clamping* condicional para evitar el *windup* ante la saturación de voltaje, utilizando una constante de tiempo integral $T_{i,msc} = K_{p,msc}/K_{i,msc} \approx 1{,}12$ ms.

4.3.3. Estrategia Máximo Torque por Amperio (MTPA)

Para minimizar las pérdidas térmicas por efecto Joule derivadas de las altas corrientes necesarias para el izado de la masa, se implementa una estrategia MTPA. Debido a la saliencia del generador ($L_q > L_d$), es posible generar un par de reluctancia adicional inyectando una componente de corriente negativa en el eje directo (i_{sd}).

El punto de operación óptimo para la corriente nominal establece un ángulo de avance de corriente de 19,74°. Al proyectar la magnitud de corriente nominal máxima (2641,4 A) bajo este ángulo, las referencias teóricas resultan en $i_{sq} \approx 2486$ A e $i_{sd} \approx -892$ A.

No obstante, para garantizar la integridad de los imanes permanentes frente a campos desmagnetizantes, se establece un límite de saturación dinámico para la corriente de eje directo:

$$i^*_{sd,max} = -450 \text{ A} \tag{4.22}$$

Este límite de seguridad permite que la máquina aproveche el par de reluctancia de forma eficiente durante la operación del SGES, manteniendo un margen de protección conservador respecto al límite de desmagnetización teórico.

4.3.4. Diseño y Sintonización del Lazo Externo de Velocidad

La dinámica rotacional del sistema de almacenamiento está dominada por la elevada inercia del conjunto ($J = 70{,}000$ kg·m^2). Considerando el par electromagnético como la variable de control, la planta integradora se define como:

$$G_\omega(s) = \frac{\omega_m(s)}{T_e(s)} = \frac{1}{Js} = \frac{1}{70000s} \tag{4.23}$$

Para garantizar el desacoplo temporal respecto a la dinámica eléctrica de los lazos internos, se diseña el controlador PI de velocidad con un ancho de banda diez veces menor al de corriente, estableciendo $f_{c,\omega} = 40$ Hz ($\omega_c \approx 251{,}3$ rad/s). Aplicando la metodología de asignación de polos con un factor de amortiguamiento $\xi = 0{,}707$ y una frecuencia natural $\omega_n = \omega_c/2 \approx 125{,}66$ rad/s, se obtienen las siguientes ganancias:

$$K_{p,\omega} = 2\xi\omega_n J \approx 12{,}44 \times 10^6 \tag{4.24}$$

$$K_{i,\omega} = \omega_n^2 J \approx 1{,}105 \times 10^9 \tag{4.25}$$

Dada la magnitud de estas ganancias, es fundamental la correcta implementación del límite de par. La salida de este bloque (T_e^*) atraviesa un filtro de saturación de $\pm 853,000$ Nm antes de alimentar el algoritmo MTPA. Esto asegura que el generador no exceda sus límites estructurales ni la capacidad térmica del estator, garantizando a su vez que el sistema disponga del par máximo necesario para vencer la inercia durante los transitorios de aceleración.

4.3.5. Respuesta Dinámica del Lado Máquina (MSC)

Una vez sintonizados los lazos de control y la estrategia MTPA con el límite de corriente de flujo ajustado a $i_{sd}^* = -900$ A, se procede a la validación dinámica en el entorno PLECS. Esta etapa es crucial para verificar la capacidad del accionamiento de gobernar la inmensa inercia del sistema SGES.

4.3.5.1. Análisis de Velocidad, Torque y Corrientes

Para comprobar la robustez del esquema FOC, el sistema es sometido a variaciones escalonadas de velocidad y par de carga (T_L) en intervalos de 2 segundos. Se monitorizan de forma síncrona la cinemática del rotor, la respuesta de par, las corrientes en el marco rotatorio dq y las corrientes de fase del estator, tal como se observa en la Figura 4.4.

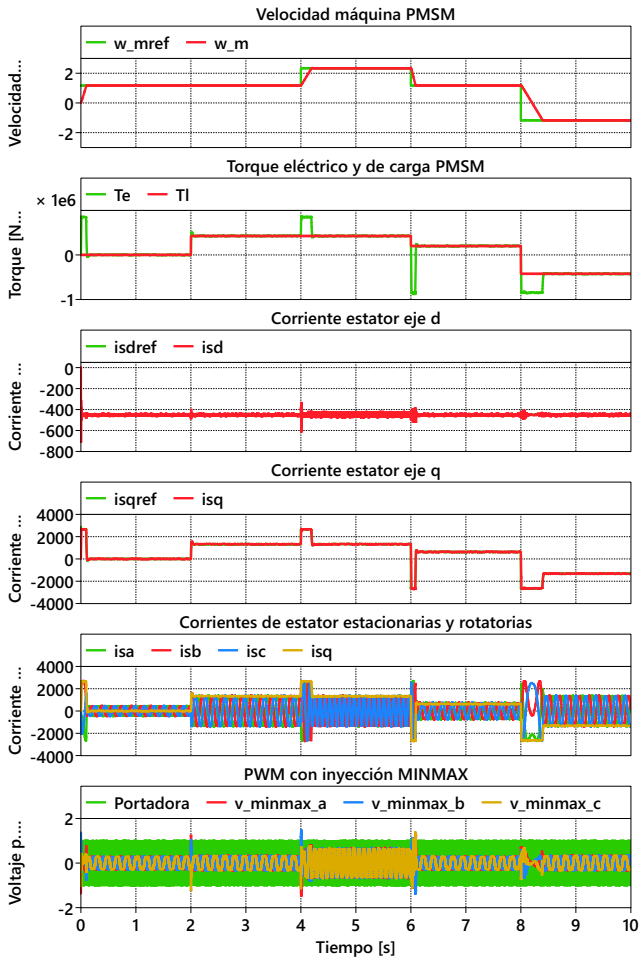


Figura 4.4: Respuesta dinámica de la PMSM: seguimiento de velocidad, par eléctrico, corrientes dq y corrientes de fase.

La capacidad del MSC para acelerar la inercia de $70,000$ kg·m^2 depende directamente de la reserva de par. Las pruebas confirman que mantener el límite del regulador de velocidad en el valor nominal (± 853 kNm) otorga el margen dinámico esencial para garantizar una respuesta transitoria rápida. La respuesta temporal exhibe las siguientes etapas:

- $t = 0$ **a** $t = 2$ **s (Arranque en vacío):** Ante un escalón de 11,25 rpm, el torque eléctrico (T_e) satura instantáneamente en su máximo permitido para vencer la inercia estática. Una vez alcanzada la consigna, el par decae a cero, demostrando un seguimiento preciso y libre de sobrepasos.

- $t = 2$ **a** $t = 4$ **s (Impacto de carga y acción MTPA):** Se aplica un torque de carga de 425 kNm manteniendo la velocidad constante. La corriente de cuadratura (i_{sq}) sigue el incremento de demanda inmediatamente. Simultáneamente, el algoritmo MTPA inyecta una corriente de magnetización de $i_{sd} \approx -400$ A, aprovechando el par de reluctancia para minimizar las pérdidas Joule en el estator.

- $t = 4$ **a** $t = 6$ **s (Aceleración bajo carga):** Se exige un aumento a 22,5 rpm con la carga de 425 kNm sostenida. El controlador utiliza el margen dinámico elevando el torque a 853 kNm, proveyendo un par neto acelerador de ≈ 428 kNm. Al estabilizarse la velocidad, el par retorna al valor de carga, operando en el límite de potencia de 1 MW definido para el sistema.

- $t = 6$ **a** $t = 8$ **s (Desacoplo ante cambios simultáneos):** Se demanda una reducción a 11,25 rpm junto con una caída de carga a 200 kNm. Durante este transitorio severo, se comprueba la efectividad del desacoplo FOC: la compensación de *feedforward* anula la variación de la fuerza contraelectromotriz, asegurando que la perturbación en el eje q no afecte la regulación del flujo en el eje d.

- $t = 8$ **a** $t = 10$ **s (Inversión regenerativa):** El sistema cruza al cuadrante de generación con una referencia de $-11{,}25$ rpm y un par resistente de -425 kNm. Las corrientes trifásicas (i_{abc}) invierten su secuencia de fases sin distorsión al cruzar por el cero de velocidad. El generador transfiere potencia de frenado hacia el bus DC, validando la estabilidad total en los cuatro cuadrantes de operación.

Capítulo 5

INTEGRACIÓN Y VALIDACIÓN ELECTROMECÁNICA DEL SISTEMA

A continuación, se presenta el análisis de la integración global de las etapas de conversión electromecánica y su desempeño dinámico durante los ciclos de carga y descarga del SGES. La Figura 5.1 esquematiza la topología completa del sistema que se valida en este capítulo, la cual unifica los modelos físicos y las estrategias de control diseñadas en los dos capítulos anteriores.

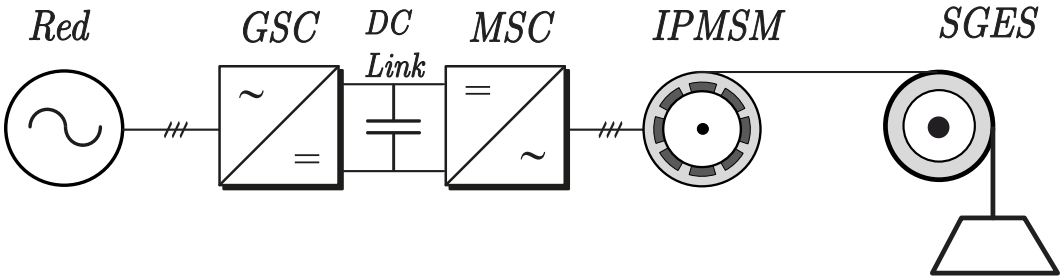


Figura 5.1: Diagrama de bloques de la cadena de conversión electromecánica del SGES, ilustrando la interconexión bidireccional entre la red eléctrica, el convertidor estático Back-to-Back y el accionamiento PMSM.

5.1. Integración del Sistema de Potencia: Configuración Back-to-Back

La primera fase de la implementación consiste en la integración de los dos sistemas de conversión diseñados previamente: el Convertidor del Lado de la Red

(GSC) y el Convertidor del Lado de la Máquina (MSC). Esta arquitectura, conocida como topología *Back-to-Back*, permite un control desacoplado de la potencia inyectada a la red y el torque aplicado a la máquina síncrona de imanes permanentes (PMSM).

La unión de ambos sistemas se realiza a través de un bus de corriente continua (*DC Link*), donde el GSC asume el rol de regulador de tensión, manteniendo el bus en 1300 V, mientras que el MSC gestiona el flujo de potencia mecánica. La relación fundamental que gobierna esta integración es el balance de potencias en el condensador del bus DC:

$$P_{dc} = P_{gsc} - P_{msc} = V_{dc} \cdot C \frac{dV_{dc}}{dt} \tag{5.1}$$

Bajo condiciones de operación ideal, el sistema garantiza que $P_{gsc} \approx P_{msc}$, permitiendo que la energía recuperada durante el descenso sea inyectada a la red con un factor de potencia unitario. Los parámetros de diseño de ambos convertidores se referencian en las Tablas 4.1 y 4.2.

5.2. Modelación y Parametrización de la Planta Mecánica

El sistema EVx™ de Energy Vault representa una arquitectura de almacenamiento modular y altamente escalable, diseñada para alcanzar capacidades en el orden de los multi-GWh. Su principio de funcionamiento macroscópico se asemeja conceptualmente al de un sistema de ascensores industriales automatizados: durante periodos de exceso de generación, el sistema engancha un peso en la cota inferior (bloques compuestos), lo eleva y lo deposita en una estructura a mayor altura, almacenando la energía eléctrica en forma de energía potencial gravitatoria. Inversamente, cuando la red demanda potencia, el bloque es descendido de manera controlada, haciendo girar el motor en modo generador. Esta plataforma destaca en la industria por ofrecer una alta eficiencia de ciclo completo (*round-trip efficiency*), nula degradación del medio de almacenamiento y una prolongada vida útil técnica respaldada por una cadena de suministro sostenible.

Para emular este sistema físico con un alto grado de fidelidad, se ha diseñado una planta mecánica en el entorno PLECS que integra el comportamiento dinámico del conjunto motor, winche, cable, gancho y bloque de concreto. A diferencia de un modelo analítico de masa puntual ideal, esta simulación desglosa la mecánica en componentes físicos interconectados para capturar fenómenos elásticos y transitorios reales de la maniobra de izaje.

La transición desde el eje del motor hasta la carga en el suelo se modela a través de los siguientes componentes fundamentales:

La transición desde el eje del motor hasta la carga en el suelo se modela a través de los siguientes componentes fundamentales:

- **Mecanismo de Winche (*Rack and Pinion*):** Es el encargado de acoplar el dominio rotacional del generador PMSM con el dominio traslacional de la

carga. Transforma el giro del eje en el desplazamiento lineal del cable. Su relación cinemática general se define en la Ecuación (5.2):

$$v_z = \omega_m \cdot r_{pinion} \cdot N_g \tag{5.2}$$

En este estudio se asume una topología de acoplamiento directo (*Direct Drive*), por lo que la relación de la caja reductora se establece en $N_g = 1$.

- **Cable de Izaje (*Translational Spring*):** En lugar de utilizar una conexión matemática rígidamente ideal, la unión entre el winche y el gancho se modela mediante un resorte traslacional. Este componente emula la elasticidad longitudinal característica de los gruesos cables de acero de la grúa, un factor crucial para absorber los "tironesïniciales y amortiguar los transitorios de torque durante aceleraciones y frenados.

- **Sistema de Masas y Gravedad (*Mass* y *Constant Force*):** La carga física se ha dividido en dos cuerpos mecánicos independientes: el gancho y el bloque de concreto. A cada bloque de masa en PLECS se le acopla una fuente de fuerza traslacional constante orientada hacia abajo, cuya magnitud equivale a su respectivo peso ($F = m \cdot g$), emulando el tirón gravitacional continuo sobre el sistema.

- **Mecanismo de Enganche (*Translational Clutch*):** Actúa como el actuador físico (garras) que vincula el gancho con el bloque. Este embrague traslacional es comandado por la máquina de estados lógicos del supervisor; al cerrarse, unifica ambos cuerpos en una sola masa dinámica, permitiendo que compartan la misma velocidad y transmitan la fuerza de tensión para el izaje conjunto.

- **Límites Físicos (*Translational Hard Stop*):** Para otorgar realismo espacial y delimitar la zona de operación, se implementaron topes mecánicos que emulan la superficie del suelo. Para el bloque, este límite se fija en la cota mínima de 4 m. El *Hard Stop* impide la superposición de volúmenes en el simulador y modela el contacto físico mediante parámetros de alta rigidez (K_c) y amortiguamiento, emulando la colisión elástica al momento de posar la carga en tierra firme.

Los valores numéricos típicos que parametrizan la dinámica de cada uno de estos componentes y que gobiernan la planta mecánica durante los ciclos de simulación se resumen en la Tabla 5.1.

Parámetro	Símbolo / Valor
Masa del bloque de concreto	$M_b = 24,000$ kg
Masa del conjunto gancho	$M_g = 650$ kg
Radio del tambor del winche (Piñón)	$r_p = 0{,}85$ m
Relación de transmisión (*Direct Drive*)	$N_g = 1:1$
Cota de límite inferior (Suelo)	$z_{min} = 4{,}0$ m
Rigidez mecánica de contacto	$K_c = 1 \cdot 10^7$ N/m
Aceleración de gravedad	$g = 9{,}81$ m/s^2

Tabla 5.1: Parámetros de la planta mecánica para la emulación del sistema SGES.

5.3. Estrategia de Control Supervisor y Lógica de Operación

La automatización del ciclo operativo se gestiona mediante una máquina de estados lógicos que determina el estado del embrague mecánico y la dirección del movimiento según la posición del gancho. El núcleo de decisión utiliza un biestable *SR Flip-Flop* y sensores de proximidad virtuales para conmutar entre las etapas de carga y descarga.

Para proteger el sistema de transitorios destructivos y asegurar que la demanda de potencia no exceda la capacidad nominal del convertidor AFE (1 MW), se implementa un limitador de rampa (*Rate Limiter*) que actúa como control de *Jerk*. Este bloque impone rampas de aceleración de 0,585 rad/s^2, permitiendo alcanzar el régimen nominal de 1,17 rad/s en un intervalo de 2 s. Este ajuste es fundamental para mantener la estabilidad del bus DC, evitando colapsos por desbalance de potencias entre el MSC y el GSC durante las aceleraciones de la gran inercia mecánica.

La lógica de operación ajustada para la limitación de potencia se detalla en la Tabla 5.2.

Estado	Condición	Embrague	Velocidad (ω_{ref})
Descenso (Vacío)	$h > 4{,}05$ m	0	$-1{,}17$ rad/s
Enganche	$h \leq 4{,}05$ m	1	0 rad/s
Izaje (Carga)	$4{,}05$ m $< h < 103{,}95$ m	1	$+1{,}17$ rad/s

Tabla 5.2: Matriz de estados de la lógica supervisora ajustada por limitación de potencia (1 MW).

5.4. Análisis de Ciclos de Operación

El desempeño del sistema de almacenamiento de energía por gravedad se evalúa mediante la ejecución de dos ciclos operativos fundamentales: almacenamiento (carga) y generación (descarga). Esta etapa de análisis permite validar la efectividad de la arquitectura *Back-to-Back* para gestionar flujos de potencia bidireccionales, manteniendo la estabilidad de la red eléctrica y la integridad de la planta mecánica.

El objetivo principal de estas simulaciones es verificar que el control supervisor coordine correctamente la transición entre estados lógicos, asegurando que:

- La tensión del bus DC permanezca regulada en 1300 V ante variaciones bruscas de carga.
- El intercambio de potencia con la red se realice dentro de los límites de diseño del convertidor AFE (1 MW).
- La precisión espacial del gancho y el bloque cumpla con las cotas de diseño para el almacenamiento de energía potencial.

A continuación, se detalla inicialmente el ciclo de carga, el cual sirve como base para calibrar los lazos de control de corriente y velocidad antes de proceder con la validación del modo regenerativo.

5.4.1. Funcionamiento del Ciclo de Carga (Almacenamiento)

El ciclo operativo de almacenamiento se define mediante una secuencia de cuatro etapas: posicionamiento inicial, descenso en vacío, acoplamiento y ascenso con carga. Para garantizar la consistencia física del modelo y evitar errores de convergencia en los resolvedores de PLECS, el gancho se parametriza con un desplazamiento inicial de 104 m, situándose en la cota superior al inicio de la simulación.

La secuencia se ejecuta de la siguiente manera:

- **Descenso y Aproximación:** El sistema inicia el descenso del gancho en vacío bajo una referencia de velocidad de $-1{,}17$ rad/s. La restricción impuesta por el *Translational Hard Stop* en los 4,0 m asegura que el gancho no sobrepase la superficie del bloque de concreto, proporcionando una frontera física realista para el contacto.
- **Lógica de Acoplamiento:** Al alcanzar la zona de contacto ($h \leq 4{,}05$ m), el comparador lógico activa la entrada *Set* del biestable SR. Un bloque *Turn-on Delay* posterga la confirmación del estado de *Enganche* para emular el tiempo de respuesta de los actuadores mecánicos. Durante toda la fase de ascenso posterior, la entrada *Reset* se mantiene en nivel lógico 0 para asegurar la sujeción de la carga.
- **Izaje de Carga:** Una vez validado el enganche, el selector de referencia conmuta la velocidad a $+1{,}17$ rad/s. El motor PMSM debe vencer la inercia de la masa total de 24,65 toneladas (sumatoria de la masa del gancho y el bloque). Debido a la limitación de 1 MW en el convertidor AFE, esta velocidad reducida garantiza que la demanda de potencia no desestabilice el bus DC mientras el GSC opera como rectificador activo.

- **Finalización del Ciclo:** El proceso concluye automáticamente al retornar a la cota de 103,95 m, asegurando que la base del bloque alcance la posición objetivo de 100 m. Una compuerta lógica AND detecta la coincidencia entre la posición máxima y el estado de carga acoplada, enviando la señal de parada al sistema de control.

5.4.2. Funcionamiento del Ciclo de Descarga (Generación)

El ciclo operativo de recuperación energética se define mediante una secuencia de cuatro etapas: posicionamiento inicial con carga, descenso regenerativo, frenado en superficie y desacople. Para mantener la coherencia del modelo físico y arrancar desde el estado de máxima energía potencial, las condiciones iniciales de los integradores y memorias en PLECS se configuran con el gancho en 104 m y el biestable SR en estado lógico 1 (acoplado).

La secuencia se ejecuta de la siguiente manera:

- **Descenso y Generación:** El sistema inicia el movimiento de la masa total acoplada desde la cota superior bajo una referencia de velocidad de -1.17 rad/s, impuesta a través de un *Rate Limiter* para evitar transitorios bruscos de corriente. Durante esta fase, la máquina PMSM opera en el cuarto cuadrante (freno regenerativo), reteniendo la caída de la carga dictada por la gravedad e inyectando potencia activa hacia el convertidor MSC.

- **Aproximación y Frenado:** Al alcanzar el nivel del suelo ($h \leq 4{,}0$ m para el gancho, equivalente a 0.0 m para la base del bloque), un comparador lógico interviene el lazo de control. El selector de referencia (*Signal Switch*) conmuta la velocidad a 0 rad/s. La detención exacta en 4.0 m es crítica para relajar el modelo del cable elástico (*Translational Spring*) y anular la tensión mecánica, evitando discontinuidades matemáticas de fuerza en el simulador.

- **Lógica de Desacople:** Para liberar la masa de forma segura sin desestabilizar el sistema, una compuerta lógica AND verifica simultáneamente dos condiciones: que la posición haya alcanzado el límite inferior y que la referencia de velocidad sea estrictamente nula. Al cumplirse ambas, se activa un bloque *Turn-on Delay* que posterga la señal de apertura para emular la inercia de los actuadores físicos de las garras, enviando finalmente un pulso al pin *Reset* del biestable SR.

- **Finalización del Ciclo:** Una vez que el biestable SR conmuta a 0, la carga pesada queda desenganchada y reposando de forma permanente sobre el *Translational Hard Stop* inferior. El gancho permanece suspendido a 4 m de altura. A lo largo de todo el trayecto efectivo, el convertidor AFE opera como inversor inyectando a la red eléctrica la energía proveniente del bus DC, el cual se mantiene rígidamente regulado en 1300 V.

5.5. Análisis de Resultados

Para evaluar el desempeño del sistema integral, se seleccionaron las siguientes variables críticas de observación en el entorno PLECS:

- **Dinámica de Potencia:** Comparativa entre la potencia activa intercambiada con la red frente a la potencia mecánica en el eje para determinar el rendimiento y balance del sistema *Back-to-Back*.
- **Estabilidad del Bus DC:** Monitoreo de la tensión V_{dc} para asegurar que el convertidor AFE mantenga la consigna de 1300 V ante las variaciones de carga provocadas por el izaje de las 24,65 toneladas.
- **Respuesta del Lazo de Velocidad:** Observación de la velocidad angular de la PMSM para validar que las rampas impuestas por el supervisor eliminan transitorios bruscos de corriente y torque.

Las simulaciones confirman la efectividad del control supervisor y la robustez de los convertidores operando bajo los límites de diseño establecidos. A continuación, se analizan las respuestas cinemáticas, energéticas y eléctricas divididas según el ciclo operativo ejecutado.

5.5.1. Desempeño durante el Ciclo de Almacenamiento (Izaje)

La Figura 5.2 detalla la evolución temporal de la posición y velocidad del sistema. Inicialmente, el gancho y el bloque se encuentran en reposo en la cota inferior (posiciones de 4,0 m y 0,0 m, respectivamente). Una vez transcurrido el tiempo de espera programado, el control supervisor emite la señal lógica de *Estado de enganche*, la cual conmuta a nivel alto tras el retardo establecido por el *Turn-on Delay*. Este retardo emula el tiempo físico necesario para asegurar mecánicamente la carga de forma segura antes de aplicar tensión al cable. A partir de este instante, el gancho y el bloque ascienden en conjunto guiados por una referencia de velocidad controlada mediante el *Rate Limiter* (+1,17 rad/s), alcanzando suavemente las cotas finales de 104 m y 100 m respectivamente, lo que valida la precisión espacial de la maniobra sin oscilaciones destructivas.

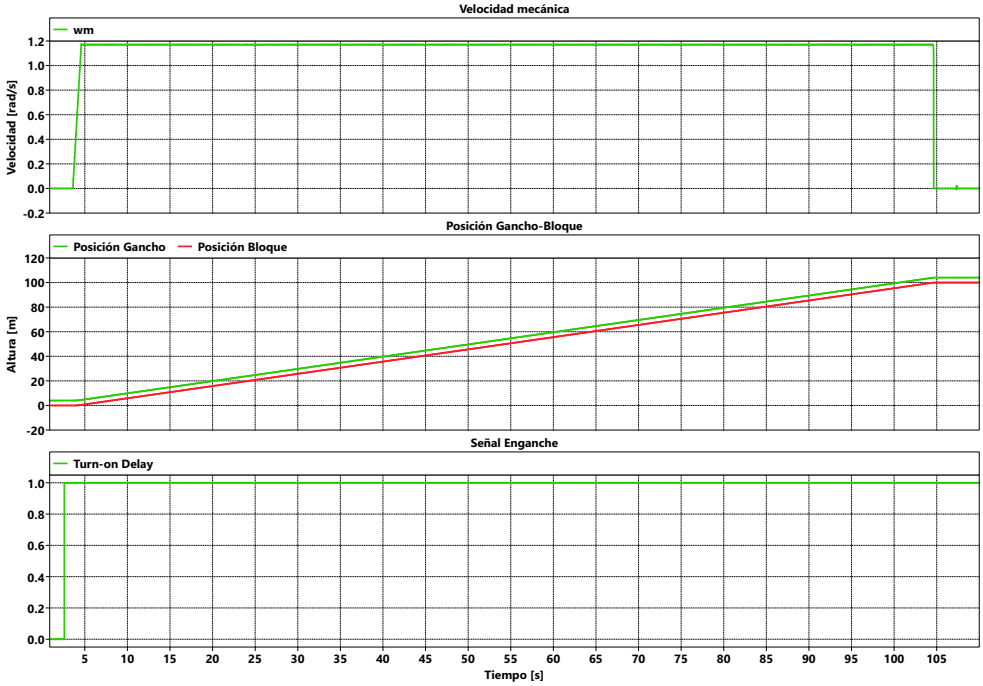


Figura 5.2: Evolución de la posición del gancho y el bloque junto a la velocidad mecánica durante el ciclo de carga (izaje desde el suelo).

El análisis de potencias presentado en la Figura 5.3 es fundamental para confirmar que el sistema opera dentro de los márgenes térmicos del convertidor AFE (1 MW).

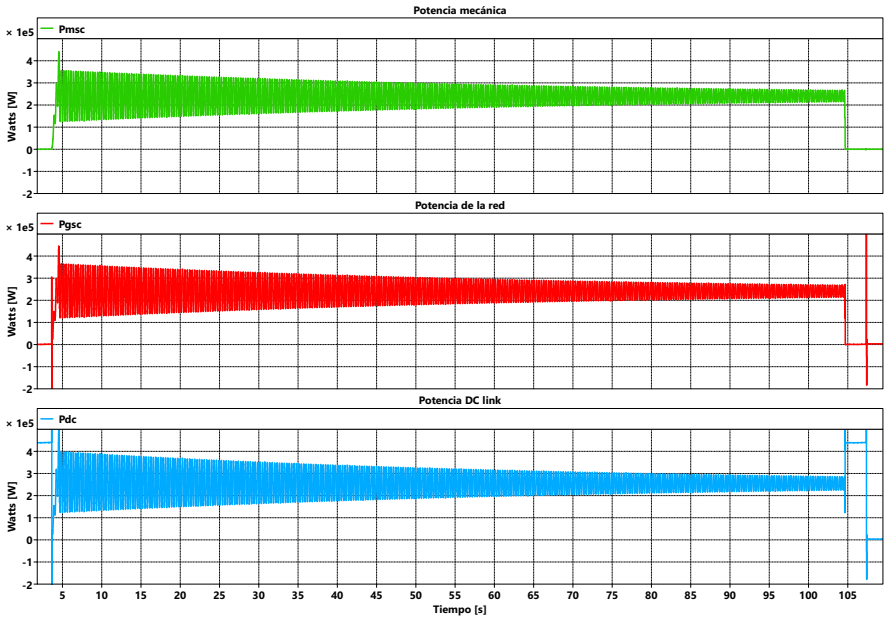


Figura 5.3: Balance de potencias en el sistema: potencia de red (P_{gsc}), potencia mecánica (P_{msc}) y potencia en el bus DC.

Mientras el sistema se mantiene en reposo en el suelo, el intercambio de potencia es prácticamente nulo. Sin embargo, al iniciar el izaje de las 24,65 toneladas, la potencia mecánica demandada (P_{msc}) aumenta mediante un transitorio amortiguado, estabilizándose en un régimen constante cercano a los 0,23 MW (230 kW). La potencia extraída de la red (P_{gsc}) sigue fielmente esta demanda, confirmando un flujo de potencia unidireccional altamente eficiente desde la red hacia la carga mecánica. Al operar en torno a los 0,23 MW, el sistema garantiza un amplio margen de seguridad del 77 % respecto a la capacidad nominal máxima del AFE, eliminando el riesgo de saturación térmica o colapso del bus DC.

La Figura 5.4 corrobora la robustez de los lazos de control internos. La tensión del bus continuo (V_{dc}) evidencia una regulación precisa en 1300 V. Los leves picos transitorios observados en los instantes de arranque y detención son rápidamente mitigados por la acción del controlador AFE, manteniendo la estabilidad de la planta.

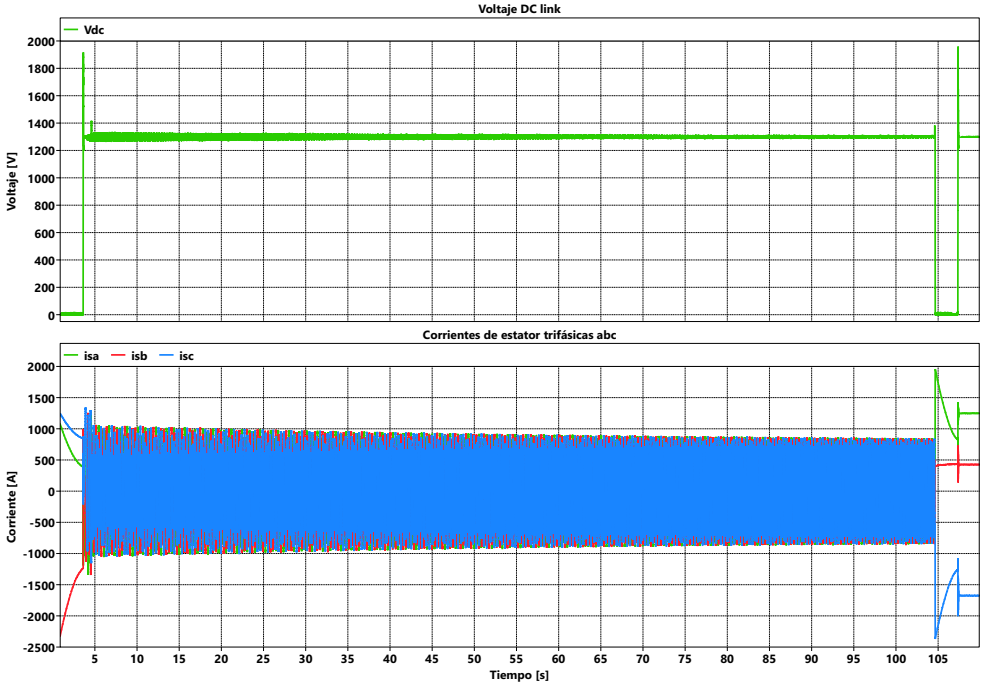


Figura 5.4: Variables eléctricas del sistema: tensión del bus DC y corrientes de fase del estator.

Respecto a la dinámica del inversor (MSC), las corrientes de estator (i_{abc}) muestran un comportamiento totalmente coherente con la exigencia física y la convención de signos. Durante la fase de espera en el suelo, las corrientes son mínimas. Al comenzar el ascenso, las corrientes asumen valores positivos, incrementándose de forma abrupta pero controlada para suministrar el par electromagnético necesario para vencer la gravedad, lo que confirma que la máquina está operando netamente en modo motor (consumiendo energía). Resulta de particular interés el comportamiento una vez que se alcanza la cota superior: al detenerse el motor ($\omega_m = 0$), las corrientes asumen valores continuos (DC). Este fenómeno representa la inyección del **torque de retención** eléctrico, generado para sostener las 24,65 toneladas en suspensión contrarrestando la fuerza de gravedad justo antes de que se active el freno mecánico de fijación.

5.5.2. Desempeño durante el Ciclo de Generación (Freno Regenerativo)

Por su parte, la Figura 5.5 ilustra la dinámica inversa correspondiente al ciclo de descarga o generación. En este escenario, el sistema parte desde el reposo en la cota superior, con el bloque ya acoplado al gancho (posiciones iniciales de 100 m

y 104 m, respectivamente). Tras recibir la orden, el conjunto desciende de manera controlada bajo una referencia de velocidad constante de $-1{,}17$ rad/s impuesta por el accionamiento.

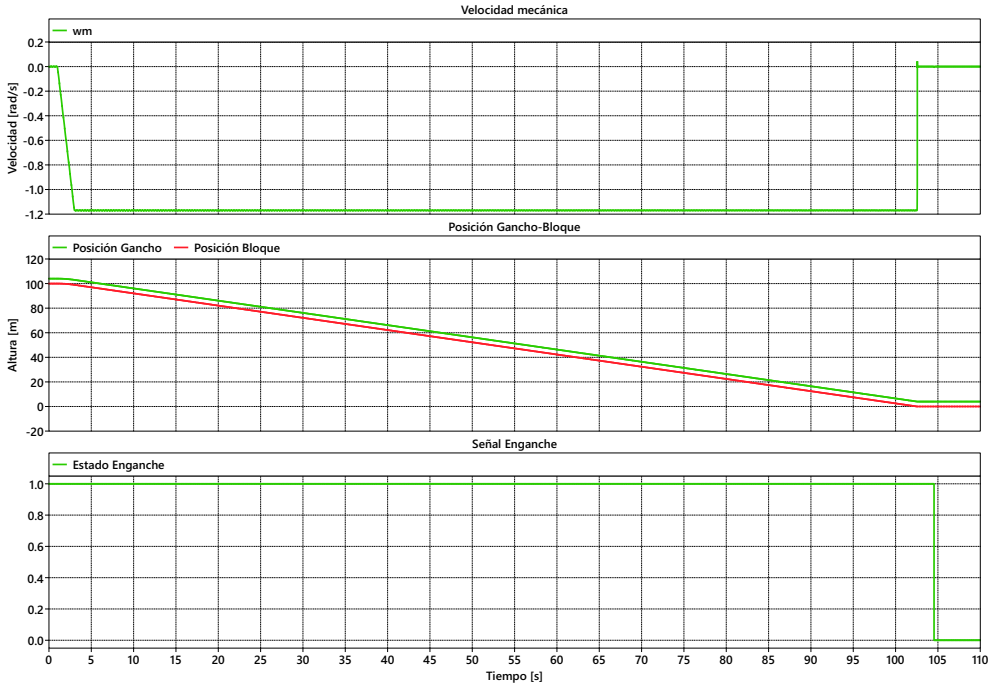


Figura 5.5: Evolución de la posición del gancho y el bloque junto a la velocidad mecánica durante el ciclo de descarga (freno regenerativo).

Como se aprecia en las trayectorias de altura, ambas posiciones decrecen linealmente y en estricto paralelo, conservando la distancia de 4,0 m correspondiente a la longitud del cable sometido a tensión. Alrededor del segundo 102, el bloque entra en contacto con la superficie inferior (0,0 m), momento en el cual la velocidad mecánica retorna suavemente a cero gracias a la acción del *Rate Limiter*, deteniendo el gancho exactamente en 4,0 m para relajar mecánicamente el modelo. Finalmente, una vez que el control supervisor confirma la detención total y la cota mínima simultáneamente, la señal lógica de *Estado de enganche* cae a 0 tras el retardo de dos segundos impuesto por el *Turn-on Delay*. Esto valida la liberación exitosa y segura de la masa en el suelo, concluyendo la fase cinemática del descenso.

De manera análoga, la Figura 5.6 expone el comportamiento del flujo energético durante el ciclo de descarga o generación, confirmando la viabilidad y efectividad del freno regenerativo.

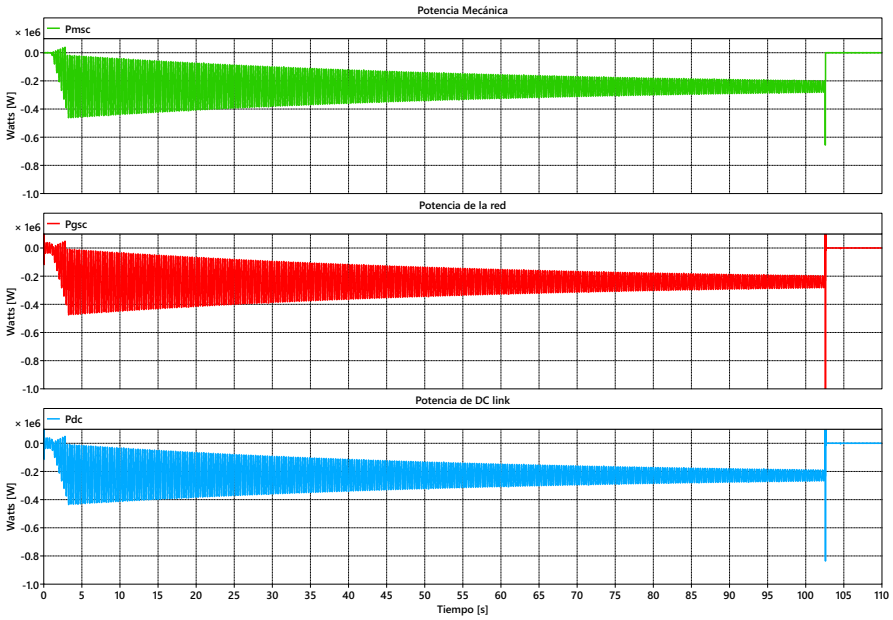


Figura 5.6: Balance de potencias durante la generación: potencia mecánica (P_{msc}), potencia de red (P_{gsc}) y potencia en el bus DC (P_{dc}).

A diferencia del ciclo de izaje, durante el descenso de la masa total acoplada, las tres potencias asumen valores negativos, lo que ratifica que la máquina PMSM está operando en el cuarto cuadrante (como generador). La potencia mecánica (P_{msc}) presenta un transitorio inicial producto de la rampa de aceleración, para luego estabilizarse en un régimen constante cercano a los $-0{,}23$ MW (-230 kW), transformando la energía potencial gravitatoria en energía en el eje. Esta energía es rectificada activamente por el convertidor MSC y transmitida a través del enlace continuo (P_{dc}) hacia el convertidor AFE, el cual se encarga de inyectar la potencia de vuelta a la red eléctrica (P_{gsc}). Al igual que en la fase de motorización, la magnitud de la potencia manejada mantiene un margen de seguridad del 77 % respecto al límite térmico de 1 MW, asegurando una operación estable y eficiente. Finalmente, al detenerse el gancho en la cota inferior (cercano al segundo 102), el flujo de potencias cae abruptamente a cero, marcando el fin de la recuperación energética.

Por su parte, la Figura 5.7 ratifica la estabilidad del sistema eléctrico al operar bajo un régimen de flujo de potencia inverso. Durante toda la fase de descenso regenerativo, el convertidor AFE logra mantener la tensión del bus continuo (V_{dc}) sólidamente regulada en torno a su referencia de 1300 V, absorbiendo la energía proveniente del generador de manera continua y estable. Al alcanzar la cota inferior (cercano al $t = 102$ s) y conmutar la referencia de velocidad a cero, se observa un transitorio de tensión pronunciado. Este pico es una consecuencia física esperable

debida a la interrupción abrupta de los $-0{,}23$ MW de potencia regenerada y la rápida evacuación de la energía almacenada en el enlace inductivo, fenómeno que el sistema logra mitigar para establecer un nuevo punto de equilibrio en reposo.

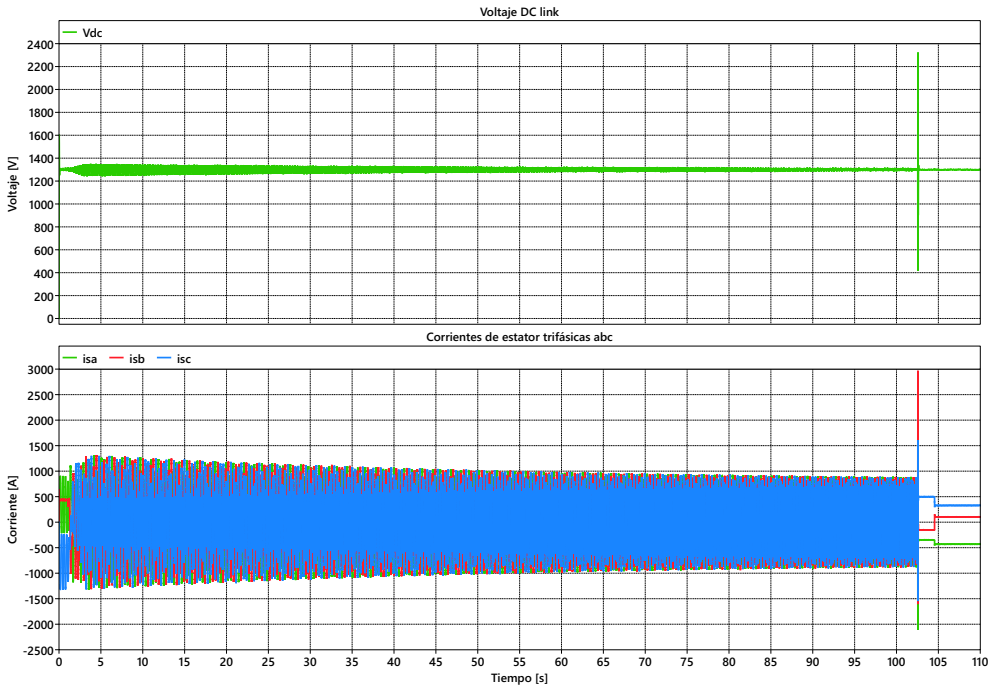


Figura 5.7: Variables eléctricas durante la generación: tensión del bus DC y corrientes de fase del estator operando en cuarto cuadrante.

En cuanto a la dinámica del inversor (MSC), las corrientes de estator (i_{abc}) exhiben un comportamiento simétrico y constante asumiendo valores negativos durante el descenso. Esta polaridad invertida refleja directamente la operación en modo generador y representa el **torque de frenado electromagnético** exigido a la máquina PMSM para contrarrestar la aceleración gravitacional de la masa acoplada. De forma análoga al ciclo de izaje, al detenerse el motor ($\omega_m = 0$), las corrientes alternas transicionan inmediatamente a valores de corriente continua (DC). Este fenómeno evidencia la aplicación del **torque de retención**, el cual sostiene la tensión del cable durante los dos segundos de retardo programados para la apertura de las garras. Una vez que el biestable SR se resetea y la carga de 24,65 toneladas es transferida completamente al suelo, la exigencia mecánica sobre el motor desaparece, lo que se refleja en la caída drástica de las corrientes hacia el final de la simulación.

5.6. Síntesis de la Validación y Transición a Nivel de Red

A lo largo de este capítulo se ha validado exhaustivamente el desempeño electromecánico y de control del sistema SGES mediante simulaciones dinámicas de alta fidelidad. Se comprobó que la topología Back-to-Back, operando bajo las estrategias VOC y FOC, es capaz de gobernar el izaje y descenso de la masa de 24 toneladas, manteniendo la estabilidad del bus DC y respetando los límites de corriente y tensión.

Habiendo validado el correcto funcionamiento del sistema de batería SGES a nivel de convertidores y máquina eléctrica, resulta fundamental escalar el análisis para comprender su impacto real. Hasta este punto, la red eléctrica ha sido tratada como un sumidero o fuente infinita. Sin embargo, el verdadero valor de los Sistemas de Almacenamiento de Energía por Gravedad radica en su capacidad para estabilizar redes reales frente a la intermitencia de las energías renovables. Por lo tanto, el siguiente capítulo evalúa el comportamiento macroscópico de la SGES operando como un sistema de compensación dinámico frente a la variabilidad de una planta de generación fotovoltaica (PV) a escala industrial.

Capítulo 6

ESTUDIO DE CASO: INTEGRACIÓN A LA RED Y COMPENSACIÓN FOTOVOLTAICA

Tras validar el modelo unitario, este capítulo escala el sistema a un entorno real consolidándolo como un SGESS acoplado a una planta fotovoltaica (PV) a nivel de red, cuya topología de interconexión se ilustra en el diagrama de bloques de la Figura 6.1. El objetivo es demostrar que la coordinación de múltiples bloques gravitatorios compensa la intermitencia solar, garantizando una inyección de potencia constante y estable de 4,21 MW a la red (equivalente al 90 % de la capacidad máxima de la planta PV).

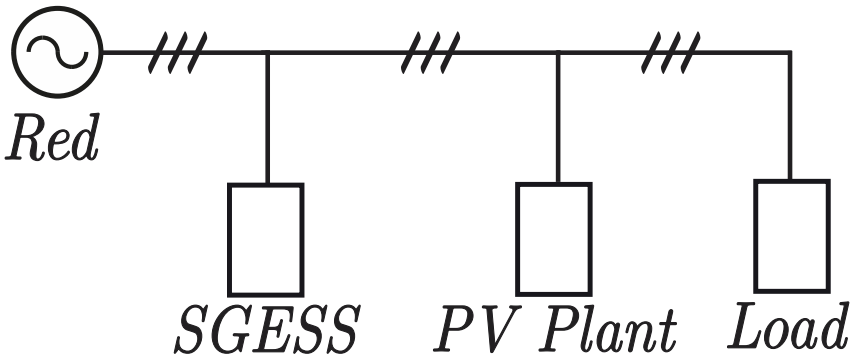


Figura 6.1: Diagrama de bloques de la interconexión entre la planta fotovoltaica (PV), el sistema de almacenamiento gravitacional (SGESS) y la red eléctrica.

6.1. Definición del Perfil Cinemático y Potencia Base

Para que el SGESS pueda operar como un sistema de compensación a gran escala, es imperativo definir primero el comportamiento dinámico de su unidad fundamental: un solo bloque de concreto. El diseño de la estrategia de control se sustenta en parámetros físicos fijos, definidos en las etapas previas de validación, donde la masa útil a izar es de $m = 24,000$ kg y el radio del tambor del winche es $r = 0{,}85$ m.

El principio de funcionamiento del sistema radica en el control estricto de la potencia mecánica inyectada o absorbida, la cual depende directamente de la velocidad de ascenso o descenso de la carga. Retomando el modelo de energía potencial gravitatoria introducido previamente en la Ecuación (2.1), la potencia instantánea $P(t)$ corresponde a su derivada respecto al tiempo, definiéndose formalmente como:

$$P(t) = \frac{dE_p}{dt} = \frac{d}{dt}[m \cdot g \cdot h(t)] = m \cdot g \cdot v(t) \tag{6.1}$$

Donde g es la aceleración de gravedad (9,81 m/s^2), $h(t)$ es la altura instantánea y $v(t)$ es la velocidad lineal de la masa. Considerando la relación cinemática de transmisión directa entre la velocidad lineal de la carga y la velocidad angular del motor eléctrico $\omega(t)$, se obtiene la ecuación rectora que vincula el accionamiento rotacional con la potencia:

$$P(t) = m \cdot g \cdot [\omega(t) \cdot r] \tag{6.2}$$

La Ecuación 6.2 demuestra que, al mantener la masa y el radio constantes, la potencia del sistema es directamente proporcional a la velocidad angular $\omega(t)$. Sin embargo, aplicar un escalón de velocidad instantáneo (arranque directo) exigiría un torque infinito por parte del motor PMSM, provocando transitorios de corriente destructivos y el colapso del bus de continua (bus DC).

Como se evidenció en los perfiles cinemáticos de las Figuras 5.2 y 5.5 del capítulo anterior, para mitigar estos efectos inerciales se impone un perfil trapezoidal para la velocidad angular. Dado que la potencia mecánica es directamente proporcional a la velocidad (según la Ecuación 6.2), el flujo de potencia hereda exactamente esta misma geometría trapezoidal. De este modo, el ciclo activo de cada bloque queda dividido en tres fases electromecánicas y energéticas críticas:

1. **Rampa de aceleración:** La velocidad angular aumenta linealmente desde 0 hasta su valor nominal. Consecuentemente, la potencia (absorbida o inyectada) crece de forma gradual, lo que limita el *jerk* (derivada de la aceleración) y asegura un aumento progresivo en la demanda de corriente, protegiendo a los convertidores.

2. **Régimen estacionario:** La velocidad se mantiene constante en su consigna nominal. En esta fase, la curva de potencia alcanza su "techo"plano (*plateau*)

y el sistema sostiene su capacidad de transferencia máxima de diseño de forma continua.

3. **Rampa de frenado:** La velocidad decrece linealmente hasta cero. De forma proporcional, el intercambio de potencia decae suavemente hacia la anulación, deteniendo la gran inercia de la masa de forma controlada antes de la activación del freno mecánico de fijación.

Para los experimentos de esta investigación, la velocidad angular nominal en régimen estacionario se ha establecido en $\omega = 1{,}17$ rad/s. Sustituyendo los parámetros mecánicos en la Ecuación 6.2, se determina la capacidad operativa de la unidad fundamental:

$$P_{nominal} = 24000 \text{ kg} \cdot 9{,}81 \text{ m/s}^2 \cdot 1{,}17 \text{ rad/s} \cdot 0{,}85 \text{ m} \approx 234,163 \text{ W} \tag{6.3}$$

Este cálculo matemático formaliza que el desplazamiento a velocidad constante de un solo bloque genera o consume un pulso de potencia continuo de aproximadamente 0,23 MW (o 230 kW). Este valor, validado previamente en las simulaciones del Capítulo 5, constituye el "ladrillo de construcción.º unidad mínima de potencia del SGESS. A partir de esta magnitud base, se diseñarán las estrategias de multiplexación en el tiempo (relevo) y superposición de amplitudes (paralelo) necesarias para escalar el sistema y alcanzar los requerimientos de compensación en el orden de los megawatts exigidos por la red eléctrica.

6.2. Perfil Operativo de la Red y Capacidad Nominal del SGESS

El verdadero desafío de la integración de energías renovables radica en su naturaleza intermitente y no despachable. Para evaluar la capacidad de regulación del SGESS, se introduce como fuente primaria una planta de generación fotovoltaica (PV) a escala industrial. El perfil de generación de esta planta, denotado como $P_{pv}(t)$, obedece a la curva de irradiación solar típica, presentando un pico de máxima producción en las horas centrales del día y declinando hacia los extremos.

Por otro lado, la red eléctrica (que actúa como el sumidero principal de energía) no puede absorber estas fluctuaciones drásticas sin comprometer su estabilidad. Por ello, se establece como premisa de diseño que la red exige una inyección de potencia estrictamente constante, definida como la consigna $P^*_{grid} = 4{,}21$ MW.

Para que el nodo de conexión con la red se mantenga estable en esta consigna, la sumatoria de la potencia inyectada por la planta solar y el sistema de almacenamiento debe ser siempre igual a la demanda de la red ($P_{pv}(t) + P_{sgess}(t) = P^*_{grid}$). Esta relación define la potencia de compensación instantánea que se le exige al SGESS:

$$P_{sgess}(t) = P^*_{grid} - P_{pv}(t) \tag{6.4}$$

Abordando el SGESS desde la perspectiva macroscópica de un Sistema de Almacenamiento de Energía (ESS, por sus siglas en inglés), el análisis de la Ecuación 6.4 revela dos escenarios operativos fundamentales que definen los ciclos de carga y descarga de la batería gravitatoria:

- **Escenario de Exceso de Generación (Ciclo de Carga):** Cuando la irradiación solar es máxima, la planta PV produce por encima de los 4,21 MW requeridos. En este caso, existe un excedente de energía en la red. El SGESS debe operar en modo de carga, absorbiendo este exceso de potencia para izar los bloques de concreto, transformando así la energía eléctrica sobrante en energía potencial gravitatoria almacenada.
- **Escenario de Déficit de Generación (Ciclo de Descarga):** Durante las horas de menor irradiación (mañanas, tardes o ante el paso de nubosidad), la planta PV no logra alcanzar la consigna. En este escenario, la red experimenta un déficit. El SGESS entra en modo de descarga, liberando los bloques desde la cota superior para transformar la energía potencial almacenada de vuelta en energía eléctrica, inyectando la potencia exacta que falta para sostener el bus en 4,21 MW.

Para comprender el alcance del SGESS frente a estos escenarios, es fundamental cuantificar la capacidad energética y el aporte de potencia que una unidad básica (un solo bloque) puede ofrecer. El almacenamiento total está determinado por la energía potencial máxima que la masa útil de 24,000 kg puede acumular al ser elevada hasta la cota máxima de 100 m:

$$E_{bloque} = m \cdot g \cdot h_{max} = 24000 \text{ kg} \cdot 9{,}81 \text{ m/s}^2 \cdot 100 \text{ m} = 23{,}54 \text{ MJ} \tag{6.5}$$

Esta magnitud indica que cada bloque posicionado en la estructura superior almacena 23,54 MJ, equivalentes a una capacidad de batería de aproximadamente 6,54 kWh.

En términos de tasa de transferencia, el desplazamiento a velocidad nominal de esta masa entrega un pulso de potencia exacto de 0,234 MW. Para comprender el escalamiento del sistema, es crucial contextualizar este valor dentro de la capacidad total de la instalación. Como premisa de diseño estructural, se establece que la capacidad operativa de esta unidad fundamental represente exactamente un 5 % de la producción máxima de la planta fotovoltaica ($P_{pv,max}$). Bajo esta relación de dimensionamiento, la planta solar proyecta un pico máximo de generación de 4,68 MW:

$$\%_{bloque} = \frac{P_{bloque}}{P_{pv,max}} = \frac{0{,}234 \text{ MW}}{4{,}68 \text{ MW}} = 5\,\% \tag{6.6}$$

Es precisamente sobre esta capacidad máxima instalada que la red eléctrica exige su consigna operativa ininterrumpida de 4,21 MW. Este valor se define

estratégicamente como un punto de operación de referencia equivalente al 90 % del pico de generación solar (4,68 MW · 0,90 ≈ 4,21 MW). De este modo, el sistema de almacenamiento SGESS actúa compensando las desviaciones de la generación fotovoltaica respecto a dicha consigna, absorbiendo los excedentes cuando $P_{pv}(t) > P^*_{grid}$ y suministrando potencia cuando $P_{pv}(t) < P^*_{grid}$.

A esta limitación de amplitud (donde un bloque individual gestiona solo un 5 % de la escala del problema) se le suma una restricción temporal intrínseca. Gobernado por la velocidad constante y los perfiles trapezoidales de aceleración y frenado, el tiempo físico que tarda un bloque en recorrer la distancia completa entre la cota 0 m y los 100 m es de exactamente 101 segundos.

En síntesis, ante el perfil de compensación continuo y de gran magnitud que exige la red fotovoltaica, un bloque operando de manera aislada actúa como una batería de 101 segundos de duración máxima que aporta un 5 % de la potencia pico instalada. Esta unidad fundamental es insuficiente para aplicaciones continuas, lo que hace indispensable escalar la solución. Para demostrar la viabilidad de este escalamiento hacia arquitecturas matriciales de control sincronizado, la siguiente sección plantea una metodología de validación basada en experimentos progresivos.

6.3. Validación de Estrategias de Escalamiento: Experimentos Progresivos

Para validar las estrategias de escalamiento propuestas y demostrar cómo el sistema de control supera las fronteras cinemáticas de una unidad básica, se ha diseñado una metodología de cuatro experimentos progresivos. En cada prueba, se somete al SGESS a un evento de desviación fotovoltaica específico, diseñado a la medida para evaluar los límites de amplitud y tiempo de cada configuración operativa.

6.3.1. Experimento 1: Operación de una Unidad Aislada

El primer experimento establece la línea base del sistema evaluando el comportamiento de un único bloque. Para esto, se simula un perfil de generación fotovoltaica con dos eventos de desviación leve respecto al requerimiento constante de la red (4,21 MW): primero un exceso de generación y, posteriormente, un déficit. Ambos eventos exigen compensar exactamente un 5 % de la capacidad nominal (equivalente a 0,234 MW) durante periodos de 101 segundos.

Como se observa en los resultados (Figura 6.2), entre los 50 y 150 s, la planta produce más de lo requerido. El sistema impone el perfil de velocidad al motor y absorbe la potencia excedente (−0,234 MW), elevando la masa desde su posición inicial hasta alcanzar su cota máxima (100 m). Posteriormente, entre los 200 y 300 s, ocurre un déficit de generación; el sistema invierte su operación e inyecta los 0,234 MW faltantes a la red, descendiendo el bloque de vuelta a los 0 m.

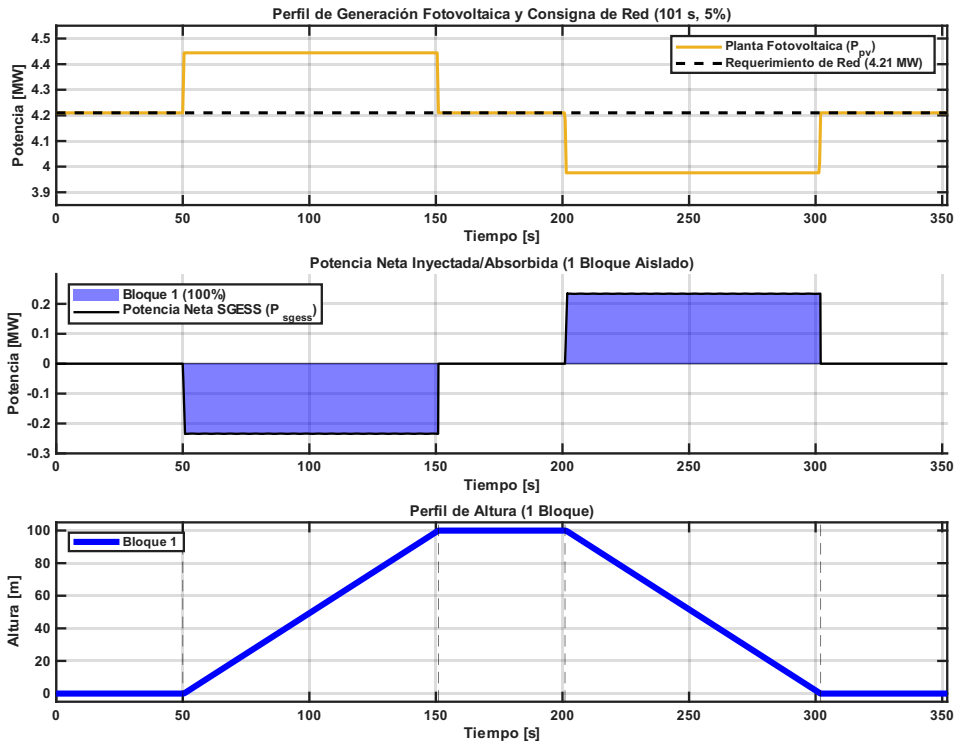


Figura 6.2: Experimento 1: Operación de un bloque aislado compensando eventos de exceso (absorción) y déficit (inyección) del 5 % durante 101 s.

La simulación confirma que el bloque logra sostener la transferencia de potencia y compensar la desviación a la perfección en ambas direcciones. Al mismo tiempo, los resultados ilustran el dimensionamiento exacto de la unidad: el sistema está diseñado para que, tras los 101 segundos de operación continua al 5 % de potencia, la masa alcance exactamente sus límites de recorrido (100 m en absorción y 0 m en inyección). Al llegar a estos topes mecánicos, la capacidad de la unidad se agota, lo que demuestra claramente que un bloque aislado es insuficiente para eventos de compensación de mayor magnitud o duración, justificando así la necesidad de implementar un sistema multibloque de relevo.

6.3.2. Experimento 2: Escalamiento Temporal (Operación en Relevo)

Para dar solución a la limitación de capacidad del bloque aislado evidenciada en el experimento anterior, este segundo escenario introduce la estrategia de **operación en relevo**. En este caso, el evento de desviación en la generación fotovoltaica mantiene la misma exigencia de amplitud (5 %), pero duplica su duración continua a 202 segundos.

La estrategia consiste en despachar dos bloques de manera secuencial. Como se observa en los resultados (Figura 6.3), el control supervisor aplica un desfase

temporal rigurosamente calculado para garantizar la continuidad del servicio.

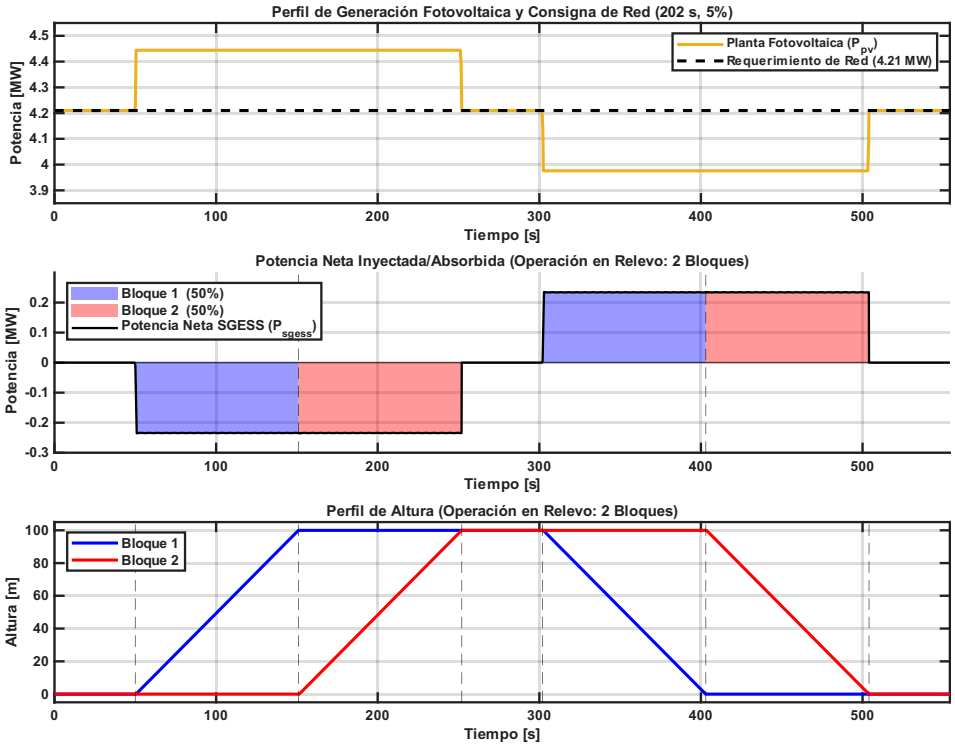


Figura 6.3: Experimento 2: Operación en relevo. Dos bloques secuenciales compensando un evento del 5 % durante 202 s.

Durante el evento de exceso (absorción), el primer bloque opera hasta alcanzar su cota máxima de 100 m. En el instante exacto en que este bloque inicia su rampa de desaceleración al llegar a su límite mecánico, el segundo bloque inicia su rampa de aceleración para tomar el relevo. Este mismo principio de solapamiento se ejecuta a la inversa durante el evento de déficit (inyección).

La simulación demuestra que la superposición algebraica de estas rampas complementarias da como resultado una potencia neta constante y sin interrupciones. De esta forma, se valida que el diseño modular "tapa los huecos"mecánicos de las unidades individuales, logrando extender el tiempo de inyección y absorción al doble de su capacidad base sin perder la estabilidad de la red.

6.3.3. Experimento 3: Escalamiento en Amplitud (Operación en Paralelo)

Mientras que el Experimento 2 soluciona la continuidad temporal mediante el relevo, el tercer experimento aborda el escalamiento de potencia mediante la

operación en paralelo. Para esta prueba, el evento de desviación fotovoltaica exige compensar una amplitud del 10 % de la capacidad nominal (aproximadamente 0,468 MW), manteniendo la duración fundamental de 101 segundos.

Como se detalla en los resultados (Figura 6.4), para cubrir esta mayor exigencia sin sobrecargar una sola unidad, el sistema reparte la carga equitativamente.

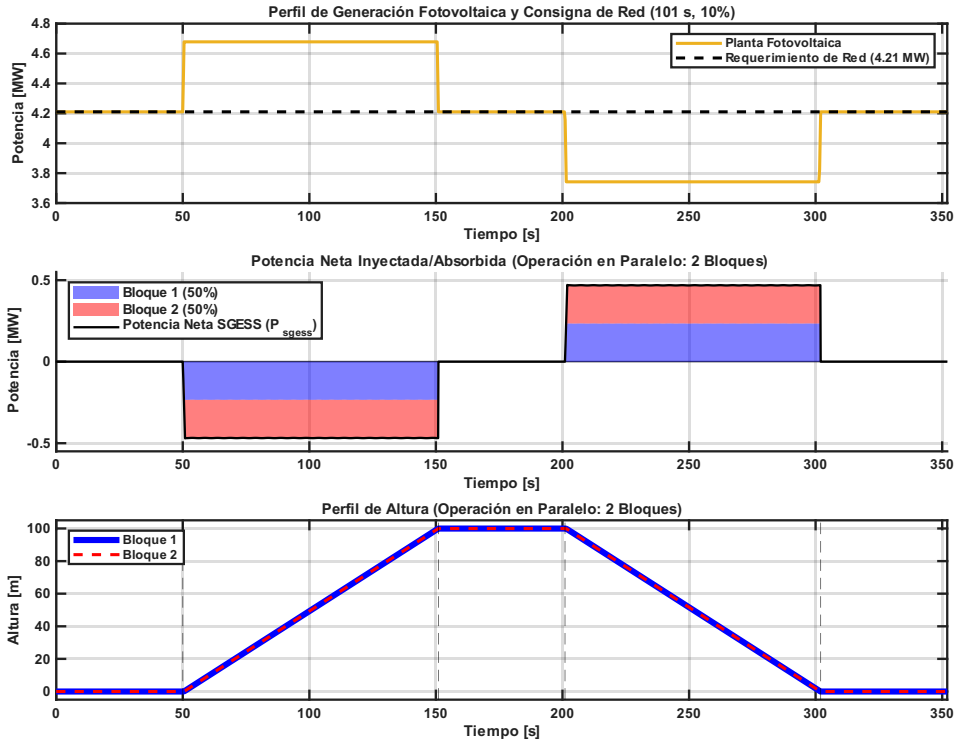


Figura 6.4: Experimento 3: Operación en paralelo. Dos bloques simultáneos compensando un evento del 10 % durante 101 s.

El control supervisor emite comandos de arranque simultáneos a dos bloques, sometiéndolos a idénticos perfiles de velocidad. Por el principio de superposición, la potencia mecánica neta en el nodo (línea negra) es la suma directa de las potencias individuales, donde el Bloque 1 y el Bloque 2 aportan un 5 % cada uno.

La simulación evidencia el correcto dimensionamiento del sistema: al agrupar unidades operando en paralelo, se multiplica la capacidad de transferencia para cubrir exitosamente picos de mayor magnitud. Asimismo, al carecer de desfase temporal y operar de forma idéntica, ambos bloques alcanzan exactamente sus cotas máximas (100 m en absorción y 0 m en inyección) de manera simultánea al cumplirse los 101 segundos. Esto valida que el agrupamiento responde de forma precisa y predecible ante exigencias de mayor amplitud, manteniendo la red estable.

6.3.4. Experimento 4: Operación Combinada Matricial (Paralelo y Relevo)

El cuarto experimento constituye la validación definitiva de la arquitectura de control, integrando las estrategias de amplitud (paralelo) y temporalidad (relevo) en un **arreglo matricial dinámico**. El evento de prueba exige el escenario más complejo hasta el momento: compensar un desvío del 10 % en la potencia durante un periodo prolongado de 202 segundos.

Para lograrlo, el sistema despliega un total de cuatro bloques operando de manera coordinada. Como se detalla en los resultados (Figura 6.5), el control supervisor organiza las unidades en pares simétricos para satisfacer tanto la exigencia de potencia como la de tiempo de forma simultánea.

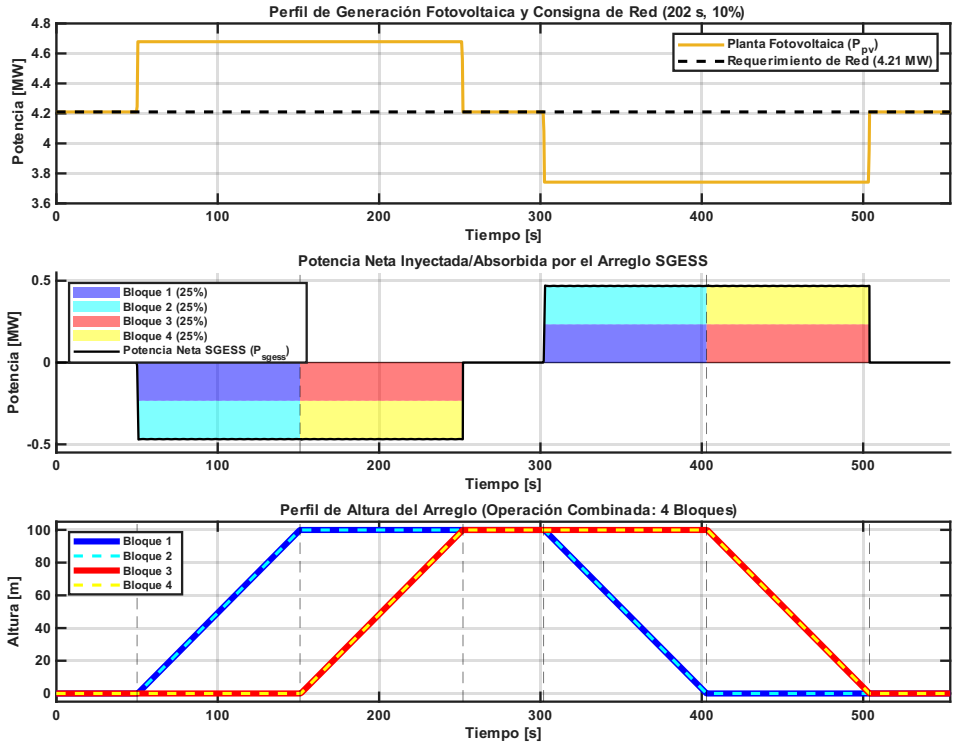


Figura 6.5: Experimento 4: Operación combinada. Cuatro bloques en paralelo y relevo compensando un evento del 10 % durante 202 s.

Durante el evento de exceso de generación, el primer banco (compuesto por el Bloque 1 y el Bloque 2) arranca en configuración paralela, sumando sus capacidades individuales para absorber el requerimiento inicial del 10 %. Al transcurrir 101 segundos y alcanzar este primer banco su límite físico de 100 m, el control ejecuta un relevo cinemático de alta precisión: el Bloque 3 toma el relevo directo del Bloque 1, mientras que el Bloque 4 releva simultáneamente al Bloque 2. Este segundo

banco (Bloques 3 y 4) continúa operando en paralelo para sostener la transferencia de potencia sin interrupciones durante los 101 segundos restantes. Este mismo comportamiento orquestado se repite a la inversa durante el evento de déficit.

Esta prueba integral demuestra matemáticamente que, al combinar la superposición de potencia (operación paralela) y la continuidad secuencial (operación en relevo), el SGESS supera todas las limitaciones físicas de una unidad aislada. Más importante aún, este experimento ilustra el **principio fundamental de funcionamiento** de las baterías gravitatorias modulares: al añadir una mayor cantidad de bloques a la matriz, el sistema adquiere la capacidad de escalar de forma virtualmente indefinida, emulando un comportamiento continuo y de alta potencia capaz de mantener la red operativa frente a transitorios de cualquier magnitud o duración.

6.4. Síntesis del Capítulo

A lo largo de este capítulo se ha demostrado la viabilidad técnica del SGESS como una solución efectiva para la estabilización de redes eléctricas frente a la intermitencia de fuentes renovables. La evolución desde el control electromecánico de una unidad aislada hacia una arquitectura de gestión matricial permitió comprobar que, mediante la orquestación de maniobras en paralelo y en relevo, es posible superar las restricciones físicas individuales de los bloques gravitatorios. Esto consolida al sistema como una alternativa de almacenamiento robusta frente a las baterías químicas convencionales, y libre de las estrictas limitantes geográficas que condicionan a las centrales hidroeléctricas de bombeo (PHS).

De esta forma, el modelo propuesto logra emular un almacenamiento continuo y de alta potencia, garantizando el cumplimiento estricto de la consigna exigida por la red. Con la validación exitosa de estos escenarios operativos de escalamiento, se da por finalizada la etapa de evaluación de la planta híbrida (PV + SGESS), dando paso a la síntesis de los hallazgos finales y a las proyecciones de este trabajo de investigación, las cuales se detallan en el capítulo de conclusiones.

Capítulo 7

CONCLUSIONES

Una vez parametrizado e implementado el sistema integral de almacenamiento de energía por gravedad, y tras validar el desempeño de las estrategias de control a nivel unitario mediante simulaciones dinámicas, se escaló el modelo para evaluar su impacto operativo a nivel de red. Habiendo demostrado la viabilidad del sistema para operar como una matriz coordinada en la compensación de plantas fotovoltaicas, se presentan a continuación las conclusiones generales derivadas de este trabajo de memoria. Estas recogen las principales contribuciones no solo en el área de la electrónica de potencia y el control de máquinas eléctricas, sino también en la gestión y escalabilidad de sistemas de almacenamiento de energía a gran escala.

7.1. Conclusiones Generales

En base a los objetivos planteados al inicio de esta investigación, el análisis de los resultados permite agrupar las conclusiones en dos ejes fundamentales: el desempeño electromecánico unitario y la escalabilidad del sistema a nivel de red.

Desempeño a Nivel Unitario (Electrónica de Potencia y Control)

- **Efectividad de la Topología Back-to-Back:** Se demostró que la arquitectura de conversión seleccionada es óptima para aplicaciones de almacenamiento gravitacional. El desacoplo dinámico entre el control de torque del MSC y la regulación de tensión del GSC permitió gestionar flujos bidireccionales de potencia de forma estable. En particular, durante el ciclo de descarga, se validó la capacidad del sistema para operar sostenidamente en el cuarto cuadrante (freno regenerativo), transformando la energía potencial de la masa descendente e inyectando potencia activa a la red eléctrica sin comprometer la calidad de la energía ni la estabilidad del bus continuo.

- **Robustez del Control Vectorial:** El diseño de los controladores mediante la técnica de asignación de polos resultó ser robusto ante la elevada inercia del sistema ($70,000$ kg·m^2). La sintonización analítica garantizó un seguimiento preciso de las referencias de corriente y velocidad con error de estado estacionario nulo, limitando además los transitorios de tensión en el bus DC por debajo del 10 % durante eventos críticos de acoplamiento y desacoplamiento.

- **Optimización Energética mediante MTPA:** La implementación del algoritmo de Máximo Torque por Amperio (MTPA) validó la capacidad de aprovechar la saliencia de la máquina IPMSM. Al desplazar el vector de corriente hacia el segundo cuadrante del plano dq, se logró reducir la magnitud de la corriente de estator necesaria para el izaje y la retención de las 26 toneladas, minimizando así las pérdidas por efecto Joule y optimizando la eficiencia térmica del convertidor.

- **Seguridad y Estabilidad Operativa:** La integración de una lógica supervisora y limitadores de rampa (*Rate Limiter*) fue fundamental para operar de forma segura dentro de los límites de potencia de 1 MW del AFE.

Desempeño a Nivel Sistémico (Escalamiento y Red)

- **Escalamiento y Compensación Fotovoltaica:** La evaluación del sistema acoplado a un entorno de generación industrial validó la capacidad del SGESS para operar como un actor dinámico y robusto en el sistema eléctrico. Se demostró exitosamente que el sistema es capaz de mitigar la intermitencia solar, absorbiendo excesos e inyectando déficits de generación para mantener estrictamente la consigna de potencia exigida por la red (4,21 MW).

- **Validación de la Arquitectura Matricial:** Se comprobó matemáticamente el principio fundamental de escalabilidad de las baterías gravitatorias modulares. Mediante la orquestación del control supervisor, aplicando superposición de potencia (operación en paralelo) y continuidad secuencial (operación en relevo cinemático), el arreglo multibloque logró superar las restricciones físicas y de recorrido de las unidades individuales. Esto confirma que el sistema es virtualmente escalable tanto en amplitud como en duración, logrando emular una transferencia de potencia estable frente a transitorios complejos.

7.2. Contribuciones de la Memoria

El desarrollo de este trabajo aporta elementos de valor técnico y académico en los siguientes puntos:

1. **Metodología de Sintonización para Inercias Masivas:** Se provee un marco de diseño detallado para el control de máquinas de acople directo (*Direct Drive*) en aplicaciones de almacenamiento de energía, donde las constantes de tiempo mecánicas superan significativamente a las eléctricas.

2. **Modelación Multi-dominio Integrada:** Se desarrolló un modelo en PLECS que vincula de forma coherente el dominio eléctrico (convertidores), magnético (PMSM), mecánico (transmisión elástica) y lógico (supervisor), permitiendo un análisis sistémico del SGESS que puede ser escalado a otros perfiles de carga.

3. **Gestión del Freno Regenerativo y Retención Eléctrica:** La memoria documenta la capacidad del accionamiento FOC no solo para generar energía de retorno a la red durante el descenso, sino para realizar una transición imperceptible hacia un estado de retención. El sostenimiento de cargas gravitacionales masivas en reposo mediante corriente continua elimina la dependencia crítica de frenos mecánicos durante transitorios rápidos.

4. **Desarrollo de Estrategias de Control Matricial (Relevo y Paralelo):** Como aporte original de esta investigación, se formuló y validó una arquitectura de control supervisor que permite la operación coordinada de múltiples bloques gravitatorios. La técnica de relevo cinemático demuestra cómo mitigar las limitaciones físicas superponiendo rampas de aceleración y desaceleración, garantizando una inyección de potencia ininterrumpida.

5. **Base para la Integración en Redes Híbridas:** Los resultados obtenidos sientan un precedente para la integración de sistemas SGESS en micro-redes y plantas renovables. Se demostró que el control AFE permite una interfaz amigable con la red bajo normativas de factor de potencia unitario, operando eficientemente como sistema de compensación dinámica frente a la intermitencia fotovoltaica.

7.3. Trabajos Futuros

A partir de los resultados obtenidos y las limitaciones identificadas durante el desarrollo de esta memoria, se proponen las siguientes líneas de investigación para dar continuidad a este trabajo:

- **Refinamiento del Modelo de la Planta Mecánica:** Se sugiere profundizar en el modelado de la transmisión incorporando dinámicas de mayor orden. Esto incluye el estudio de sistemas con motores de alta velocidad que requieran el uso de cajas reductoras y engranajes planetarios, analizando el impacto de las holguras (*backlash*), la fricción no lineal y la elasticidad de los cables en la estabilidad de los lazos de control de velocidad y posición.

- **Implementación de Estrategias de Control Avanzado:** Evaluar el desempeño de técnicas de control predictivo basado en modelo (*Model Predictive Control*, MPC) en sustitución de los controladores PI clásicos. El MPC permitiría gestionar de forma nativa las restricciones de corriente y tensión del convertidor, optimizando la respuesta transitoria ante el acoplamiento y desacoplamiento súbito de la carga gravitacional.

- **Análisis de Calidad de Energía y Filtros Activos:** Realizar un estudio detallado del contenido armónico (THD) en el punto de acoplamiento común bajo distintos regímenes de motorización y generación. Esto permitiría diseñar filtros LCL optimizados o implementar algoritmos de compensación de armónicos desde el propio convertidor AFE, asegurando el cumplimiento estricto de normativas internacionales de interconexión eléctrica.

- **Estudio de Degradación y Ciclo de Vida:** Desarrollar un modelo térmico y de fatiga para los componentes críticos (especialmente los condensadores del bus DC y los semiconductores de los convertidores) basado en perfiles de operación SGESS reales. Esto con el fin de estimar el costo operativo y la vida útil del sistema bajo ciclos continuos y bidireccionales de carga y descarga.

- **Optimización de Despacho a Gran Escala (EMS):** Desarrollar e implementar un Sistema de Gestión de Energía (*Energy Management System*) de alto nivel para matrices gravitatorias masivas. Esto implicaría integrar algoritmos de optimización y pronósticos meteorológicos en tiempo real para coordinar predictivamente el despacho (relevo y paralelo) de decenas o cientos de bloques, maximizando la eficiencia global de la planta híbrida frente a curvas de demanda variables.

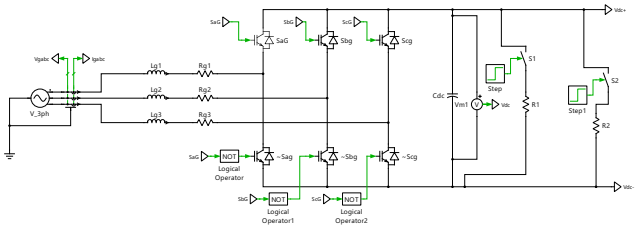
- **Análisis Técnico-Económico Comparativo:** Expandir la validación técnica hacia un estudio de prefactibilidad económica. Se propone comparar los costos nivelados de almacenamiento (LCOS) del arreglo SGESS frente a tecnologías maduras como las baterías de iones de litio y las centrales hidroeléctricas de bombeo (PHS), evaluando variables como la independencia geográfica, la nula degradación química de la masa útil y los costos de mantenimiento a largo plazo.

Apéndice A

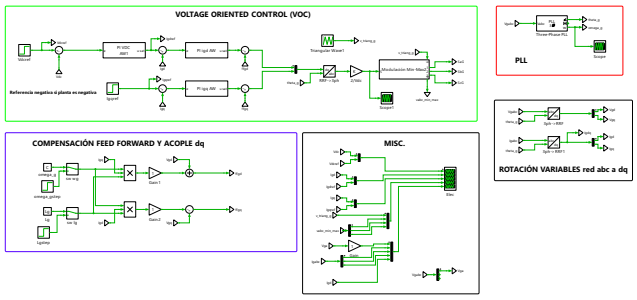
SIMULACIONES

En este apéndice se presentan los modelos de simulación implementados en el software PLECS.

A.1. Simulación convertidor de 2 niveles AFE con estrategia control VOC



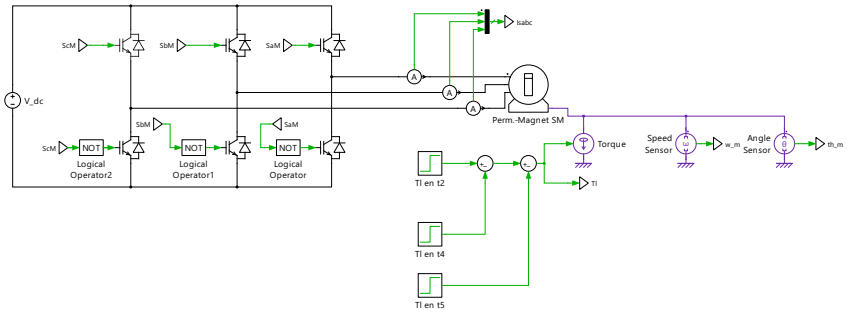
(a) Etapa de potencia AFE.



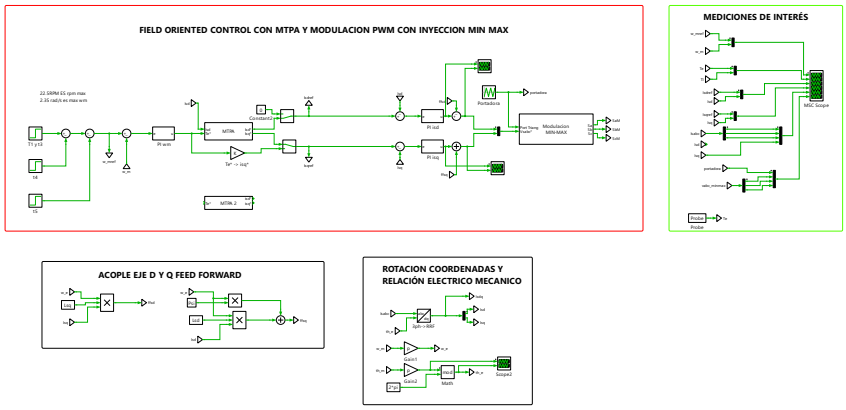
(b) Lazo de control Voltage Oriented Control (VOC).

Figura A.1: Esquemáticos completos del GSC en PLECS.

A.2. Simulación convertidor de 2 niveles conectado a PMSM con estrategia control FOC



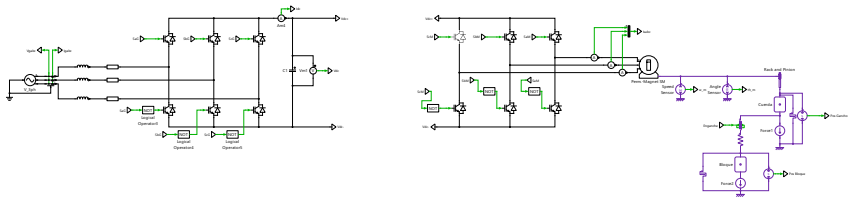
(a) Etapa de motor PMSM.



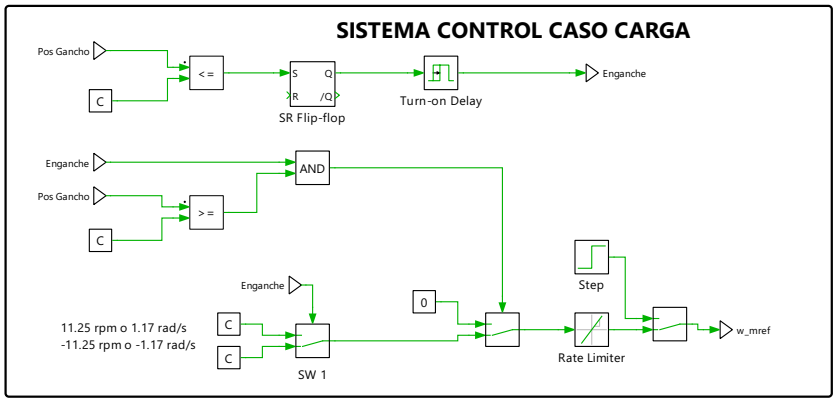
(b) Lazo de control Field Oriented Control (FOC).

Figura A.2: Esquemáticos completos del GSC en PLECS.

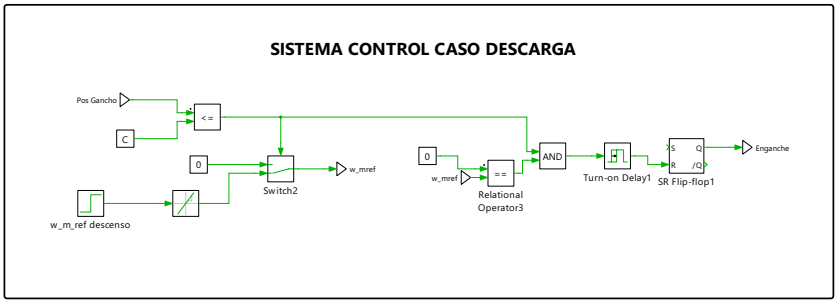
A.3. Simulación convertidor Back To Back conectado a PMSM y SGES



(a) Etapa de Back To Back 2 niveles



(b) Lazo de control izado de carga



(c) Lazo de control descenso de carga

Figura A.3: Esquemáticos completos del sistema conectado a SGES en PLECS.

REFERENCIAS

[1] Mukrimin Sevket Guney y Yalcin Tepe. "Classification and assessment of energy storage systems". En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 75.C (2017), págs. 1187-1197. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.102.

[2] Ahmed Aghmadi y Osama A. Mohammed. "Energy Storage Systems: Technologies and High-Power Applications". En: *Batteries* 10.4 (2024). ISSN: 2313-0105. DOI: 10.3390/batteries10040141. URL: https://www.mdpi.com/2313-0105/10/4/141.

[3] Mohanraj Kandhasamy et al. "An Overview on Classification of Energy Storage Systems". En: *Materials for Boosting Energy Storage. Volume 2: Advances in Sustainable Energy Technologies* (2024), págs. 1-25.

[4] Alexa Stephie. "A Comprehensive Guide to Primary and Secondary Batteries". En: *Research & Reviews: Journal of Pure and Applied Physics* 11.2 (2023). DOI: 10.4172/2320-2459.11.2.010.

[5] Ioan Sarbu y Calin Sebarchievici. "A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage". En: *Sustainability* 10 (2018). DOI: 10.3390/su10010191.

[6] Chukwuemeka Emmanuel Okafor y Komla Agbenyo Folly. "Mechanical Energy Storage Systems and Their Applications in Power Systems". En: *Mechanical Energy Storage Systems and Their Applications in Power Systems*. IntechOpen, 2021. DOI: 10.5772/intechopen.111399.

[7] G. AlZohbi. "Gravity Battery: A New Innovation for a Sustainable Energy Storage". En: *2023 6th International Conference on Electrical Engineering and Green Energy (CEEGE)*. IEEE. 2023, págs. 1-6. DOI: 10.1109/CEEGE58447.2023.10246686.

[8] Sean O'Neill. "Weights-Based Gravity Energy Storage Looks to Scale Up". En: *Engineering* 14 (2022), págs. 3-6.

[9] Julian David Hunt, Behnam Zakeri, Giacomo Falchetta et al. "Mountain Gravity Energy Storage: A new solution for closing the gap between existing short- and long-term storage technologies". En: *Energy* 190 (2020), pág. 116419.

[10] Sandy Ong. *Mix Mountains and Gravity for Long-Term Energy Storage*. Accedido: 2025-05-16. Dic. de 2019. URL: https://spectrum.ieee.org/mix-mountains-and-gravity-for-longterm-energy-storage.

[11] Ronglu Wang et al. "A Review of Gravity Energy Storage". En: *Energies* 18.7 (2025). ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en18071812. URL: https://www.mdpi.com/1996-1073/18/7/1812.

[12] Marija Maisch. *Gravitricity to build 4 MWh gravity-based storage facility on UK brownfield site*. Accedido: 2025-05-16. Feb. de 2022. URL: https://www.pv-magazine.com/2022/02/23/gravitricity-to-build-4-mwh-gravity-based-storage-facility-on-uk-brownfield-site/.

[13] A. Kavoosi y M. Tarafdar Hagh. "Solid gravity energy storage: Pioneering energy storage solution-A review". En: *Journal of Energy Storage* 113 (2025), pág. 115691. ISSN: 2352-152X. DOI: 10.1016/j.est.2024.115691.

[14] Rob Piconi. *From Rudong to Beijing to Mongolia: CEO Report*. Energy Vault Inc. Corporate Report. Reporte sobre el primer sistema EVx en Rudong, China. 2023.

[15] Energy Vault. *CN Rudong: The world's first grid-scale gravity energy storage system*. 2023. URL: https://www.energyvault.com/projects/cn-rudong (visitado 16-05-2025).

[16] Gianmario Pellegrino et al. "Performance comparison between surface-mounted and interior PM motor drives for electric vehicle application". En: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 59.2 (2012), págs. 803-811. DOI: 10.1109/TIE.2011.2151825.

[17] Oswos. *Motor Eléctrico: Tipos, Funcionamiento y Aplicaciones*. Accedido: 2025-05-16. 2024. URL: https://oswos.com/es/motor-electrico/.

[18] Shamini Dharmasena, Temitayo O Olowu y Arif I Sarwat. "Bidirectional AC/DC converter topologies: A review". En: *2017 IEEE SoutheastCon*. IEEE. 2017, págs. 1-6. DOI: 10.1109/SECON.2017.7925345.

[19] Hang Yin y Sibylle Dieckerhoff. "Experimental comparison of DPC and VOC control of a three-level NPC grid connected converter". En: *2015 IEEE 6th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*. IEEE. 2015, págs. 1-7. DOI: 10.1109/PEDG.2015.7223072.

[20] Mohd Amin Wani. "Comprehensive Review of Various Control Strategies Implemented for a 5 phase Induction Motor Drive". En: *2024 IEEE 4th International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)*. IEEE. 2024, págs. 1-6. DOI: 10.1109/SEFET61574.2024.10718138.