

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Acionamento de Elevadores Com Regeneração de Energia e Alimentação de Emergência Autônoma

Diogo Almeida Borges



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Supervisor: Prof. Carlos João Rodrigues Costa Ramos

24 de julho de 2026

Acionamento de Elevadores Com Regeneração de Energia e Alimentação de Emergência Autônoma

Diogo Almeida Borges

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

24 de julho de 2026

Resumo

Os sistemas de elevação apresentam um consumo energético relevante em edifícios e caracterizam-se por ciclos frequentes de aceleração, desaceleração, motorização e regeneração. Em sistemas convencionais, a energia produzida durante as fases regenerativas é frequentemente dissipada em resistências de travagem, não sendo aproveitada de forma útil. Neste contexto, a presente dissertação desenvolve uma arquitetura de acionamento para elevadores com capacidade de regeneração de energia e alimentação de emergência autónoma, baseada na integração de conversores eletrónicos de potência, armazenamento energético e estratégias de gestão de energia.

A arquitetura proposta assenta num barramento DC comum, que interliga a rede elétrica, o sistema de acionamento da máquina, o sistema de armazenamento e o circuito de proteção por *brake chopper*. Foram modelados e validados individualmente os principais subsistemas da solução: o conversor *Active Front End* para interface bidirecional com a rede, o inversor trifásico associado a uma máquina síncrona de ímanes permanentes, o conversor DC-DC bidirecional *Dual Active Bridge* para ligação ao armazenamento e o sistema de dissipação de energia em condições de sobretensão no barramento DC.

O trabalho incluiu ainda o desenvolvimento de uma metodologia de dimensionamento do sistema de armazenamento para suporte à operação de emergência, bem como a definição conceptual de um Sistema de Gestão de Energia responsável pela coordenação dos diferentes modos de funcionamento. Os resultados obtidos por simulação permitiram verificar o funcionamento dos subsistemas desenvolvidos em cenários de motorização, regeneração, carregamento e descarregamento do armazenamento e proteção do barramento DC. Desta forma, a dissertação demonstra a viabilidade da arquitetura proposta como base para sistemas de elevação mais eficientes, seguros e capazes de operar em situações de falha da rede elétrica.

Palavras-chave: elevadores; regeneração de energia; eletrónica de potência; barramento DC; *Active Front End*; *Dual Active Bridge*; máquina síncrona de ímanes permanentes; armazenamento de energia; alimentação de emergência; sistema de gestão de energia.

Abstract

Elevator systems account for a significant share of the energy consumption of modern buildings and are characterised by frequent motoring and regenerative operating cycles. In conventional systems, the electrical energy generated during regenerative operation is commonly dissipated through braking resistors instead of being effectively reused. This dissertation presents the development of a regenerative elevator drive architecture with autonomous emergency power supply, based on the integration of power electronic converters, energy storage, and an Energy Management System.

The proposed architecture is built around a common DC bus interconnecting the electrical grid, the motor drive, the energy storage system, and a brake chopper protection circuit. The main subsystems were modelled and individually validated, including a bidirectional Active Front End converter for grid interfacing, a three-phase inverter driving a Permanent Magnet Synchronous Machine, a bidirectional Dual Active Bridge DC-DC converter for the energy storage interface, and a brake chopper system for DC bus overvoltage protection.

The work also includes the development of a sizing methodology for the energy storage system to support emergency operation, together with the conceptual design of an Energy Management System responsible for coordinating the different operating modes. Simulation results demonstrate the correct operation of the proposed subsystems under motoring, regenerative braking, energy storage charging and discharging, and DC bus protection scenarios. Overall, the proposed architecture provides a solid foundation for the development of more energy-efficient, reliable, and resilient elevator systems capable of operating under grid outage conditions.

Keywords: elevators; regenerative braking; power electronics; DC bus; Active Front End; Dual Active Bridge; Permanent Magnet Synchronous Machine; energy storage; emergency power supply; Energy Management System.

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Prof. Carlos João Rodrigues Costa Ramos, pelo acompanhamento, disponibilidade e sugestões técnicas ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e aos docentes da unidade curricular de Iniciação à Investigação pelas condições e enquadramento fornecidos para a realização deste relatório.

Por fim, agradeço à minha família e amigos pelo apoio e motivação ao longo deste percurso.

Diogo Almeida Borges

Conteúdo

Lista de Acrónimos	ix
1 Introdução	1
1.1 Contexto e Motivação	1
1.2 Problema e Enquadramento do Trabalho	2
1.3 Objetivos da Dissertação	3
1.3.1 Objetivo Geral	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Metodologia de Desenvolvimento	4
1.5 Contributos da Dissertação	4
1.6 Estrutura da Dissertação	5
2 Estado de Arte	6
2.1 Sistemas de Elevação e Regeneração de Energia	6
2.2 Arquiteturas Energéticas Baseadas em Barramento DC	7
2.3 Conversores Eletrónicos de Potência	8
2.3.1 Conversores AC-DC para Interface com a Rede	9
2.3.2 Conversores DC-AC para Acionamentos Elétricos	10
2.3.3 Conversores DC-DC Bidirecionais	11
2.3.4 Dispositivos Semicondutores de Potência	12
2.4 Máquinas Elétricas para Sistemas de Elevação	14
2.4.1 Motores de Corrente Contínua	14
2.4.2 Motores de Indução	14
2.4.3 Máquinas Síncronas de Ímanes Permanentes	15
2.4.4 Outras Tecnologias Emergentes	16
2.4.5 Comparação das Tecnologias	16
2.5 Sistemas de Armazenamento de Energia	17
2.5.1 Baterias	17
2.5.2 Supercondensadores	18
2.5.3 Sistemas Híbridos de Armazenamento	18
2.6 Sistemas de Proteção do Barramento DC	19
2.7 Sistemas de Gestão de Energia	20
2.8 Síntese do Capítulo	21
3 Desenvolvimento da Arquitetura e Modelação do Sistema	22
3.1 Arquitetura Global do Sistema	22
3.2 Ambiente de Simulação	24
3.3 Modelo Mecânico do Elevador	24

3.4	Barramento DC	26
3.5	Sistema de Interface entre a Rede Elétrica e o Barramento DC	27
3.5.1	Função e Princípio de Funcionamento	27
3.5.2	Modelação do Circuito de Potência	28
3.5.3	Estratégia de Controlo do Conversor AFE	29
3.6	Sistema de Interface entre o Barramento DC e o Sistema de Acionamento	35
3.6.1	Função e Princípio de Funcionamento	35
3.6.2	Modelação do Circuito de Potência	37
3.6.3	Estratégia de Controlo	40
3.6.4	Perfil de Velocidade e Carga Aplicada	49
3.7	Sistema de Interface entre o Barramento DC e o Sistema de Armazenamento	50
3.7.1	Função e Princípio de Funcionamento	50
3.7.2	Modelação do Circuito de Potência	51
3.7.3	Estratégia de Controlo	53
3.8	Sistema de Dissipação de Energia por Brake Chopper	57
3.8.1	Função e Princípio de Funcionamento	57
3.8.2	Modelação e Estratégia de Controlo	57
3.9	Dimensionamento do Sistema de Armazenamento	60
3.9.1	Objetivo da Ferramenta de Dimensionamento	60
3.9.2	Metodologia de Dimensionamento	60
3.9.3	Tecnologias de Armazenamento Consideradas	61
3.9.4	Resultados Obtidos para o Caso de Estudo	62
3.9.5	Discussão dos Resultados	63
3.10	Sistema de Gestão de Energia (EMS)	64
3.10.1	Objetivos do Sistema de Gestão de Energia	64
3.10.2	Modelo Conceptual e Fluxograma de Funcionamento	64
3.10.3	Descrição dos Modos de Operação	65
3.10.4	Integração dos Subsistemas	66
4	Validação dos Subsistemas	67
4.1	Estratégia de Validação	67
4.2	Validação do Conversor AFE	67
4.2.1	Descrição do Ensaio	67
4.2.2	Resultados Obtidos	68
4.3	Validação do Sistema de Acionamento com PMSM	71
4.3.1	Descrição do Ensaio	71
4.3.2	Velocidade e Fluxo de Potência	71
4.3.3	Correntes no Referencial dq e Binário Eletromagnético	73
4.3.4	Correntes Trifásicas da Máquina	74
4.3.5	Conclusão da Validação do Acionamento	74
4.4	Validação do Conversor DAB	75
4.4.1	Descrição dos Ensaios	75
4.4.2	Ensaio 1 – Descarregamento do armazenamento (450 V $\rightarrow$ 400 V)	76
4.4.3	Ensaio 2 – Carregamento do armazenamento (350 V $\rightarrow$ 400 V)	78
4.4.4	Ensaio 3 – Condição de equilíbrio (400 V $\rightarrow$ 400 V)	79
4.4.5	Discussão dos Resultados	81
4.5	Validação do Sistema Brake Chopper	81

5	Conclusões e Trabalho Futuro	84
5.1	Conclusões	84
5.2	Trabalho Futuro	85
	Referências	86

Lista de Figuras

3.1	Arquitetura global do sistema desenvolvido.	23
3.2	Modelo mecânico simplificado do elevador utilizado no caso de estudo.	25
3.3	Circuito de potência do sistema de interface entre a rede elétrica e o barramento DC.	28
3.4	Estrutura geral do sistema de controle do conversor AFE.	29
3.5	Malha externa de regulação da tensão do barramento DC.	32
3.6	Malha interna de controle das correntes dq.	33
3.7	Sistema de geração dos sinais PWM.	35
3.8	Circuito de potência do sistema de acionamento.	37
3.9	Estrutura geral do controlador vetorial FOC implementado.	40
3.10	Malha externa de controle da velocidade.	42
3.11	Bloco de geração das referências de corrente.	44
3.12	Malhas internas de controle das correntes i_d e i_q	46
3.13	Implementação da compensação dos termos de acoplamento.	47
3.14	Sistema de geração dos sinais PWM.	48
3.15	Circuito de potência do conversor Dual Active Bridge implementado.	51
3.16	Estrutura geral da malha de controle do conversor DAB.	53
3.17	Implementação da geração dos sinais de comando através de uma função MATLAB.	55
3.18	Modelo do sistema Brake Chopper implementado em Simulink.	58
3.19	Autonomia estimada do supercondensador em função da capacitância.	63
3.20	Fluxograma conceptual do sistema de gestão de energia.	64
4.1	Correntes I_d , $I_{d,ref}$, I_q e $I_{q,ref}$	69
4.2	Correntes trifásicas da rede.	70
4.3	Tensão do barramento DC e potências médias.	70
4.4	Velocidade angular do motor e fluxos de potência do acionamento.	72
4.5	Correntes no referencial dq e binário eletromagnético.	73
4.6	Correntes trifásicas da PMSM.	74
4.7	Regulação da tensão do armazenamento durante o ensaio de descarregamento.	76
4.8	Tensões das pontes HV e LV durante a transferência de potência.	77
4.9	Potências médias durante o descarregamento do armazenamento.	77
4.10	Regulação da tensão do armazenamento durante o ensaio de carregamento.	78
4.11	Potências médias durante o carregamento do armazenamento.	79
4.12	Regulação da tensão do armazenamento em condição de equilíbrio.	80
4.13	Potências médias em condição de equilíbrio.	80
4.14	Evolução da tensão do barramento DC e sinal de comando do IGBT.	82
4.15	Potência dissipada pelo Brake Chopper.	83

Lista de Tabelas

2.1	Comparação entre tecnologias de conversão AC-DC	10
2.2	Comparação entre tecnologias de conversão DC-AC	11
2.3	Comparação entre diferentes topologias DC-DC	12
2.4	Comparação entre dispositivos semicondutores de potência	13
2.5	Comparação entre diferentes tecnologias de máquinas elétricas	16
2.6	Comparação entre tecnologias de armazenamento energético	19
3.1	Parâmetros do caso de estudo	25
3.2	Parâmetros do sistema AFE	29
3.3	Ganhos do controlador PI da malha de tensão	32
3.4	Ganhos dos controladores PI da malha de corrente	33
3.5	Parâmetros dos IGBTs utilizados no conversor	38
3.6	Parâmetros da PMSM	38
3.7	Parâmetros do controlador PI de velocidade	43
3.8	Limites das referências de corrente	45
3.9	Ganhos dos controladores PI de corrente	45
3.10	Parâmetros dos elementos passivos do conversor DAB	52
3.11	Parâmetros do condensador do sistema de armazenamento	52
3.12	Parâmetros do controlador PI	54
3.13	Parâmetros do Brake Chopper	58
3.14	Resultados obtidos para o caso de estudo residencial de 8 pisos	62
3.15	Estados considerados pelo EMS	65
4.1	Perfil de corrente aplicado ao barramento DC.	68

Lista de Acrónimos

AC	Alternating Current
AFE	<i>Active Front End</i>
CSI	<i>Current Source Inverter</i>
DAB	<i>Dual Active Bridge</i>
DC	Direct Current
EMS	<i>Energy Management System</i> (Sistema de Gestão de Energia)
ESS	<i>Energy Storage System</i> (Sistema de Armazenamento de Energia)
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FOC	<i>Field Oriented Control</i>
HV	<i>High Voltage</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
IM	<i>Induction Machine</i> (Máquina de Indução)
LV	<i>Low Voltage</i>
MATLAB	MATLAB
MOSFET	<i>Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor</i>
PI	Proporcional-Integral
PLL	<i>Phase-Locked Loop</i>
PMSM	<i>Permanent Magnet Synchronous Machine</i> (Máquina Síncrona de Ímanes Permanentes)
PSIM	PSIM
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
SC	Supercondensador
SiC	Silicon Carbide
SOC	<i>State of Charge</i> (Estado de Carga)
SRM	<i>Switched Reluctance Machine</i> (Máquina de Relutância Comutada)

SynRM	<i>Synchronous Reluctance Machine</i> (Máquina Síncrona de Relutância)
VSC	<i>Voltage Source Converter</i>
VSI	<i>Voltage Source Inverter</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto e Motivação

Os sistemas de elevação constituem atualmente um elemento indispensável em edifícios residenciais, comerciais, industriais e de serviços, assegurando a mobilidade vertical de pessoas e bens de forma segura, confortável e eficiente. O crescimento das áreas urbanas e a construção de edifícios de maior altura conduziram a uma utilização cada vez mais intensiva destes sistemas, aumentando simultaneamente a sua relevância no consumo energético global dos edifícios.

Apesar da sua importância funcional, os elevadores apresentam perfis de funcionamento caracterizados por frequentes ciclos de aceleração, desaceleração, arranque e paragem, conduzindo à existência de fluxos energéticos bidirecionais entre o sistema mecânico e o sistema elétrico. Em determinadas condições de operação, nomeadamente quando a cabina se desloca com uma distribuição de cargas favorável, a máquina elétrica pode operar em regime gerador, convertendo energia mecânica em energia elétrica.

Nos sistemas convencionais, a energia produzida durante estas fases é frequentemente dissipada em resistências de travagem, sendo convertida em calor e perdida para o sistema. Embora esta solução apresente simplicidade de implementação e elevada robustez, conduz ao desperdício de energia potencialmente recuperável e reduz a eficiência energética global da instalação.

A evolução da eletrónica de potência e das técnicas de controlo permitiu o aparecimento de sistemas regenerativos capazes de recuperar essa energia e reutilizá-la de forma útil. Dependendo da arquitetura adotada, a energia regenerada pode ser devolvida à rede elétrica, armazenada localmente ou utilizada para alimentar outros equipamentos ligados ao mesmo barramento energético. Esta capacidade contribui para a redução do consumo energético líquido, para a melhoria da eficiência global do sistema e para uma utilização mais sustentável dos recursos disponíveis.

Para além da eficiência energética, os elevadores apresentam requisitos particularmente exigentes ao nível da segurança e da disponibilidade de serviço. Em situações de falha da alimentação elétrica, torna-se fundamental garantir que os utilizadores não ficam retidos no interior da cabina, sendo desejável a existência de mecanismos que permitam efetuar uma deslocação controlada até um local seguro ou assegurar um conjunto limitado de operações de emergência. Neste contexto, a

integração de sistemas de armazenamento de energia assume um papel relevante, contribuindo para aumentar a resiliência e a fiabilidade do sistema.

O desenvolvimento de arquiteturas capazes de combinar regeneração de energia, armazenamento energético e estratégias avançadas de gestão dos fluxos de potência constitui atualmente um importante tema de investigação na área dos acionamentos elétricos e da eletrónica de potência. A procura de soluções mais eficientes, sustentáveis e seguras tem motivado o desenvolvimento de novas topologias de conversão de energia, estratégias de controlo e metodologias de dimensionamento adaptadas às exigências dos sistemas de elevação modernos.

É neste contexto que se enquadra a presente dissertação, dedicada ao estudo e desenvolvimento de uma arquitetura de acionamento para elevadores com capacidade de regeneração de energia e alimentação de emergência autónoma. O trabalho realizado procura contribuir para a melhoria da eficiência energética e da segurança operacional destes sistemas, através da integração coordenada de tecnologias de conversão de energia, armazenamento energético e supervisão do funcionamento global da instalação.

1.2 Problema e Enquadramento do Trabalho

A implementação de sistemas de regeneração de energia em elevadores constitui um problema multidisciplinar que envolve simultaneamente conhecimentos de máquinas elétricas, eletrónica de potência, sistemas de controlo, armazenamento de energia e modelação de sistemas eletromecânicos. Embora os princípios fundamentais da regeneração energética sejam conhecidos e amplamente explorados na literatura, a sua aplicação em sistemas de elevação exige a coordenação de múltiplos subsistemas com requisitos distintos e frequentemente interdependentes.

A recuperação eficiente da energia regenerada requer a existência de uma interface adequada entre a rede elétrica e o sistema de acionamento, capaz de permitir o fluxo bidirecional de potência e de assegurar simultaneamente níveis adequados de qualidade de energia. Por outro lado, a integração de armazenamento energético implica a utilização de sistemas de conversão adicionais e de estratégias de gestão que permitam controlar os processos de carga e descarga de forma segura e eficiente.

Para além dos desafios energéticos, torna-se igualmente necessário garantir o correto funcionamento do sistema em situações de falha da alimentação elétrica. Nestes cenários, o armazenamento energético pode desempenhar um papel fundamental, permitindo assegurar operações essenciais e contribuindo para a segurança dos utilizadores.

Neste contexto, o desenvolvimento de uma arquitetura de acionamento regenerativo para elevadores não deve ser encarado apenas como um problema de recuperação de energia, mas sim como um problema de integração de diferentes tecnologias de conversão, armazenamento e controlo. A interação entre estes elementos influencia diretamente o desempenho global do sistema, a sua eficiência energética, a sua robustez operacional e a sua capacidade de resposta perante diferentes condições de funcionamento.

A presente dissertação enquadra-se nesta problemática, propondo uma arquitetura capaz de combinar regeneração de energia e alimentação de emergência autônoma, recorrendo à modelação e validação dos principais subsistemas envolvidos no processo de conversão e gestão energética.

1.3 Objetivos da Dissertação

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta dissertação consiste no estudo, desenvolvimento e validação de uma arquitetura de acionamento para elevadores com capacidade de regeneração de energia e alimentação de emergência autônoma, procurando aumentar a eficiência energética do sistema e melhorar a sua capacidade de operação em situações de falha da rede elétrica.

Para atingir este objetivo, foi considerada uma abordagem baseada na integração de sistemas de conversão eletrônica de potência, armazenamento energético e estratégias de controlo adequadas aos diferentes modos de funcionamento do elevador.

1.3.2 Objetivos Específicos

De forma a concretizar o objetivo geral anteriormente definido, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Estudar o funcionamento energético dos sistemas de elevação e identificar os principais cenários de motorização e regeneração de energia;
- Analisar as tecnologias atualmente utilizadas em sistemas de acionamento regenerativo para elevadores, incluindo conversores eletrônicos de potência, máquinas elétricas e sistemas de armazenamento de energia;
- Desenvolver uma arquitetura de conversão energética capaz de suportar o fluxo bidirecional de potência entre a rede elétrica, o sistema de acionamento e o armazenamento energético;
- Modelar os principais subsistemas envolvidos na arquitetura proposta, incluindo a interface com a rede elétrica, o sistema de acionamento, o sistema de armazenamento e os mecanismos de proteção associados;
- Desenvolver e implementar estratégias de controlo adequadas aos diferentes subsistemas modelados;
- Validar o desempenho dos modelos desenvolvidos através de simulação, avaliando o seu comportamento em diferentes cenários de funcionamento;
- Desenvolver uma metodologia de dimensionamento do sistema de armazenamento energético para suporte à operação de emergência;
- Definir uma estratégia conceptual de gestão energética capaz de coordenar os diferentes modos de funcionamento do sistema.

1.4 Metodologia de Desenvolvimento

O desenvolvimento do trabalho foi realizado de forma faseada, procurando garantir uma evolução progressiva desde o estudo conceptual até à validação dos principais subsistemas da arquitetura proposta.

Numa primeira fase foi efetuada uma revisão bibliográfica abrangente, incidindo sobre sistemas de elevação, acionamentos regenerativos, eletrónica de potência, máquinas elétricas e tecnologias de armazenamento de energia. Esta análise permitiu identificar as soluções tecnológicas mais relevantes, compreender as suas vantagens e limitações e estabelecer os requisitos funcionais da arquitetura a desenvolver.

Com base nos resultados obtidos durante a revisão da literatura, foi definida uma arquitetura global para o sistema de acionamento, contemplando os diferentes blocos necessários à regeneração de energia, ao armazenamento energético e à operação de emergência.

Posteriormente, foram desenvolvidos modelos de simulação representativos dos diferentes subsistemas constituintes da arquitetura. A modelação foi realizada recorrendo ao ambiente MATLAB/Simulink, permitindo reproduzir o comportamento elétrico, mecânico e energético dos principais elementos do sistema.

Após a implementação dos modelos, foram desenvolvidas e ajustadas as respetivas estratégias de controlo, assegurando o correto funcionamento dos diferentes subsistemas nos modos de operação considerados. Por fim, procedeu-se à validação individual dos modelos desenvolvidos através da realização de diferentes ensaios de simulação, analisando o comportamento dinâmico dos sistemas e verificando o cumprimento dos objetivos inicialmente definidos.

1.5 Contributos da Dissertação

A presente dissertação pretende contribuir para o estudo e desenvolvimento de sistemas de acionamento regenerativo aplicados a elevadores, combinando conceitos de eletrónica de potência, máquinas elétricas, armazenamento de energia e sistemas de controlo. A abordagem adotada permitiu analisar de forma integrada os principais desafios associados à recuperação de energia, à gestão dos fluxos energéticos e à operação em situações de emergência.

No âmbito do trabalho desenvolvido, foram identificados e estudados os principais subsistemas necessários à implementação de uma arquitetura de acionamento regenerativo para elevadores, sendo posteriormente desenvolvidos modelos representativos dos elementos considerados mais relevantes para o funcionamento do sistema.

Entre os principais contributos obtidos destacam-se:

- Definição de uma arquitetura de acionamento regenerativo com capacidade de interação bidirecional entre a rede elétrica, o sistema de acionamento e o armazenamento energético;
- Desenvolvimento de modelos de simulação para os principais subsistemas envolvidos na conversão e gestão de energia;

- Implementação de estratégias de controlo adequadas aos diferentes sistemas de conversão de energia considerados;
- Desenvolvimento de mecanismos de proteção destinados a garantir a operação segura do barramento DC em condições anormais de funcionamento;
- Desenvolvimento de uma metodologia de dimensionamento do sistema de armazenamento energético para suporte à operação de emergência;
- Definição de uma estratégia conceptual de gestão energética capaz de coordenar os diferentes modos de funcionamento previstos para o sistema.

Os resultados obtidos permitiram demonstrar a viabilidade das soluções estudadas e constituem uma base sólida para futuros desenvolvimentos na área dos acionamentos regenerativos aplicados a sistemas de elevação.

1.6 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos principais.

O Capítulo 1 apresenta o enquadramento geral do trabalho, a motivação associada ao tema, os objetivos definidos e a metodologia adotada para o desenvolvimento da dissertação.

O Capítulo 2 apresenta o estado da arte e o enquadramento técnico das principais tecnologias relacionadas com o problema em estudo. São abordados os sistemas de elevação, os princípios da travagem regenerativa, os conversores eletrónicos de potência, as máquinas elétricas utilizadas em acionamentos modernos, os sistemas de armazenamento de energia e as estratégias de gestão energética encontradas na literatura.

O Capítulo 3 descreve o desenvolvimento da solução proposta. Neste capítulo são apresentados os modelos desenvolvidos, a arquitetura global do sistema, os diferentes subsistemas considerados, as respetivas estratégias de controlo e a metodologia utilizada para o dimensionamento do armazenamento energético.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos através da validação por simulação dos diferentes subsistemas desenvolvidos. São analisados os principais indicadores de desempenho e discutido o comportamento dos modelos nos cenários considerados.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões da dissertação, sintetizando os principais resultados alcançados, as limitações identificadas e as possíveis linhas de desenvolvimento futuro.

Capítulo 2

Estado de Arte

2.1 Sistemas de Elevação e Regeneração de Energia

Os sistemas de elevação desempenham um papel fundamental na mobilidade vertical de edifícios residenciais, comerciais e industriais, constituindo atualmente uma infraestrutura indispensável em ambientes urbanos modernos. O crescimento da construção em altura e o aumento da densidade populacional nas cidades conduziram a uma utilização cada vez mais intensiva destes sistemas, tornando o seu desempenho energético um fator relevante na eficiência global dos edifícios [1], [2].

Entre as diferentes tecnologias existentes, os elevadores de tração destacam-se como a solução predominante em edifícios de média e grande altura devido à sua elevada eficiência, fiabilidade e capacidade de operação em múltiplos pisos [1], [2]. Este tipo de sistema é geralmente constituído por uma cabina, um contrapeso, uma máquina elétrica de tração, um sistema mecânico de transmissão e um sistema de controlo responsável pela coordenação do funcionamento global da instalação.

O princípio de funcionamento baseia-se no equilíbrio parcial entre a cabina e o contrapeso. Durante a operação, a máquina elétrica fornece ou absorve potência mecânica consoante as condições de carga e o sentido de deslocação da cabina. Como consequência, o fluxo energético associado ao sistema varia significativamente ao longo dos diferentes ciclos de funcionamento.

Quando a cabina transporta uma carga superior à compensada pelo contrapeso durante a subida, ou quando desce com uma carga reduzida, a máquina elétrica opera em modo motor, convertendo energia elétrica em energia mecânica para produzir o movimento desejado. Por outro lado, quando a cabina desce com uma carga elevada ou sobe com uma carga reduzida relativamente ao contrapeso, a energia potencial gravitacional disponível pode ser convertida em energia elétrica, conduzindo ao funcionamento da máquina em regime gerador [3], [4].

Esta capacidade de funcionamento nos modos motor e gerador constitui uma das características mais relevantes dos sistemas de elevação modernos. Em determinadas condições de operação, uma parcela significativa da energia utilizada durante as fases de aceleração e deslocação pode ser parcialmente recuperada durante as fases de travagem ou em situações favoráveis de desequilíbrio de massas entre a cabina e o contrapeso [3], [4], [5].

Historicamente, a energia produzida durante o funcionamento regenerativo era dissipada sob a forma de calor através de resistências de travagem instaladas no sistema de acionamento. Embora esta solução apresente simplicidade de implementação e elevada robustez, conduz ao desperdício de energia potencialmente reutilizável, reduzindo a eficiência energética global da instalação [3], [4].

Com a evolução da eletrónica de potência e das técnicas de controlo, surgiram arquiteturas capazes de recuperar e reutilizar essa energia de forma mais eficiente. Dependendo da solução adotada, a energia regenerada pode ser devolvida à rede elétrica, armazenada localmente ou utilizada para alimentar outros equipamentos ligados ao mesmo sistema energético [6], [7], [8].

Diversos estudos demonstram que a implementação de estratégias de recuperação de energia pode contribuir significativamente para a redução do consumo energético dos sistemas de elevação. A crescente preocupação com a eficiência energética dos edifícios, associada à necessidade de reduzir custos de exploração e impactos ambientais, tem impulsionado o desenvolvimento de soluções regenerativas cada vez mais avançadas [2], [3], [5].

Para além dos benefícios energéticos, a recuperação da energia regenerada pode desempenhar um papel importante em aplicações que integram sistemas de armazenamento de energia. Nestes casos, a energia recuperada pode ser utilizada posteriormente para auxiliar o funcionamento do elevador, reduzir a potência solicitada à rede elétrica ou suportar operações de emergência em situações de falha de alimentação [8], [9], [10], [11].

Assim, a regeneração de energia constitui atualmente um dos principais vetores de evolução tecnológica dos sistemas de elevação, representando uma oportunidade relevante para aumentar a eficiência energética, melhorar a sustentabilidade das instalações e reforçar a sua capacidade de operação em diferentes cenários de funcionamento [5], [7], [12].

2.2 Arquiteturas Energéticas Baseadas em Barramento DC

A crescente integração de sistemas de conversão eletrónica de potência em aplicações industriais, de mobilidade elétrica e de energias renováveis conduziu ao aparecimento de arquiteturas energéticas baseadas em barramentos de corrente contínua (DC). Estas arquiteturas permitem interligar diferentes fontes, cargas e sistemas de armazenamento através de um elo energético comum, simplificando a gestão dos fluxos de potência e aumentando a flexibilidade global do sistema [13], [14], [15].

Num sistema baseado em barramento DC, os diferentes subsistemas encontram-se eletricamente ligados a um mesmo nível de tensão contínua, permitindo a transferência de energia entre múltiplos elementos sem necessidade de conversões intermédias adicionais. Esta característica torna o barramento DC particularmente atrativo em aplicações onde coexistem conversores AC-DC, DC-AC e DC-DC, bem como sistemas de armazenamento energético [13], [14], [15].

A utilização de um barramento DC apresenta diversas vantagens relativamente a arquiteturas convencionais baseadas exclusivamente em corrente alternada. Entre os principais benefícios destacam-se a redução do número de etapas de conversão de energia, a facilidade de integração de

fontes renováveis e sistemas de armazenamento, a possibilidade de operação bidirecional e a maior flexibilidade na gestão dos fluxos energéticos [13], [14], [16].

Em sistemas regenerativos, o barramento DC desempenha um papel particularmente importante, funcionando como elemento de ligação entre a máquina elétrica, a rede elétrica e o sistema de armazenamento de energia. Quando ocorre regeneração, a energia produzida pela máquina pode ser transferida para o barramento DC, sendo posteriormente encaminhada para diferentes destinos consoante a estratégia de gestão adotada. Esta energia pode ser devolvida à rede elétrica, armazenada localmente ou dissipada através de mecanismos de proteção quando não existirem condições adequadas para a sua utilização [3], [8], [11].

Outra vantagem relevante destas arquiteturas reside no desacoplamento funcional entre os diferentes subsistemas. Cada conversor pode ser controlado de forma relativamente independente, desde que sejam respeitadas as condições de operação do barramento DC. Esta abordagem simplifica o desenvolvimento das estratégias de controlo e facilita a implementação de arquiteturas modulares, permitindo a substituição ou expansão de subsistemas sem alterações significativas na estrutura global do sistema [14], [15].

O desenvolvimento recente de veículos elétricos, sistemas de armazenamento distribuído, micro-redes e aplicações industriais de elevada eficiência tem contribuído para a crescente adoção de barramentos DC como elemento central de integração energética. De forma semelhante, os sistemas de elevação modernos têm vindo a beneficiar das vantagens proporcionadas por estas arquiteturas, particularmente quando se pretende implementar funções de regeneração de energia e alimentação de emergência [11], [15], [16].

Neste contexto, as arquiteturas baseadas em barramento DC constituem atualmente uma solução amplamente utilizada em sistemas de conversão de energia avançados, fornecendo uma plataforma adequada para a integração coordenada dos diferentes conversores eletrónicos de potência e sistemas de armazenamento necessários à implementação de elevadores regenerativos.

2.3 Conversores Eletrónicos de Potência

Os conversores eletrónicos de potência constituem um dos elementos fundamentais dos sistemas modernos de conversão e gestão de energia. A sua principal função consiste na adaptação dos níveis de tensão, corrente, frequência e potência entre diferentes subsistemas elétricos, permitindo a transferência controlada de energia entre fontes, cargas e sistemas de armazenamento.

Nos sistemas de elevação regenerativos, os conversores eletrónicos assumem um papel particularmente relevante, uma vez que são responsáveis pela interface com a rede elétrica, pelo acionamento da máquina elétrica e pela ligação aos sistemas de armazenamento energético. O desempenho destes equipamentos influencia diretamente a eficiência energética global, a qualidade da energia, a capacidade de regeneração e a flexibilidade operacional do sistema [3], [11].

Dependendo da natureza da conversão realizada, os conversores podem ser classificados em conversores AC-DC, DC-AC, DC-DC e AC-AC. Entre estas categorias, os conversores AC-DC,

DC-AC e DC-DC apresentam particular interesse para sistemas de elevação regenerativos, sendo por isso analisados nas secções seguintes.

2.3.1 Conversores AC-DC para Interface com a Rede

A interface entre a rede elétrica e o barramento DC pode ser implementada recorrendo a diferentes tecnologias de conversão AC-DC. A escolha da solução mais adequada depende dos requisitos de potência, eficiência, qualidade da energia e capacidade de regeneração pretendidos.

Historicamente, os retificadores não controlados baseados em díodos constituíram a solução mais utilizada em aplicações industriais devido à sua simplicidade, robustez e reduzido custo de implementação. Estes conversores apresentam elevadas eficiências de conversão e uma reduzida complexidade de controlo, uma vez que o processo de retificação ocorre naturalmente através da condução dos semicondutores.

Contudo, os retificadores a díodos apresentam limitações significativas em aplicações regenerativas. A energia apenas pode fluir da rede para o barramento DC, impossibilitando a devolução de potência à rede elétrica durante o funcionamento gerador da máquina elétrica. Adicionalmente, estes conversores apresentam elevado conteúdo harmónico e reduzida capacidade de controlo do fator de potência [17].

Como evolução dos retificadores não controlados surgiram os retificadores controlados baseados em tirístores. Estes dispositivos permitem regular a tensão média de saída através da variação do ângulo de disparo dos semicondutores, proporcionando maior flexibilidade operacional. Apesar desta vantagem, continuam a apresentar limitações associadas à qualidade da energia elétrica, nomeadamente elevados níveis de distorção harmónica e degradação do fator de potência [17].

Com o desenvolvimento da eletrónica de potência baseada em dispositivos totalmente controláveis, como IGBTs e MOSFETs, surgiram os conversores bidirecionais de fonte de tensão (Voltage Source Converters – VSC). Estas soluções permitem o controlo independente das potências ativa e reativa, a regulação da tensão do barramento DC, a melhoria do fator de potência e a transferência bidirecional de energia entre a rede elétrica e o sistema [18], [19], [20].

Estas características tornam os VSC particularmente adequados para aplicações regenerativas, permitindo recuperar a energia produzida durante o funcionamento gerador da máquina elétrica e devolvê-la à rede quando necessário. Adicionalmente, possibilitam a implementação de estratégias avançadas de controlo orientadas para a qualidade da energia e para a gestão eficiente dos fluxos energéticos [18], [19].

Tabela 2.1: Comparação entre tecnologias de conversão AC-DC

Característica	Díodos	Tirístores	VSC Bidirecional
Fluxo bidirecional de potência	Não	Limitado	Sim
Recuperação de energia	Não	Parcial	Sim
Fator de potência	Médio	Reduzido	Elevado
Harmônicos	Elevados	Elevados	Reduzidos
Complexidade de controlo	Baixa	Média	Elevada
Aplicações regenerativas	Não adequado	Limitado	Adequado

A informação apresentada na Tabela 2.1 foi elaborada com base na análise comparativa das tecnologias descritas em [17], [18], [19].

Da análise efetuada verifica-se que os conversores bidirecionais apresentam vantagens significativas em aplicações onde a recuperação de energia e a qualidade da energia elétrica constituem requisitos relevantes.

2.3.2 Conversores DC-AC para Acionamentos Elétricos

Os conversores DC-AC são responsáveis pela alimentação da máquina elétrica a partir do barramento DC. A sua função consiste em sintetizar tensões trifásicas controladas que permitam regular a velocidade, o binário e a dinâmica do sistema de acionamento.

Entre as diferentes topologias disponíveis destacam-se os inversores fonte de tensão (Voltage Source Inverter – VSI), os inversores fonte de corrente (Current Source Inverter – CSI) e os inversores multinível.

Os VSI constituem atualmente a solução mais utilizada em aplicações industriais e de mobilidade elétrica devido à sua simplicidade estrutural, elevada eficiência e compatibilidade com técnicas modernas de modulação PWM e controlo vetorial. A sua estrutura típica é composta por três braços de potência e seis dispositivos semicondutores controláveis, permitindo a geração de sistemas trifásicos equilibrados a partir de uma fonte DC [21], [22].

Os CSI utilizam uma fonte de corrente como elemento principal de alimentação, apresentando algumas vantagens em aplicações específicas de elevada potência. No entanto, a necessidade de indutâncias de grande dimensão e a menor flexibilidade de controlo têm conduzido a uma utilização menos frequente em acionamentos modernos [23].

Os inversores multinível representam uma evolução das topologias convencionais, permitindo produzir formas de onda mais próximas de uma sinusóide ideal através da utilização de múltiplos níveis de tensão. Entre as suas principais vantagens destacam-se a redução do conteúdo harmónico, menores gradientes de tensão e menor esforço elétrico sobre os dispositivos semicondutores. Contudo, estas soluções apresentam maior complexidade de implementação, maior número de componentes e custos superiores [24], [25].

Tabela 2.2: Comparação entre tecnologias de conversão DC-AC

Característica	VSI	CSI	Multinível
Complexidade	Baixa	Média	Elevada
Qualidade da tensão	Boa	Média	Muito elevada
Número de semicondutores	Reduzido	Reduzido	Elevado
Custo	Baixo	Médio	Elevado
Aplicações industriais	Muito comum	Pouco comum	Potência elevada
Compatibilidade com controlo vetorial	Elevada	Média	Elevada

A informação apresentada na Tabela 2.2 foi elaborada com base na análise comparativa das diferentes topologias descritas em [21], [22], [24], [25].

A evolução dos sistemas de acionamento elétrico tem conduzido a uma utilização crescente dos VSI em aplicações de velocidade variável, particularmente quando se pretende combinar elevado desempenho dinâmico, simplicidade de implementação e elevada eficiência energética.

2.3.3 Conversores DC-DC Bidirecionais

Os conversores DC-DC desempenham um papel fundamental em sistemas que integram armazenamento energético, permitindo adaptar diferentes níveis de tensão contínua e controlar o fluxo de potência entre o barramento DC principal e os dispositivos de armazenamento. Em aplicações regenerativas, estes conversores assumem particular importância, uma vez que são responsáveis pelos processos de carga e descarga do sistema de armazenamento, influenciando diretamente a eficiência energética e a flexibilidade operacional da instalação [8], [16], [26].

As topologias DC-DC podem ser classificadas em conversores não isolados e conversores isolados, dependendo da existência ou não de isolamento galvânico entre os dois lados da conversão.

Entre os conversores não isolados mais utilizados destacam-se as topologias Buck, Boost e Buck-Boost. O conversor Buck permite reduzir o nível de tensão de saída relativamente à tensão de entrada, enquanto o conversor Boost realiza a função oposta, elevando a tensão disponível. Já o conversor Buck-Boost combina ambas as funcionalidades, possibilitando simultaneamente operações de redução e elevação da tensão [16], [26].

Apesar da sua simplicidade e elevada eficiência, estas topologias apresentam limitações em aplicações de média e elevada potência que exijam isolamento galvânico, elevados rácios de conversão ou transferência bidirecional de energia. Por este motivo, são frequentemente utilizadas em aplicações de menor potência ou em sistemas onde o isolamento elétrico não constitui um requisito fundamental [16], [26].

Com o crescimento das aplicações associadas ao armazenamento energético e à mobilidade elétrica, surgiram diversas topologias bidirecionais capazes de controlar o fluxo de potência em ambos os sentidos. Entre estas destacam-se os conversores Buck-Boost bidirecionais, os conversores Half-Bridge, os conversores Full-Bridge e os conversores Dual Active Bridge (DAB).

Os conversores Buck-Boost bidirecionais apresentam uma estrutura relativamente simples e permitem controlar os processos de carga e descarga do armazenamento através da utilização de

semicondutores controláveis. Contudo, quando aplicados a níveis de potência mais elevados, podem apresentar limitações associadas às correntes circulantes, aos esforços elétricos dos componentes e à ausência de isolamento galvânico [16], [26].

Os conversores Full-Bridge bidirecionais representam uma evolução destas soluções, permitindo operar com níveis de potência superiores e oferecendo maior flexibilidade de controlo. No entanto, a necessidade de transformadores adicionais para obtenção de isolamento aumenta a complexidade global do sistema [27], [28].

Entre as topologias isoladas, o Dual Active Bridge (DAB) tem recebido particular atenção por parte da comunidade científica e industrial devido à sua elevada eficiência, capacidade de operação bidirecional e facilidade de integração com sistemas de armazenamento energético [28], [29], [30]. Esta topologia utiliza duas pontes ativas ligadas através de um transformador de alta frequência, permitindo simultaneamente a transferência bidirecional de potência, o isolamento galvânico e a adaptação dos níveis de tensão entre os dois lados do conversor.

Outra vantagem relevante dos conversores DAB reside na possibilidade de controlar a potência transferida através do desfasamento entre as tensões geradas pelas duas pontes ativas. Esta característica simplifica a implementação de estratégias de controlo e permite obter elevados níveis de eficiência numa ampla gama de condições de funcionamento [28], [30].

Tabela 2.3: Comparação entre diferentes topologias DC-DC

Característica	Buck-Boost	Half-Bridge	Full-Bridge	DAB
Bidirecionalidade	Sim	Sim	Sim	Sim
Isolamento galvânico	Não	Possível	Possível	Sim
Complexidade	Baixa	Média	Média/Alta	Alta
Potência típica	Baixa/Média	Média	Média/Alta	Média/Alta
Eficiência	Elevada	Elevada	Elevada	Muito elevada
Adequação a armazenamento energético	Boa	Boa	Muito boa	Excelente

A informação apresentada na Tabela 2.3 foi elaborada com base na análise comparativa das diferentes topologias descritas em [16], [26], [28], [30].

Da análise efetuada verifica-se que a escolha da topologia DC-DC depende fortemente dos requisitos da aplicação, nomeadamente dos níveis de potência envolvidos, da necessidade de isolamento galvânico, dos rácios de conversão pretendidos e da estratégia de gestão energética adotada. Em sistemas regenerativos com armazenamento energético, as topologias bidirecionais isoladas apresentam frequentemente vantagens significativas devido à sua flexibilidade e capacidade de integração.

2.3.4 Dispositivos Semicondutores de Potência

O desenvolvimento dos conversores eletrónicos de potência encontra-se diretamente associado à evolução dos dispositivos semicondutores utilizados na sua implementação. Estes componentes são

responsáveis pela comutação controlada da energia elétrica e influenciam diretamente a eficiência, a frequência de operação, a densidade de potência e a fiabilidade dos sistemas de conversão [16], [25].

Entre os dispositivos mais utilizados destacam-se os díodos de potência, os MOSFETs, os IGBTs e, mais recentemente, os semicondutores de banda larga (Wide Bandgap), nomeadamente os dispositivos baseados em carboneto de silício (SiC).

Os díodos de potência constituem os dispositivos mais simples, permitindo apenas a condução de corrente num único sentido. Apesar da sua simplicidade, continuam a desempenhar um papel fundamental em inúmeras topologias de conversão de energia, sendo frequentemente utilizados em conjunto com dispositivos controláveis [25].

Os MOSFETs caracterizam-se pela elevada velocidade de comutação, reduzidas perdas dinâmicas e facilidade de controlo. Estas características tornam-nos particularmente adequados para aplicações de baixa e média potência que operam a frequências elevadas. No entanto, o aumento da tensão de bloqueio conduz normalmente ao aumento das perdas por condução, limitando a sua utilização em aplicações de potência muito elevada [17], [25].

Os IGBTs combinam características dos MOSFETs e dos transístores bipolares, permitindo suportar tensões e correntes mais elevadas com perdas reduzidas em aplicações de média e elevada potência. Como consequência, tornaram-se durante muitos anos a tecnologia dominante em acionamentos industriais, sistemas ferroviários, energias renováveis e conversores de elevada potência [17], [25].

Mais recentemente, os dispositivos baseados em carboneto de silício (SiC) têm vindo a ganhar relevância devido à sua capacidade para operar a tensões mais elevadas, frequências superiores e temperaturas mais elevadas, mantendo simultaneamente elevados níveis de eficiência. Apesar do seu custo ainda superior relativamente às tecnologias convencionais, a sua utilização tem aumentado progressivamente em aplicações onde a eficiência energética e a densidade de potência constituem requisitos prioritários [18], [19].

Tabela 2.4: Comparação entre dispositivos semicondutores de potência

Tecnologia	Tensão típica	Frequência de operação	de Eficiência	Aplicações típicas
Díodo	Média/Alta	–	Elevada	Retificação
MOSFET	Baixa/Média	Muito elevada	Elevada	Conversores de alta frequência
IGBT	Média/Alta	Média	Elevada	Acionamentos industriais
SiC MOSFET	Elevada	Elevada	Muito elevada	Aplicações avançadas

A informação apresentada na Tabela 2.4 foi elaborada com base na análise comparativa dos diferentes dispositivos descritos em [17], [18], [19], [25].

A evolução contínua dos dispositivos semicondutores tem contribuído para o aumento da eficiência e da fiabilidade dos sistemas de conversão de energia, possibilitando o desenvolvimento de arquiteturas cada vez mais compactas, eficientes e adequadas às exigências das aplicações modernas.

2.4 Máquinas Elétricas para Sistemas de Elevação

A máquina elétrica constitui um dos elementos centrais dos sistemas de elevação, sendo responsável pela conversão entre energia elétrica e energia mecânica durante os processos de motorização e regeneração. Ao longo das últimas décadas, a evolução dos acionamentos elétricos e da eletrônica de potência permitiu a utilização de diferentes tecnologias de máquinas elétricas, cada uma apresentando características específicas em termos de eficiência, densidade de potência, custo, manutenção e complexidade de controlo.

A seleção da máquina elétrica influencia diretamente o desempenho energético do sistema de elevação, bem como a sua capacidade de operação regenerativa, eficiência global e requisitos de manutenção. Por este motivo, torna-se relevante analisar as principais tecnologias utilizadas ou consideradas para este tipo de aplicação.

2.4.1 Motores de Corrente Contínua

Os motores de corrente contínua (DC) desempenharam durante muitos anos um papel importante nos sistemas de acionamento de velocidade variável devido à sua facilidade de controlo e à sua capacidade de produzir elevado binário numa ampla gama de velocidades.

Uma das principais vantagens desta tecnologia reside na possibilidade de controlar a velocidade através da regulação da tensão aplicada à armadura e da corrente de excitação, permitindo uma implementação relativamente simples das estratégias de controlo quando comparada com as soluções disponíveis na época [21], [25].

No entanto, a presença de escovas e do comutador mecânico conduz a necessidades frequentes de manutenção e a fenómenos de desgaste que afetam a fiabilidade e a vida útil do sistema. Adicionalmente, a evolução dos conversores eletrónicos de potência permitiu o desenvolvimento de soluções baseadas em máquinas de corrente alternada capazes de oferecer desempenhos equivalentes ou superiores com menores necessidades de manutenção [21], [22], [25].

Como consequência, os motores DC foram progressivamente substituídos por tecnologias baseadas em máquinas de corrente alternada, encontrando atualmente uma utilização bastante reduzida em sistemas de elevação modernos.

2.4.2 Motores de Indução

Os motores de indução (Induction Motors – IM) constituem uma das tecnologias mais utilizadas na indústria devido à sua robustez, simplicidade construtiva e reduzidas necessidades de manutenção.

A ausência de contactos elétricos no rotor contribui para uma elevada fiabilidade operacional e para custos de exploração relativamente reduzidos [31], [32].

Durante muitos anos, os motores de indução representaram a solução dominante nos sistemas de elevação equipados com acionamentos de velocidade variável. O desenvolvimento dos inversores eletrónicos e das técnicas de controlo vetorial permitiu melhorar significativamente o desempenho destas máquinas, tornando possível obter respostas dinâmicas adequadas para aplicações de transporte vertical [2], [21].

Entre as principais vantagens dos motores de indução destacam-se a robustez mecânica, a elevada maturidade tecnológica, o custo relativamente reduzido e a ampla disponibilidade comercial. Estas características justificam a sua utilização generalizada em aplicações industriais de média e elevada potência [31], [32].

Contudo, os motores de indução apresentam algumas limitações quando comparados com tecnologias mais recentes. As perdas associadas ao rotor, a menor densidade de potência e a eficiência geralmente inferior constituem fatores que podem penalizar o desempenho energético global do sistema, especialmente em aplicações onde a eficiência energética assume particular relevância [2], [32], [33].

Apesar destas limitações, os motores de indução continuam a representar uma solução tecnicamente válida e amplamente utilizada em diversas aplicações de acionamento elétrico.

2.4.3 Máquinas Síncronas de Ímanes Permanentes

As máquinas síncronas de ímanes permanentes (Permanent Magnet Synchronous Machines – PMSM) têm vindo a ganhar uma importância crescente em aplicações de elevado desempenho devido à sua elevada eficiência, elevada densidade de potência e excelentes características dinâmicas [2], [33], [34].

Ao contrário dos motores de indução, as PMSM utilizam ímanes permanentes para gerar o campo magnético do rotor, eliminando as perdas associadas à magnetização rotórica. Como consequência, estas máquinas apresentam normalmente rendimentos superiores e menores perdas globais, contribuindo para uma utilização mais eficiente da energia elétrica disponível [2], [32], [33].

Outra vantagem relevante reside na elevada densidade de potência, permitindo obter níveis elevados de binário e potência para dimensões reduzidas. Esta característica é particularmente interessante em aplicações onde as restrições de espaço e peso constituem fatores importantes, como acontece frequentemente nos sistemas de elevação modernos [33], [34].

A combinação entre PMSM e técnicas avançadas de controlo vetorial permite ainda obter respostas dinâmicas rápidas, elevada precisão de controlo da velocidade e excelentes capacidades de operação regenerativa. Estas características têm conduzido a uma adoção crescente desta tecnologia em veículos elétricos, sistemas industriais de elevada eficiência e elevadores modernos [2], [33], [34].

Como principal limitação destaca-se o custo associado aos materiais magnéticos utilizados nos ímanes permanentes, bem como a dependência de matérias-primas específicas cuja disponibilidade pode variar ao longo do tempo [31], [32].

2.4.4 Outras Tecnologias Emergentes

Para além dos motores de indução e das PMSM, têm sido desenvolvidas e investigadas outras tecnologias com potencial interesse para aplicações de acionamento elétrico.

Entre estas destacam-se as máquinas síncronas de relutância (SynRM) e as máquinas de relutância comutada (Switched Reluctance Machines – SRM). Estas soluções apresentam vantagens associadas à simplicidade do rotor, à redução ou eliminação da utilização de ímanes permanentes e ao potencial para atingir elevados níveis de eficiência [35].

Apesar do interesse crescente demonstrado pela comunidade científica e industrial, a sua utilização em sistemas de elevação continua significativamente menos difundida do que as tecnologias baseadas em motores de indução e PMSM. Como consequência, a experiência industrial acumulada, a disponibilidade comercial e a maturidade tecnológica destas soluções permanecem inferiores às das tecnologias atualmente dominantes [35].

2.4.5 Comparação das Tecnologias

A seleção da máquina elétrica mais adequada depende dos requisitos específicos da aplicação, incluindo critérios de eficiência energética, densidade de potência, custo, robustez e facilidade de controlo.

Tabela 2.5: Comparação entre diferentes tecnologias de máquinas elétricas

Característica	Motor DC	IM	PMSM	SynRM
Eficiência	Média	Boa	Muito elevada	Elevada
Densidade de potência	Média	Média	Elevada	Elevada
Manutenção	Elevada	Reduzida	Reduzida	Reduzida
Complexidade de controlo	Baixa	Média	Elevada	Média
Custo	Médio	Reduzido	Elevado	Médio
Maturidade industrial	Elevada	Muito elevada	Elevada	Média
Aplicação em elevadores modernos	Reduzida	Elevada	Muito elevada	Limitada

A informação apresentada na Tabela 2.5 foi elaborada com base na análise comparativa das diferentes tecnologias descritas em [21], [32], [33], [34], [35].

Da análise realizada verifica-se que os motores de indução e as máquinas síncronas de ímanes permanentes constituem atualmente as tecnologias mais relevantes para sistemas de elevação modernos. Enquanto os motores de indução continuam a destacar-se pela sua robustez e reduzido custo, as PMSM apresentam vantagens significativas ao nível da eficiência energética, densidade

de potência e desempenho dinâmico, fatores que têm contribuído para a sua crescente adoção em aplicações onde a eficiência e o desempenho constituem requisitos prioritários.

2.5 Sistemas de Armazenamento de Energia

A integração de sistemas de armazenamento de energia tem assumido uma importância crescente em aplicações industriais, sistemas de transporte, energias renováveis e mobilidade elétrica. Nos sistemas de elevação regenerativos, o armazenamento energético permite aumentar o aproveitamento da energia recuperada durante o funcionamento gerador da máquina elétrica, reduzir a dependência da rede elétrica e suportar operações de emergência em situações de falha de alimentação [8], [10], [36].

A escolha da tecnologia de armazenamento mais adequada depende de diversos fatores, incluindo a capacidade energética requerida, a potência necessária, o número de ciclos de carga e descarga, o tempo de resposta, os custos de investimento e os requisitos de manutenção. Entre as soluções mais utilizadas destacam-se as baterias eletroquímicas, os supercondensadores e os sistemas híbridos que combinam diferentes tecnologias de armazenamento [10], [37], [38].

2.5.1 Baterias

As baterias constituem atualmente uma das tecnologias de armazenamento energético mais difundidas, sendo utilizadas numa ampla variedade de aplicações devido à sua capacidade de armazenar quantidades significativas de energia durante períodos prolongados.

Ao longo das últimas décadas foram desenvolvidas diversas tecnologias de baterias, incluindo baterias de chumbo-ácido, níquel-hidreto metálico (NiMH) e íões de lítio (Li-ion). Entre estas, as baterias de íões de lítio têm assumido um papel predominante devido à sua elevada densidade energética, reduzido peso, elevada eficiência e reduzida taxa de autodescarga [37], [38].

Nos sistemas de elevação, as baterias podem ser utilizadas para armazenar energia regenerada e para fornecer energia durante falhas da alimentação elétrica, permitindo realizar operações de emergência e aumentar a autonomia do sistema. A sua elevada capacidade energética torna-as particularmente adequadas para aplicações que exigem fornecimento de energia durante períodos relativamente longos [10], [36].

Contudo, as baterias apresentam também algumas limitações. Os processos de carga e descarga frequentes podem contribuir para o envelhecimento dos materiais ativos, conduzindo à degradação gradual da capacidade disponível ao longo do tempo. Adicionalmente, a potência instantânea disponível é geralmente inferior à obtida com outras tecnologias de armazenamento especificamente concebidas para aplicações de elevada potência [37], [38].

Apesar destas limitações, as baterias continuam a representar uma das soluções mais atrativas quando o principal objetivo consiste no armazenamento de energia durante períodos prolongados.

2.5.2 Supercondensadores

Os supercondensadores, também designados por ultracondensadores, constituem uma tecnologia de armazenamento caracterizada pela elevada densidade de potência e pela capacidade de realizar um número extremamente elevado de ciclos de carga e descarga sem degradação significativa do desempenho [8], [36].

Ao contrário das baterias, que armazenam energia através de reações eletroquímicas, os supercondensadores armazenam energia sob a forma de campo elétrico. Como consequência, apresentam tempos de resposta muito reduzidos e elevada capacidade para absorver ou fornecer potência durante intervalos de tempo curtos [8].

Estas características tornam os supercondensadores particularmente adequados para aplicações regenerativas, onde a energia recuperada durante travagens ou desacelerações deve ser absorvida rapidamente. Diversos trabalhos publicados na literatura demonstram o potencial desta tecnologia para aumentar o aproveitamento da energia regenerada em sistemas de elevação, reduzir os picos de potência exigidos à rede elétrica e suportar operações de emergência após falhas de alimentação [8], [10], [36].

Outra vantagem importante reside na sua elevada vida útil, podendo suportar centenas de milhares ou mesmo milhões de ciclos de operação com reduzida degradação. Esta característica é particularmente interessante em elevadores, onde os ciclos de carga e descarga podem ocorrer frequentemente ao longo do dia [8], [36].

Contudo, os supercondensadores apresentam uma densidade energética significativamente inferior à das baterias. Como consequência, embora sejam extremamente eficazes para aplicações de elevada potência e curta duração, apresentam limitações quando se pretende armazenar energia durante longos períodos ou garantir autonomias elevadas [8], [38].

2.5.3 Sistemas Híbridos de Armazenamento

As características complementares das baterias e dos supercondensadores conduziram ao desenvolvimento de sistemas híbridos de armazenamento energético. Estas soluções procuram combinar a elevada densidade energética das baterias com a elevada densidade de potência dos supercondensadores, explorando simultaneamente as vantagens de ambas as tecnologias [37], [38].

Num sistema híbrido típico, os supercondensadores são responsáveis pela absorção e fornecimento dos picos instantâneos de potência, enquanto as baterias asseguram o armazenamento energético de maior duração. Esta divisão funcional permite reduzir os esforços elétricos impostos às baterias, contribuindo para aumentar a sua vida útil e melhorar o desempenho global do sistema [38].

Diversos estudos realizados em sistemas de elevação demonstram que a utilização de arquiteturas híbridas pode melhorar o aproveitamento da energia regenerada, reduzir os picos de potência exigidos à rede elétrica e aumentar a flexibilidade operacional do sistema [10], [36].

Apesar destas vantagens, a implementação de sistemas híbridos implica maior complexidade de controlo, necessidade de conversores adicionais e custos superiores relativamente às soluções baseadas numa única tecnologia de armazenamento [37], [38].

A decisão entre utilizar baterias, supercondensadores ou sistemas híbridos depende assim dos requisitos específicos da aplicação, incluindo a autonomia pretendida, os níveis de potência envolvidos, os custos admissíveis e os objetivos de operação definidos para o sistema.

Tabela 2.6: Comparação entre tecnologias de armazenamento energético

Característica	Bateria	Supercondensador
Densidade energética	Elevada	Reduzida
Densidade de potência	Média	Muito elevada
Tempo de resposta	Médio	Muito reduzido
Número de ciclos	Limitado	Muito elevado
Autonomia	Elevada	Reduzida
Aplicações típicas	Armazenamento prolongado	Picos de potência e regeneração
Custo por unidade de energia	Reduzido	Elevado

Da análise realizada verifica-se que baterias e supercondensadores apresentam características complementares. Enquanto as baterias se destacam pela sua elevada capacidade de armazenamento energético, os supercondensadores evidenciam vantagens significativas em aplicações de elevada potência e resposta rápida. Como consequência, a combinação destas tecnologias pode constituir uma solução particularmente interessante para sistemas regenerativos que necessitem simultaneamente de armazenamento energético e suporte a picos de potência.

2.6 Sistemas de Proteção do Barramento DC

Nos sistemas regenerativos baseados em barramento DC, a gestão adequada da energia assume um papel fundamental para garantir a segurança e a fiabilidade da operação. Embora o objetivo principal destas arquiteturas consista em aproveitar a energia regenerada através da sua devolução à rede elétrica ou armazenamento local, podem existir situações em que nenhuma destas opções se encontra disponível ou apresenta capacidade suficiente para absorver a energia produzida [8], [39].

Durante determinadas condições de funcionamento, nomeadamente desacelerações rápidas, travagens de emergência ou situações de regeneração intensa, a energia transferida para o barramento DC pode provocar um aumento significativo da tensão. Caso este fenómeno não seja controlado, poderão surgir sobretensões capazes de comprometer o funcionamento dos conversores eletrónicos de potência e dos restantes equipamentos ligados ao sistema [39].

Para prevenir estas situações são frequentemente utilizados mecanismos de proteção especificamente dedicados ao controlo da tensão do barramento DC. Entre as soluções mais comuns destacam-se as resistências de travagem associadas a sistemas eletrónicos de comutação, habitualmente designados por *Brake Chopper*.

O princípio de funcionamento destas soluções baseia-se na monitorização contínua da tensão do barramento DC. Quando a tensão ultrapassa um determinado valor limite, um semiconductor controlável é ativado, ligando uma resistência de potência ao barramento. A energia excedente é então dissipada sob a forma de calor, impedindo que a tensão continue a aumentar para níveis potencialmente perigosos [39].

Apesar de não contribuírem diretamente para a eficiência energética do sistema, os *Brake Choppers* desempenham uma função essencial ao nível da segurança e da proteção dos equipamentos. Em muitas aplicações industriais constituem um mecanismo de proteção complementar utilizado sempre que a energia regenerada não pode ser integralmente absorvida por outros subsistemas [39].

A escolha dos parâmetros de atuação destes sistemas depende das características da aplicação, dos limites admissíveis de tensão do barramento DC e da quantidade de energia regenerada que poderá ser produzida durante os diferentes cenários de funcionamento.

Desta forma, os sistemas de proteção do barramento DC constituem um elemento importante das arquiteturas regenerativas modernas, contribuindo para garantir a operação segura e fiável dos conversores eletrónicos de potência e dos sistemas de armazenamento associados.

2.7 Sistemas de Gestão de Energia

À medida que os sistemas energéticos se tornam mais complexos e passam a integrar múltiplas fontes, cargas e dispositivos de armazenamento, torna-se necessário implementar mecanismos capazes de coordenar os diferentes fluxos de energia existentes. Neste contexto surgem os Sistemas de Gestão de Energia (*Energy Management Systems – EMS*), responsáveis pela supervisão e coordenação do funcionamento global da arquitetura energética [40], [41].

Um EMS pode ser definido como um sistema de nível superior responsável pela monitorização do estado dos diferentes subsistemas e pela tomada de decisões relacionadas com a distribuição da energia disponível. O seu objetivo consiste em garantir que os recursos energéticos são utilizados da forma mais eficiente possível, respeitando simultaneamente os requisitos operacionais, de segurança e de disponibilidade definidos para a aplicação [40], [42].

Em sistemas de elevação regenerativos, o EMS desempenha um papel particularmente importante devido à coexistência de múltiplos caminhos possíveis para a energia. Dependendo das condições de funcionamento, a energia pode ser fornecida pela rede elétrica, proveniente do sistema de armazenamento ou resultar da regeneração produzida pela máquina elétrica. A gestão adequada destes fluxos energéticos influencia diretamente o desempenho global do sistema [41].

Para realizar esta função, os sistemas de gestão energética recorrem normalmente à monitorização de diversas variáveis, incluindo o estado de carga do armazenamento energético, a potência consumida ou regenerada pelo sistema de acionamento, a tensão do barramento DC, o estado da rede elétrica e outros parâmetros relevantes para a operação da instalação [40].

Com base nesta informação, o EMS pode executar diferentes ações de controlo, tais como autorizar processos de carga ou descarga do armazenamento, definir prioridades energéticas, limitar

determinadas operações ou selecionar diferentes modos de funcionamento consoante o estado global do sistema [40], [41].

Dependendo dos objetivos da aplicação, as estratégias de gestão energética podem privilegiar diferentes critérios. Algumas abordagens procuram maximizar o aproveitamento da energia regenerada, enquanto outras privilegiam a autonomia do armazenamento, a redução do consumo energético da rede elétrica ou a garantia de operação em situações de emergência [41], [42].

Nos últimos anos, o desenvolvimento de técnicas avançadas de controlo e otimização tem conduzido ao aparecimento de estratégias de gestão energética cada vez mais sofisticadas. No entanto, independentemente do grau de complexidade adotado, a função principal de um EMS permanece inalterada: coordenar os diferentes subsistemas energéticos de forma a maximizar o desempenho global da instalação [40], [42].

Desta forma, os sistemas de gestão energética constituem atualmente um elemento essencial em arquiteturas regenerativas modernas, permitindo explorar de forma eficiente as potencialidades oferecidas pelos conversores eletrónicos de potência e pelos sistemas de armazenamento de energia.

2.8 Síntese do Capítulo

Neste capítulo foram apresentadas e analisadas as principais tecnologias associadas aos sistemas de elevação regenerativos, incluindo arquiteturas baseadas em barramento DC, conversores eletrónicos de potência, máquinas elétricas, sistemas de armazenamento energético, mecanismos de proteção e estratégias de gestão de energia.

A revisão efetuada permitiu identificar as principais soluções atualmente utilizadas na literatura e na indústria, bem como as respetivas vantagens e limitações. Verificou-se que a crescente procura por sistemas mais eficientes e sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de arquiteturas capazes de recuperar energia regenerada, integrar armazenamento energético e coordenar de forma inteligente os diferentes fluxos de potência existentes.

Observou-se igualmente que a seleção das tecnologias mais adequadas depende fortemente dos requisitos específicos da aplicação, nomeadamente ao nível da eficiência energética, qualidade da energia, capacidade de armazenamento, desempenho dinâmico e operação em situações de emergência.

Com base nos conceitos e tecnologias apresentados ao longo deste capítulo, o capítulo seguinte descreve a arquitetura desenvolvida no âmbito desta dissertação, apresentando as soluções adotadas, os modelos implementados e as estratégias de controlo utilizadas para responder aos objetivos definidos.

Capítulo 3

Desenvolvimento da Arquitetura e Modelação do Sistema

3.1 Arquitetura Global do Sistema

Com base na análise das tecnologias apresentadas no Capítulo 2, foi desenvolvida uma arquitetura energética integrada para elevadores elétricos com capacidade de recuperação de energia regenerativa e alimentação autónoma em situações de emergência. A solução proposta combina diferentes subsistemas de eletrónica de potência através de um barramento DC comum, permitindo a gestão coordenada dos fluxos energéticos entre a rede elétrica, o acionamento do elevador, o sistema de armazenamento e os mecanismos de proteção.

A arquitetura desenvolvida é constituída por cinco subsistemas principais: o conversor *Active Front End* (AFE), o sistema de acionamento baseado numa Máquina Síncrona de Ímanes Permanentes (PMSM), o conversor DC/DC bidirecional *Dual Active Bridge* (DAB), o sistema de proteção por *Brake Chopper* e o Sistema de Gestão de Energia (*Energy Management System* – EMS). A interligação destes subsistemas é efetuada através de um barramento DC comum, responsável pela distribuição e transferência de energia entre os diferentes elementos da arquitetura.

A Figura 3.1 apresenta a arquitetura global proposta e a interligação energética entre os diversos subsistemas.

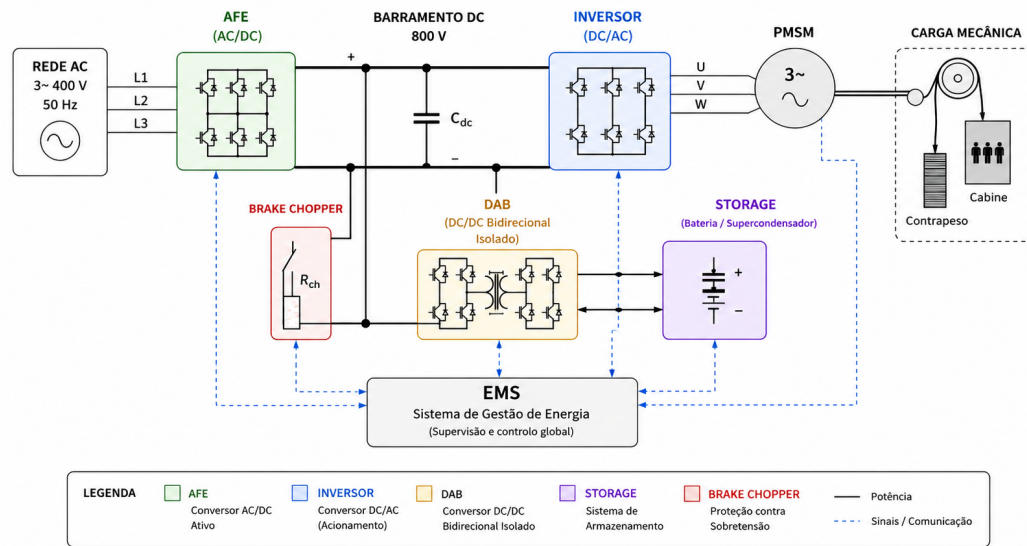


Figura 3.1: Arquitetura global do sistema desenvolvido.

A alimentação principal do sistema é fornecida por uma rede trifásica de baixa tensão. A interface entre a rede e o barramento DC é realizada através do conversor AFE, responsável pela transferência bidirecional de energia. Em condições de motorização, a energia flui da rede para o barramento DC e posteriormente para o sistema de acionamento. Em condições regenerativas, a energia gerada pelo elevador pode ser transferida para o sistema de armazenamento ou devolvida à rede elétrica, dependendo das condições de funcionamento do sistema.

O acionamento eletromecânico é realizado através de um inversor trifásico associado a uma PMSM. Este subsistema é responsável pela conversão da energia elétrica proveniente do barramento DC em energia mecânica necessária ao movimento da cabine. Durante o funcionamento regenerativo, o fluxo energético ocorre no sentido inverso, permitindo recuperar parte da energia disponível no sistema de elevação.

O sistema de armazenamento encontra-se ligado ao barramento principal através de um conversor DAB bidirecional, permitindo armazenar a energia recuperada durante os períodos regenerativos e disponibilizá-la posteriormente quando necessário. Este subsistema desempenha um papel particularmente relevante em situações de falha da alimentação principal, permitindo assegurar a operação de emergência do elevador.

A proteção contra sobretensões no barramento DC é assegurada por um *Brake Chopper*, cuja função consiste em dissipar energia excedente sempre que a tensão do barramento ultrapassa os limites admissíveis de funcionamento. Este subsistema atua como mecanismo de proteção complementar, garantindo a segurança dos equipamentos que integram a arquitetura.

A coordenação global do sistema é realizada pelo EMS, responsável pela supervisão dos diferentes subsistemas e pela seleção das estratégias energéticas mais adequadas para cada condição de operação. Para esse efeito, o EMS monitoriza continuamente o estado da rede elétrica, a

tensão do barramento DC, a potência associada ao acionamento e o estado de carga do sistema de armazenamento.

As secções seguintes apresentam em detalhe a modelação, implementação e parametrização de cada um dos subsistemas que constituem a arquitetura proposta.

3.2 Ambiente de Simulação

Todos os modelos desenvolvidos no âmbito desta dissertação foram implementados recorrendo ao software MATLAB/Simulink e à biblioteca Simscape Electrical. Esta plataforma permitiu modelar os diferentes subsistemas que constituem a arquitetura proposta, incluindo os conversores de potência, a máquina elétrica, o sistema de armazenamento de energia e as respetivas estratégias de controlo.

A utilização de um ambiente de simulação possibilitou a análise do comportamento dinâmico dos diferentes subsistemas em condições representativas de funcionamento, permitindo avaliar os fluxos energéticos, a resposta dos controladores e a interação entre os vários elementos da arquitetura.

Os modelos desenvolvidos foram implementados de forma modular, permitindo a validação individual de cada subsistema antes da sua integração na arquitetura global. Esta abordagem facilitou a análise do desempenho dos diferentes conversores de potência, do sistema de acionamento e das estratégias de gestão de energia propostas.

A validação realizada nesta dissertação teve como principal objetivo demonstrar a viabilidade funcional da arquitetura desenvolvida e das estratégias de controlo associadas. Deste modo, os resultados apresentados correspondem a ensaios efetuados em ambiente de simulação, constituindo uma etapa prévia a uma eventual implementação experimental futura.

As secções seguintes apresentam os modelos utilizados para representar o sistema de elevação e os diferentes subsistemas energéticos que integram a arquitetura proposta.

3.3 Modelo Mecânico do Elevador

De forma a permitir a validação da arquitetura proposta, foi definido um caso de estudo representativo de um elevador elétrico de passageiros utilizado em edifícios residenciais de média dimensão. Este caso de estudo foi utilizado para parametrizar os modelos desenvolvidos e para avaliar o desempenho energético dos diferentes subsistemas considerados ao longo desta dissertação.

Embora os valores apresentados nesta secção correspondam a um cenário específico de utilização, a metodologia desenvolvida não se encontra limitada aos parâmetros adotados. A alteração das características mecânicas do sistema permite adaptar a mesma arquitetura a elevadores com diferentes capacidades de carga, velocidades nominais ou alturas de edifício.

A Figura 3.2 apresenta uma representação simplificada do sistema de elevação considerado.

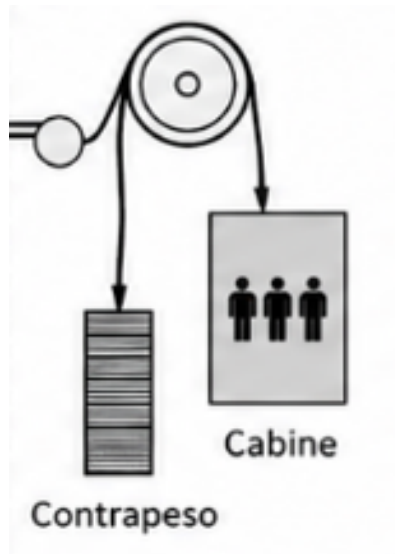


Figura 3.2: Modelo mecânico simplificado do elevador utilizado no caso de estudo.

O sistema é constituído por uma cabine destinada ao transporte de passageiros, um contrapeso, uma polia motriz e um sistema de acionamento elétrico baseado numa máquina síncrona de ímanes permanentes. Durante o funcionamento do elevador, a diferença entre a massa da cabine com carga e a massa do contrapeso origina o esforço mecânico que deverá ser fornecido ou absorvido pelo sistema de acionamento.

Tabela 3.1: Parâmetros do caso de estudo

Parâmetro	Símbolo	Valor
Massa da cabine	m_{cab}	500 kg
Massa do contrapeso	m_{cw}	815 kg
Carga útil máxima	$m_{payload}$	630 kg
Número de pisos	N	8
Altura média entre pisos	h	3 m
Velocidade nominal	v_n	1.5 m/s
Raio equivalente da polia	r	0.2 m
Relação de transmissão	i	0.02
Aceleração da gravidade	g	9.81 m/s ²

Para representar a carga mecânica aplicada ao sistema de acionamento foi adotado um modelo mecânico simplificado baseado na diferença entre a massa da cabine com carga e a massa do contrapeso. Esta abordagem permite reproduzir os principais esforços mecânicos associados ao movimento do elevador, preservando os fenómenos relevantes para a análise energética e para a validação dos conversores de potência.

A força resultante associada ao sistema de elevação é dada por:

$$F = (m_{cab} + m_{payload} - m_{cw})g \quad (3.1)$$

onde:

- m_{cab} representa a massa da cabine;
- $m_{payload}$ representa a carga transportada;
- m_{cw} representa a massa do contrapeso;
- g representa a aceleração da gravidade.

O binário resistente aplicado à polia de tração pode ser obtido através de:

$$T_{polia} = Fr \quad (3.2)$$

onde r representa o raio equivalente da polia.

A velocidade angular da polia é calculada a partir da velocidade linear da cabine através de:

$$\omega_{polia} = \frac{v}{r} \quad (3.3)$$

onde v representa a velocidade linear do elevador.

O sistema de acionamento considerado inclui ainda um redutor mecânico entre o motor e a polia de tração. A relação de transmissão adotada permite adaptar o binário e a velocidade entre a máquina elétrica e o sistema de elevação, possibilitando o funcionamento adequado do acionamento para as condições de operação consideradas.

Os esforços mecânicos calculados através das equações anteriores foram utilizados para gerar a carga mecânica aplicada ao sistema de acionamento desenvolvido nesta dissertação. Esta abordagem permitiu reproduzir condições representativas de funcionamento em motorização e regeneração, possibilitando a avaliação do desempenho energético da arquitetura proposta nos diferentes cenários analisados ao longo desta dissertação.

3.4 Barramento DC

O barramento DC constitui o elemento central da arquitetura proposta, sendo responsável pela interligação energética entre o conversor *Active Front End* (AFE), o conversor inversor associado ao acionamento da PMSM, o conversor *Dual Active Bridge* (DAB) e o sistema de proteção por *Brake Chopper*. A utilização de um barramento DC comum permite a transferência bidirecional de energia entre os diferentes estágios de conversão de energia, simplificando a integração da arquitetura e facilitando a implementação das estratégias de gestão de energia desenvolvidas neste trabalho.

Conforme apresentado na Figura 3.1, todos os fluxos energéticos do sistema convergem para o barramento DC. Durante o funcionamento em motorização, a energia proveniente da rede elétrica é transferida pelo conversor AFE para o barramento DC e posteriormente disponibilizada ao conversor inversor responsável pelo acionamento da PMSM. Em regime regenerativo, a energia produzida pelo sistema de elevação pode ser encaminhada para o sistema de armazenamento através

do conversor DAB ou devolvida à rede elétrica, dependendo das condições de operação definidas pelo Sistema de Gestão de Energia.

Para este trabalho foi adotada uma tensão nominal de 800 V no barramento DC. Este valor permite reduzir os níveis de corrente associados à transferência de potência, contribuindo para a diminuição das perdas por condução e para uma operação mais eficiente dos diferentes conversores de potência que integram a arquitetura.

O barramento foi modelado através de um condensador com capacitância de 5 mF. Este elemento permite absorver ou fornecer energia durante variações transitórias de potência, reduzindo as oscilações de tensão e contribuindo para a estabilização da tensão DC durante o funcionamento do sistema.

A modelação detalhada do barramento DC foi considerada durante o desenvolvimento e validação do conversor AFE, onde a dinâmica de carga e descarga do condensador assume particular relevância. No entanto, durante a validação isolada do sistema de acionamento baseado em PMSM e do conversor DAB, o barramento foi representado através de fontes de tensão ideais de 800 V. Esta abordagem permitiu focar a análise no desempenho dos respetivos sistemas de controlo e na transferência bidirecional de potência, sem introduzir a influência da dinâmica do barramento DC nos resultados obtidos.

Desta forma, o barramento DC desempenha simultaneamente funções de interligação energética, estabilização de tensão e desacoplamento entre os diferentes subsistemas, constituindo um elemento fundamental para o correto funcionamento da arquitetura proposta.

3.5 Sistema de Interface entre a Rede Elétrica e o Barramento DC

3.5.1 Função e Princípio de Funcionamento

A interface entre a rede elétrica trifásica e o barramento DC é realizada através de um conversor *Active Front End* (AFE) bidirecional. Este subsistema desempenha um papel fundamental na arquitetura proposta, uma vez que é responsável pela transferência controlada de energia entre a rede elétrica e o barramento DC comum que interliga os restantes subsistemas do sistema de acionamento.

O conversor adotado corresponde a uma topologia *Voltage Source Converter* (VSC) trifásica de dois níveis, constituída por três braços de potência, cada um formado por dois IGBTs com díodos antiparalelo. Esta configuração é atualmente uma das soluções mais utilizadas em aplicações industriais de média potência devido à sua simplicidade, robustez, elevada maturidade tecnológica e capacidade de controlo independente das correntes da rede e da tensão do barramento DC.

A escolha desta topologia resulta da necessidade de garantir funcionamento bidirecional, permitindo não apenas a alimentação do sistema a partir da rede elétrica, mas também a devolução de energia regenerada durante determinadas condições de operação do elevador. Esta solução permite o funcionamento bidirecional e a implementação da estratégia de controlo adotada, possibilitando a transferência controlada de potência entre a rede elétrica e o barramento DC.

Durante o funcionamento em motorização, o AFE permite que a energia proveniente da rede elétrica seja convertida para corrente contínua, alimentando o barramento DC e, consequentemente, o sistema de acionamento do elevador. O AFE constitui igualmente o elemento responsável pela manutenção da tensão do barramento DC no valor de referência definido para o sistema. Por outro lado, durante os períodos de regeneração, o mesmo conversor possibilita o fluxo inverso de potência, permitindo a devolução de energia à rede elétrica sempre que as condições de operação o justifiquem.

A utilização de uma topologia bidirecional elimina a necessidade de sistemas dissipativos convencionais para absorção da energia regenerada, contribuindo para uma maior eficiência energética do sistema global.

A Figura 3.3 apresenta o circuito de potência implementado para o conversor AFE.

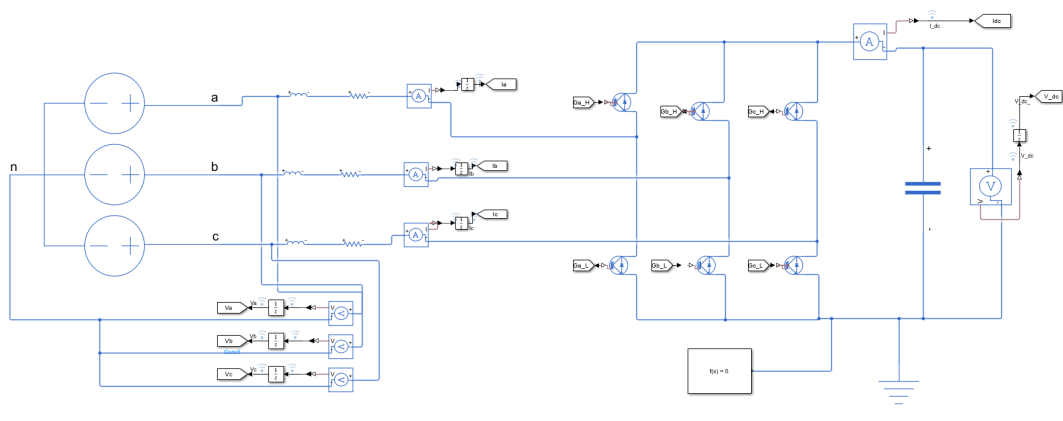


Figura 3.3: Circuito de potência do sistema de interface entre a rede elétrica e o barramento DC.

3.5.2 Modelação do Circuito de Potência

O circuito de potência desenvolvido é constituído por uma fonte trifásica equilibrada de 400 V (valor eficaz entre fases) e frequência nominal de 50 Hz, representando a ligação à rede elétrica de baixa tensão.

Entre a rede e o conversor foi implementado um filtro RL trifásico. A principal função deste filtro consiste na limitação das correntes de comutação, redução do conteúdo harmónico introduzido pela modulação PWM e melhoria da qualidade das correntes trocadas com a rede elétrica.

O estágio de conversão é constituído por uma ponte trifásica de seis IGBTs com díodos antiparalelo, organizada em três braços associados às fases a, b e c da rede elétrica. A comutação controlada destes dispositivos permite sintetizar as tensões necessárias para controlar as correntes da rede e regular a transferência de potência entre os domínios AC e DC.

No lado DC foi considerado um condensador de barramento com capacitância de 5 mF. O barramento DC foi modelado com uma tensão nominal de 800 V, de acordo com o valor definido na Secção 3.4. Este elemento desempenha um papel fundamental na estabilização da tensão do

barramento DC, absorvendo oscilações transitórias de potência e contribuindo para a manutenção de uma tensão praticamente constante durante o funcionamento do sistema.

Os principais parâmetros utilizados na modelação do sistema são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Parâmetros do sistema AFE

Parâmetro	Símbolo	Valor
Tensão da rede	V_{LL}	400 V
Frequência da rede	f_{rede}	50 Hz
Indutância do filtro	L_f	3 mH
Resistência do filtro	R_f	0.1 Ω
Tensão de referência do barramento DC	V_{dc}^{ref}	800 V
Capacitância do barramento	C_{dc}	5 mF
Frequência de comutação	f_{sw}	10 kHz

3.5.3 Estratégia de Controlo do Conversor AFE

De forma a garantir a transferência controlada de potência entre a rede elétrica e o barramento DC, foi implementada uma estratégia de controlo vetorial baseada no referencial síncrono dq. A estrutura global do sistema de controlo é constituída por um bloco de sincronização com a rede elétrica, uma malha externa de regulação da tensão do barramento DC, uma malha interna de controlo das correntes da rede e um sistema de geração dos sinais PWM. A Figura 3.4 apresenta a estrutura geral do controlador implementado.

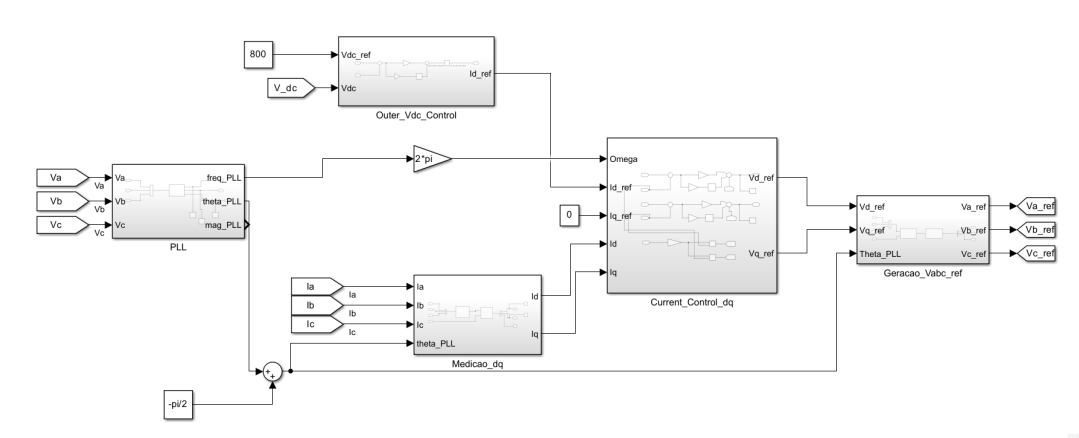


Figura 3.4: Estrutura geral do sistema de controlo do conversor AFE.

3.5.3.1 Sincronização e Transformação para o Referencial dq

O funcionamento do controlador baseia-se inicialmente na sincronização com a rede elétrica através de um *Phase Locked Loop* (PLL). Este bloco estima continuamente o ângulo elétrico da rede, permitindo a definição de um referencial síncrono rotativo alinhado com a tensão da rede.

A utilização deste referencial permite converter grandezas trifásicas sinusoidais em sinais aproximadamente contínuos, facilitando a implementação dos controladores e reduzindo a complexidade do sistema de regulação.

A frequência estimada pelo PLL é convertida em velocidade angular através da expressão:

$$\omega = 2\pi f \quad (3.4)$$

onde:

- ω representa a velocidade angular elétrica da rede [rad/s];
- f representa a frequência estimada pelo PLL [Hz].

O ângulo elétrico obtido é posteriormente utilizado nas transformações de coordenadas responsáveis pela conversão entre os referenciais abc, $\alpha\beta$ e dq.

Durante a implementação foi necessário introduzir um ajuste angular adicional de forma a compatibilizar a convenção utilizada pelo PLL com a orientação adotada nas transformações de Park. Este procedimento permitiu garantir o correto alinhamento do eixo d com o vetor de tensão da rede, assegurando a coerência do sistema de controlo desenvolvido.

As transformações de Clarke e Park constituem ferramentas fundamentais do controlo vetorial de conversores ligados à rede. A Transformada de Clarke converte as grandezas trifásicas do referencial abc para um referencial estacionário $\alpha\beta$, enquanto a Transformada de Park utiliza o ângulo elétrico estimado pelo PLL para efetuar a conversão para o referencial síncrono dq.

A principal vantagem desta abordagem consiste na transformação de sinais sinusoidais alternados em grandezas aproximadamente contínuas em regime permanente. Desta forma, o controlo das correntes torna-se significativamente mais simples, permitindo a utilização de reguladores PI convencionais e o desacoplamento entre as componentes associadas à potência ativa e à potência reativa.

Os parâmetros internos do PLL foram ajustados iterativamente em ambiente de simulação até se obter uma estimativa estável da frequência e do ângulo da rede, assegurando uma sincronização adequada para as transformações de coordenadas utilizadas no sistema de controlo.

3.5.3.2 Controlo da Potência Ativa e Reativa

A utilização do referencial síncrono dq permite estabelecer uma relação direta entre as componentes da corrente e as potências trocadas entre o conversor e a rede elétrica.

As expressões da potência ativa e da potência reativa podem ser escritas como:

$$P = \frac{3}{2} (V_d I_d + V_q I_q) \quad (3.5)$$

$$Q = \frac{3}{2} (V_q I_d - V_d I_q) \quad (3.6)$$

onde:

- P representa a potência ativa;
- Q representa a potência reativa;
- V_d e V_q representam as componentes da tensão da rede no referencial síncrono;
- I_d e I_q representam as componentes da corrente da rede no referencial síncrono.

Como o eixo d foi alinhado com o vetor de tensão da rede através do PLL, obtém-se aproximadamente:

$$V_q \approx 0 \quad (3.7)$$

Nestas condições:

$$P \approx \frac{3}{2} V_d I_d \quad (3.8)$$

$$Q \approx -\frac{3}{2} V_d I_q \quad (3.9)$$

Verifica-se assim que a potência ativa fica predominantemente associada à componente I_d , enquanto a potência reativa depende essencialmente da componente I_q .

Esta propriedade constitui uma das principais vantagens do controlo vetorial, permitindo regular de forma praticamente independente a potência ativa e a potência reativa trocadas com a rede elétrica.

No sistema desenvolvido, a componente I_d é utilizada para regular a tensão do barramento DC através do controlo da potência ativa absorvida ou injetada na rede. Por outro lado, foi adotada a referência:

$$I_{q,ref} = 0 \quad (3.10)$$

de forma a minimizar a circulação de potência reativa e promover uma operação com fator de potência próximo da unidade.

3.5.3.3 Malha Externa de Regulação da Tensão do Barramento DC

A regulação da tensão do barramento DC é realizada através de uma malha externa de controlo. O objetivo desta malha consiste em manter a tensão do barramento próxima do valor de referência definido para o sistema, independentemente das variações de carga ou das trocas de potência com os restantes subsistemas.

A estrutura implementada encontra-se representada na Figura 3.5.

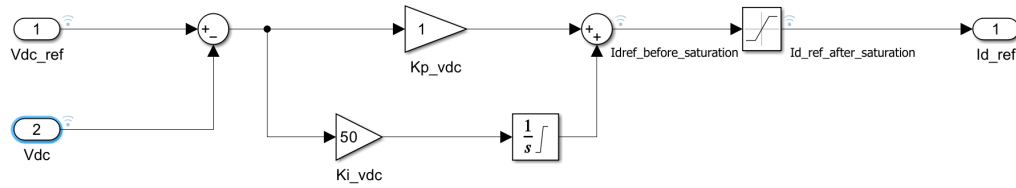


Figura 3.5: Malha externa de regulação da tensão do barramento DC.

A tensão medida do barramento é continuamente comparada com o valor de referência definido para o sistema, originando o erro de controlo:

$$e_{Vdc} = V_{dc}^{ref} - V_{dc} \quad (3.11)$$

O erro é processado por um controlador proporcional-integral (PI), cuja saída corresponde à referência da componente ativa da corrente:

$$I_{d,ref} = K_{p,vdc} \cdot e_{Vdc} + K_{i,vdc} \int e_{Vdc} dt \quad (3.12)$$

Foram utilizados os seguintes ganhos:

Tabela 3.3: Ganhos do controlador PI da malha de tensão

Parâmetro	Valor
$K_{p,vdc}$	1
$K_{i,vdc}$	50

A utilização de um controlador PI permite eliminar o erro em regime permanente e assegurar a convergência da tensão do barramento para o valor de referência pretendido.

De forma a limitar os esforços exigidos ao conversor durante condições transitórias, foi introduzida uma saturação na saída do controlador:

$$-60, A \leq I_{d,ref} \leq 60, A \quad (3.13)$$

Os limites adotados foram definidos de acordo com os níveis máximos de potência e corrente previstos para o caso de estudo, permitindo proteger os controladores contra pedidos excessivos durante condições transitórias e assegurar o funcionamento dentro da gama operacional do conversor.

3.5.3.4 Malha Interna de Controlo de Corrente

A malha interna de corrente é responsável por garantir que as correntes efetivamente trocadas com a rede seguem as referências geradas pela malha externa.

A estrutura implementada encontra-se representada na Figura 3.6.

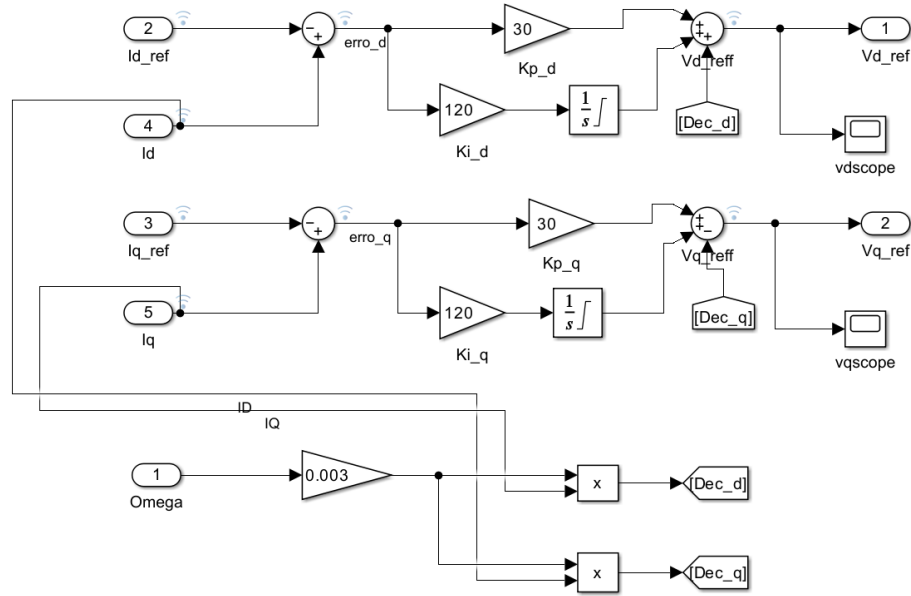


Figura 3.6: Malha interna de controlo das correntes dq.

Para o eixo d, o erro de corrente é calculado através de:

$$e_d = I_{d,ref} - I_d \quad (3.14)$$

A tensão de referência correspondente é obtida através de um controlador PI:

$$V_{d,ref} = K_{p,d} e_d + K_{i,d} \int e_d, dt \quad (3.15)$$

De forma análoga, para o eixo q obtém-se:

$$e_q = I_{q,ref} - I_q \quad (3.16)$$

$$V_{q,ref} = K_{p,q} e_q + K_{i,q} \int e_q, dt \quad (3.17)$$

Foram utilizados os seguintes ganhos:

Tabela 3.4: Ganhos dos controladores PI da malha de corrente

Parâmetro	Valor
$K_{p,d}$	30
$K_{i,d}$	120
$K_{p,q}$	30
$K_{i,q}$	120

A malha de corrente apresenta uma dinâmica significativamente mais rápida do que a malha de tensão, permitindo que as referências geradas pelo controlador externo sejam seguidas de forma

rápida e estável.

Foram igualmente implementados termos de desacoplamento entre os eixos d e q com base na frequência angular estimada pelo PLL e na indutância do filtro de entrada ($L_f = 3 \text{ mH}$). Esta compensação reduz a influência cruzada entre ambas as componentes, melhorando o desempenho dinâmico do sistema de controlo.

Estes termos compensam o acoplamento natural existente entre os dois eixos no modelo dinâmico do filtro de entrada, permitindo um controlo mais independente das componentes de corrente e melhorando a resposta transitória do sistema.

Adicionalmente, foram introduzidos limites de saturação nos integradores dos controladores PI, evitando fenómenos de *integrator windup* durante situações transitórias severas ou condições extremas de funcionamento.

Os ganhos dos controladores PI foram ajustados iterativamente através de simulação até se obter o desempenho desejado em termos de estabilidade, rapidez de resposta e seguimento das referências. O processo de afinação teve como objetivo garantir a regulação adequada da tensão do barramento DC, bem como uma resposta rápida das correntes da rede perante variações de carga e de fluxo de potência.

3.5.3.5 Transformação Inversa e Geração das Referências Trifásicas

As tensões de referência geradas pelos controladores de corrente são convertidas novamente para o sistema trifásico através da Transformada Inversa de Park seguida da Transformada Inversa de Clarke.

Obtêm-se assim as referências trifásicas:

$$V_a^{ref} \quad (3.18)$$

$$V_b^{ref} \quad (3.19)$$

$$V_c^{ref} \quad (3.20)$$

Estas grandezas representam as tensões instantâneas que deverão ser sintetizadas pelo conversor AFE.

3.5.3.6 Geração dos Sinais PWM

A síntese das tensões de saída do conversor é realizada através de modulação sinusoidal por largura de impulso (*Sinusoidal Pulse Width Modulation* – SPWM).

A estrutura implementada encontra-se representada na Figura 3.7.

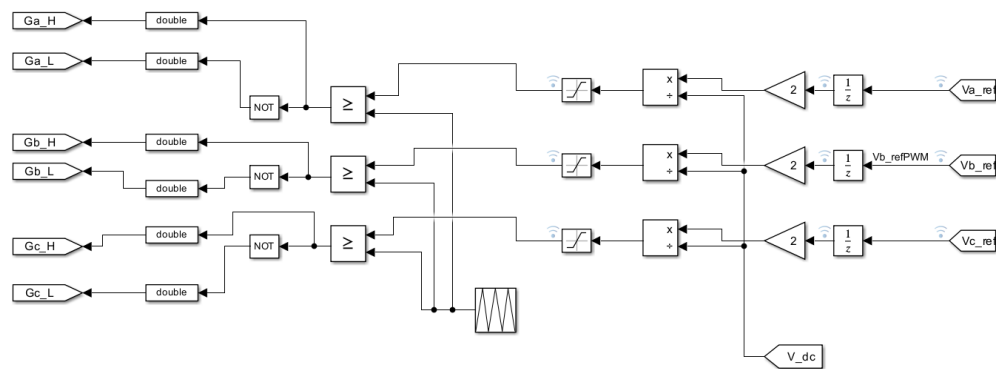


Figura 3.7: Sistema de geração dos sinais PWM.

As referências trifásicas geradas pelo controlador são inicialmente normalizadas em função da tensão instantânea do barramento DC. Posteriormente, estas referências são comparadas com uma portadora triangular de frequência fixa.

Sempre que a referência de uma determinada fase é superior ao valor instantâneo da portadora triangular, o semicondutor superior do braço correspondente é ativado. Caso contrário, é ativado o semicondutor inferior.

Este processo permite gerar os sinais de comando necessários ao acionamento dos seis IGBTs que constituem o conversor.

As referências modulantes foram ainda limitadas ao intervalo:

$$-1 \leq m \leq 1 \quad (3.21)$$

garantindo o correto funcionamento do modulador PWM e evitando situações de sobremodulação.

A frequência de comutação adotada foi:

$$f_{sw} = 10, \text{kHz} \quad (3.22)$$

valor tipicamente utilizado em aplicações industriais desta gama de potência, representando um compromisso adequado entre qualidade das formas de onda obtidas, perdas de comutação e esforço computacional associado à simulação.

3.6 Sistema de Interface entre o Barramento DC e o Sistema de Acionamento

3.6.1 Função e Princípio de Funcionamento

O sistema de interface entre o barramento DC e o sistema de acionamento tem como principal função realizar a conversão da energia elétrica armazenada no barramento DC em energia elétrica

trifásica adequada à alimentação da máquina síncrona de ímanes permanentes (PMSM), permitindo o acionamento controlado do elevador.

Durante o funcionamento em motorização, a potência flui do barramento DC para o inversor, sendo posteriormente convertida em tensões trifásicas que alimentam a PMSM. A máquina converte então a energia elétrica em energia mecânica, produzindo o binário necessário para movimentar a cabina do elevador.

Por outro lado, durante os períodos de travagem regenerativa, a PMSM passa a operar como gerador, convertendo energia mecânica em energia elétrica. Nesta situação, a potência flui da máquina para o barramento DC através do inversor, permitindo a recuperação da energia disponível no sistema.

A potência elétrica instantânea transferida entre o inversor e a máquina pode ser expressa por:

$$P_{ac} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (3.23)$$

onde v_a , v_b e v_c representam as tensões de fase e i_a , i_b e i_c as respetivas correntes.

No referencial síncrono dq, a potência pode igualmente ser escrita sob a forma:

$$P_{ac} = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \quad (3.24)$$

permitindo relacionar diretamente as componentes de tensão e corrente utilizadas pelo controlador vetorial.

Do lado do barramento DC, a potência é dada por:

$$P_{dc} = V_{dc} I_{dc} \quad (3.25)$$

sendo V_{dc} a tensão do barramento e I_{dc} a corrente fornecida ou absorvida pelo conversor.

A potência mecânica desenvolvida pela máquina é determinada por:

$$P_m = T_e \omega_m \quad (3.26)$$

onde T_e representa o binário eletromagnético produzido pela PMSM e ω_m a velocidade angular mecânica do rotor.

Em condições ideais, a potência elétrica e a potência mecânica seriam iguais. Contudo, devido às perdas existentes nos semicondutores, enrolamentos e restantes componentes do sistema, verifica-se aproximadamente:

$$P_m \approx \eta P_{dc} \quad (3.27)$$

durante a motorização, e

$$P_{dc} \approx \eta P_m \quad (3.28)$$

durante a regeneração, sendo η o rendimento global do conjunto conversor-máquina.

Desta forma, este subsistema constitui o elemento responsável pela conversão bidirecional de energia entre o barramento DC e o sistema mecânico do elevador, assegurando simultaneamente o controle preciso da velocidade, do binário e da posição da máquina elétrica.

Nos subcapítulos seguintes são apresentados o modelo de potência e as estratégias de controle implementadas para este sistema de acionamento.

3.6.2 Modelação do Circuito de Potência

O sistema de acionamento implementado é constituído por um conversor trifásico bidirecional de dois níveis (*Voltage Source Converter – VSC*), uma máquina síncrona de ímanes permanentes (PMSM), sensores de corrente, tensão, posição e velocidade, bem como pelo modelo mecânico equivalente do elevador apresentado anteriormente.

Durante a fase de desenvolvimento e validação deste subsistema, o barramento DC foi representado através de uma fonte de tensão ideal de 800 V. Esta simplificação permitiu isolar o comportamento do sistema de acionamento dos restantes subsistemas do modelo global, possibilitando a análise detalhada do desempenho do conversor, da máquina elétrica e da estratégia de controle implementada.

A Figura 3.8 apresenta o circuito de potência desenvolvido para o sistema de acionamento.

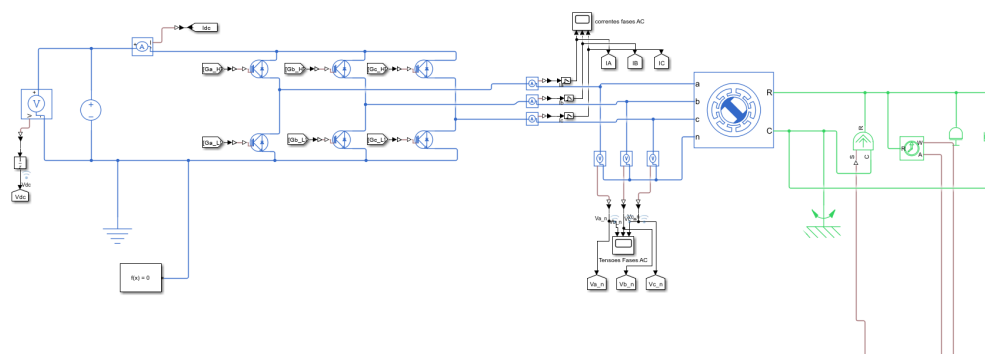


Figura 3.8: Circuito de potência do sistema de acionamento.

O conversor utilizado possui uma estrutura trifásica de dois níveis composta por seis IGBTs com diodos antiparalelos, organizados em três braços correspondentes às fases a, b e c da máquina elétrica. Esta topologia é amplamente utilizada em acionamentos industriais devido à sua simplicidade, robustez e capacidade de operação bidirecional.

Cada braço do conversor é constituído por dois semicondutores comandados de forma complementar, permitindo sintetizar tensões trifásicas alternadas a partir da tensão contínua disponível no barramento DC.

Os parâmetros adotados para os IGBTs utilizados no modelo encontram-se apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Parâmetros dos IGBTs utilizados no conversor

Parâmetro	Valor
Tensão direta V_f	0.8 V
Resistência em condução R_{on}	0.001 Ω
Condutância em bloqueio	1×10^{-5} S
Tensão limiar V_{th}	0.5 V
Díodo antiparalelo	Incluído

A utilização de modelos não ideais permite representar as perdas de condução dos semi-condutores, contribuindo para uma representação mais realista do comportamento energético do sistema.

A máquina elétrica selecionada foi uma máquina síncrona de ímanes permanentes (*Permanent Magnet Synchronous Machine* – PMSM), uma vez que esta tecnologia apresenta elevada densidade de potência, elevado rendimento, reduzida manutenção e excelente desempenho dinâmico, características particularmente adequadas para aplicações de transporte vertical.

O modelo adotado corresponde a uma PMSM trifásica ligada em estrela, com seis pares de polos magnéticos permanentes montados no rotor.

Os parâmetros elétricos e mecânicos utilizados encontram-se resumidos na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Parâmetros da PMSM

Parâmetro	Valor
Número de pares de polos	6
Fluxo dos ímanes permanentes λ_{pm}	0.03 Wb
Indutância do eixo d , L_d	0.19 mH
Indutância do eixo q , L_q	0.25 mH
Indutância de sequência zero L_0	0.16 mH
Resistência do estator R_s	0.013 Ω
Inércia do rotor J	0.01 kg·m ²
Atrito viscoso B	0.001 N·m·s/rad

O modelo considera ainda a dinâmica mecânica do rotor através da inclusão explícita da inércia e do coeficiente de amortecimento viscoso. Estes parâmetros permitem representar a acumulação de energia cinética no sistema rotativo e as perdas mecânicas associadas ao movimento.

A dinâmica eletromecânica da PMSM encontra-se diretamente relacionada com a corrente estatórica aplicada aos enrolamentos da máquina. No referencial síncrono dq, o binário eletromagnético pode ser expresso por:

$$T_e = \frac{3}{2}p [\lambda_{pm}i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (3.29)$$

onde:

- p representa o número de pares de polos;

- λ_{pm} corresponde ao fluxo dos ímanes permanentes;
- i_d e i_q representam as correntes nos eixos d e q ;
- L_d e L_q correspondem às indutâncias dos eixos d e q .

Embora a máquina apresente valores distintos para as indutâncias dos eixos d e q , a contribuição do binário de relutância é reduzida quando comparada com a componente associada ao fluxo dos ímanes permanentes, podendo a expressão anterior ser aproximada por:

$$T_e \approx \frac{3}{2} p \lambda_{pm} i_q \quad (3.30)$$

Verifica-se assim que o binário eletromagnético é essencialmente controlado através da componente i_q da corrente estatórica, propriedade que constitui a base da estratégia de controlo vetorial implementada neste trabalho.

A dinâmica mecânica da máquina pode ser descrita por:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \quad (3.31)$$

onde:

- J representa a inércia equivalente do sistema rotativo;
- T_e corresponde ao binário eletromagnético desenvolvido pela máquina;
- T_L representa o binário de carga aplicado pelo sistema mecânico do elevador;
- B corresponde ao coeficiente de atrito viscoso;
- ω_m representa a velocidade angular mecânica do rotor.

Esta equação traduz o equilíbrio dinâmico entre o binário desenvolvido pela máquina e o binário resistente aplicado pela carga mecânica. A diferença entre ambos determina a aceleração ou desaceleração do rotor, sendo a velocidade resultante utilizada posteriormente pelo sistema de controlo para fechar a malha de velocidade implementada no acionamento.

O binário de carga aplicado à PMSM é obtido a partir do modelo mecânico equivalente do elevador desenvolvido na Secção 3.3. Para compatibilizar a velocidade da máquina com a velocidade da polia motriz foi ainda considerado um redutor com relação de transmissão dada por:

$$N = 0.02 \quad (3.32)$$

onde N representa a relação de transmissão mecânica entre o motor elétrico e a polia motriz do sistema de elevação.

permitindo representar adequadamente a adaptação mecânica existente entre o motor e o sistema de elevação.

Por fim, foram utilizados sensores de corrente trifásica, tensão, velocidade angular e posição angular para fornecer ao sistema de controlo toda a informação necessária à implementação do controlo vetorial da máquina. Estes sinais são posteriormente utilizados nas transformações de coordenadas, na estimação das variáveis elétricas e mecânicas e nas malhas de controlo vetorial descritas na secção seguinte.

3.6.3 Estratégia de Controlo

3.6.3.1 Controlo Vetorial Orientado ao Campo (FOC)

O controlo da máquina síncrona de ímanes permanentes foi implementado através da estratégia *Field Oriented Control* (FOC), uma das técnicas mais utilizadas em acionamentos elétricos de elevado desempenho devido à sua capacidade de desacoplar o controlo do fluxo magnético e do binário eletromagnético da máquina.

A principal vantagem desta estratégia consiste na transformação das grandezas trifásicas do estator para um referencial síncrono rotativo dq, alinhado com o campo magnético do rotor. Neste referencial, as variáveis elétricas passam a assumir comportamento aproximadamente contínuo em regime permanente, simplificando significativamente o projeto das malhas de controlo.

A Figura 3.9 apresenta a estrutura geral do controlador vetorial implementado para a PMSM.

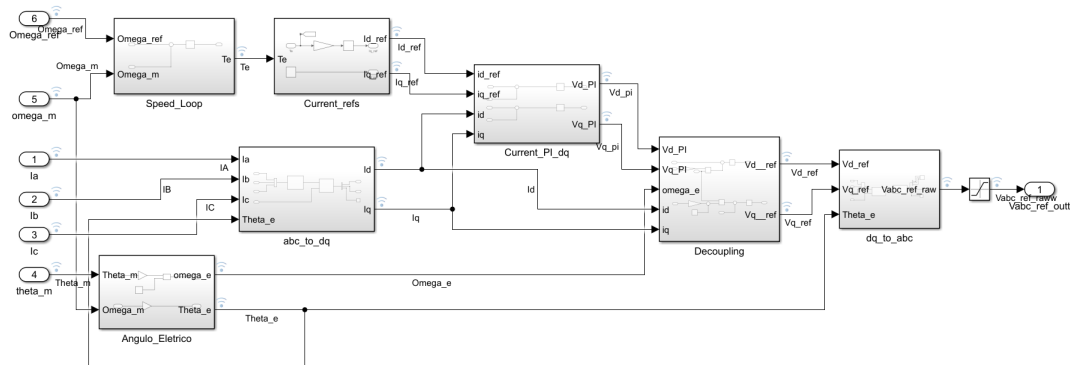


Figura 3.9: Estrutura geral do controlador vetorial FOC implementado.

No controlo FOC, o eixo d é orientado segundo o fluxo magnético produzido pelos ímanes permanentes do rotor, enquanto o eixo q permanece ortogonal ao mesmo. Esta escolha permite associar fisicamente a componente i_d ao controlo do fluxo e a componente i_q ao controlo do binário eletromagnético.

A conversão entre as grandezas mecânicas e elétricas da máquina é efetuada através das seguintes relações:

$$\omega_e = p\omega_m \quad (3.33)$$

$$\theta_e = p\theta_m \quad (3.34)$$

onde:

- ω_e representa a velocidade angular elétrica;
- ω_m representa a velocidade angular mecânica;
- θ_e representa a posição angular elétrica;
- θ_m representa a posição angular mecânica;
- p representa o número de pares de polos da máquina.

Considerando a PMSM utilizada neste trabalho, com $p = 6$ pares de polos, a velocidade e posição elétricas são obtidas multiplicando diretamente as respectivas grandezas mecânicas por seis. Estas variáveis são posteriormente utilizadas nas transformações de coordenadas necessárias ao funcionamento do controlador vetorial.

A transformação das correntes trifásicas medidas nas fases a, b e c para o referencial síncrono dq é realizada através da aplicação sucessiva das transformações de Clarke e Park. A transformação de Clarke converte inicialmente as correntes trifásicas num referencial estacionário $\alpha\beta$, enquanto a transformação de Park utiliza o ângulo elétrico do rotor para obter as componentes d e q.

Esta abordagem permite separar matematicamente os fenómenos associados ao fluxo magnético e ao binário eletromagnético, simplificando significativamente a implementação das malhas de controlo.

Para a PMSM considerada, o binário eletromagnético pode ser aproximado por:

$$T_e \approx \frac{3}{2}p\lambda_{pm}i_q \quad (3.35)$$

onde λ_{pm} representa o fluxo magnético produzido pelos ímanes permanentes.

Verifica-se assim que o binário eletromagnético é diretamente proporcional à corrente i_q , tornando esta variável a principal responsável pelo controlo do binário desenvolvido pela máquina.

Por este motivo foi adotada a estratégia clássica de controlo vetorial para PMSM de superfície, impondo:

$$i_d^{ref} = 0 \quad (3.36)$$

Desta forma, o fluxo magnético necessário ao funcionamento da máquina é integralmente fornecido pelos ímanes permanentes do rotor, enquanto o controlo do binário passa a depender exclusivamente da componente i_q .

Esta estratégia permite maximizar a utilização da corrente estatórica disponível, reduzindo perdas e simplificando a implementação do controlador.

3.6.3.2 Malha Externa de Velocidade

A malha externa de velocidade é responsável por garantir que a velocidade mecânica da máquina segue a referência definida para o perfil de funcionamento do elevador. Esta malha constitui o nível superior da estratégia de controlo implementada, fornecendo à malha interna de corrente a referência de binário necessária para corrigir desvios de velocidade.

A Figura 3.10 apresenta a estrutura implementada para a malha de velocidade.

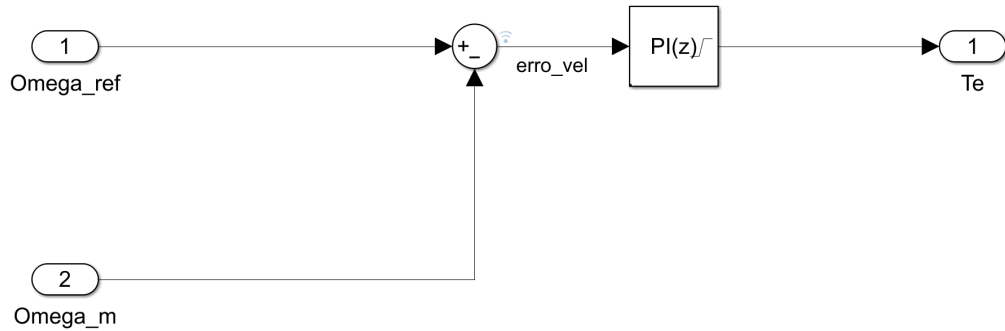


Figura 3.10: Malha externa de controlo da velocidade.

O controlador recebe como entradas a velocidade de referência ω_{ref} e a velocidade mecânica medida ω_m . A diferença entre ambas define o erro de velocidade:

$$e_{\omega} = \omega_{ref} - \omega_m \quad (3.37)$$

Este erro é processado por um controlador proporcional-integral (PI), cuja função consiste em gerar a referência de binário eletromagnético necessária para reduzir progressivamente o erro até zero.

A ação de controlo pode ser expressa por:

$$T_e^{ref} = K_{p,\omega} e_{\omega} + K_{i,\omega} \int e_{\omega} dt \quad (3.38)$$

onde:

- $K_{p,\omega}$ representa o ganho proporcional;
- $K_{i,\omega}$ representa o ganho integral;
- T_e^{ref} representa a referência de binário produzida pela malha de velocidade.

Os ganhos utilizados no controlador são apresentados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Parâmetros do controlador PI de velocidade

Parâmetro	Valor
$K_{p,\omega}$	3
$K_{i,\omega}$	10

Os valores adotados foram obtidos através de um processo iterativo de ajuste em simulação, procurando garantir um seguimento adequado da referência de velocidade sem oscilações excessivas e com erro estacionário reduzido.

Para evitar pedidos de binário incompatíveis com a capacidade do sistema de acionamento, a saída do controlador é sujeita a uma saturação. Esta limitação impede que a malha externa solicite correntes excessivas às malhas internas de corrente durante acelerações ou perturbações mais severas.

A referência de binário gerada pelo controlador constitui a variável de ligação entre a malha externa de velocidade e as malhas internas de corrente. A partir desta referência é calculada a corrente i_q^{ref} , responsável pela produção do binário eletromagnético da máquina.

A utilização de uma estrutura hierárquica composta por uma malha externa de velocidade e malhas internas de corrente permite melhorar o desempenho dinâmico do acionamento. As malhas de corrente apresentam uma resposta significativamente mais rápida, garantindo o seguimento quase instantâneo das referências geradas pela malha de velocidade, que opera numa escala temporal mais lenta.

Desta forma, a velocidade mecânica da PMSM pode ser regulada de forma precisa mesmo perante variações de carga ou alterações do perfil de funcionamento do elevador.

3.6.3.3 Geração das Referências de Corrente e Malhas Internas de Corrente

A referência de binário produzida pela malha externa de velocidade não pode ser aplicada diretamente ao conversor. Torna-se necessário convertê-la numa referência de corrente compatível com o modelo da PMSM e com a estratégia de controlo vetorial adotada.

Como apresentado anteriormente, o binário eletromagnético da máquina pode ser aproximado por:

$$T_e \approx \frac{3}{2} p \lambda_{pm} i_q \quad (3.39)$$

Isolando a corrente do eixo q , obtém-se:

$$i_{q,ref} = \frac{T_e^{ref}}{\frac{3}{2} p \lambda_{pm}} \quad (3.40)$$

Substituindo os parâmetros da PMSM utilizados no modelo:

$$p = 6 \quad (3.41)$$

$$\lambda_{pm} = 0.03 \text{ Wb} \quad (3.42)$$

resulta:

$$i_{q,ref} = \frac{T_e^{ref}}{0.27} \quad (3.43)$$

ou, de forma equivalente,

$$i_{q,ref} = 3.7037 T_e^{ref} \quad (3.44)$$

Verifica-se assim que o ganho implementado no bloco de geração das referências de corrente resulta diretamente dos parâmetros físicos da máquina elétrica e não de um ajuste empírico.

De acordo com a estratégia FOC adotada, a referência da componente de fluxo é mantida constante e igual a zero:

$$i_{d,ref} = 0 \quad (3.45)$$

Esta escolha permite que o fluxo magnético seja fornecido exclusivamente pelos ímanes permanentes do rotor, ficando a produção de binário inteiramente associada à corrente i_q .

A Figura 3.11 apresenta o bloco responsável pela geração das referências de corrente utilizadas pelas malhas internas.

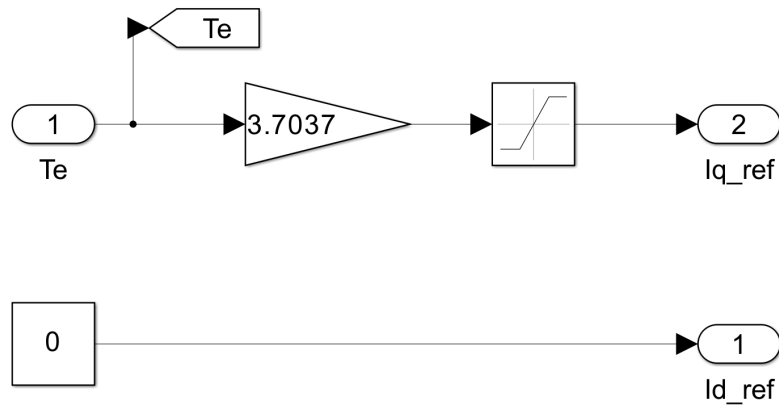


Figura 3.11: Bloco de geração das referências de corrente.

Para garantir condições de funcionamento compatíveis com o sistema de acionamento considerado, as referências de corrente são sujeitas a saturação.

Os limites utilizados encontram-se resumidos na Tabela 3.8.

Tabela 3.8: Limites das referências de corrente

Variável	Limite Inferior	Limite Superior
$i_{d,ref}$	0 A	0 A
$i_{q,ref}$	-200 A	200 A

Estes limites impedem que o controlador solicite correntes incompatíveis com a capacidade do conversor ou da máquina elétrica, contribuindo para a estabilidade numérica do modelo e para uma representação mais realista do sistema físico.

Após a definição das referências, as correntes medidas da PMSM são convertidas para o referencial síncrono dq , permitindo calcular os erros de corrente:

$$e_d = i_{d,ref} - i_d \quad (3.46)$$

$$e_q = i_{q,ref} - i_q \quad (3.47)$$

Os erros obtidos são processados por dois controladores PI independentes, responsáveis pela regulação das componentes d e q da corrente estatórica.

As ações de controlo podem ser expressas por:

$$v_{d,PI} = K_{p,d}e_d + K_{i,d} \int e_d dt \quad (3.48)$$

$$v_{q,PI} = K_{p,q}e_q + K_{i,q} \int e_q dt \quad (3.49)$$

onde $v_{d,PI}$ e $v_{q,PI}$ representam as tensões de controlo produzidas pelos reguladores.

Os parâmetros adotados para ambos os controladores encontram-se apresentados na Tabela 3.9.

Tabela 3.9: Ganhos dos controladores PI de corrente

Parâmetro	Valor
$K_{p,d}$	30
$K_{i,d}$	120
$K_{p,q}$	30
$K_{i,q}$	120

Os ganhos foram ajustados iterativamente através de simulação, procurando obter um seguimento rápido das referências de corrente sem introduzir oscilações significativas no sistema.

Comparativamente à malha de velocidade, as malhas de corrente apresentam uma dinâmica substancialmente mais rápida, permitindo acompanhar praticamente em tempo real as referências geradas pelo controlador superior.

Para evitar fenómenos de acumulação excessiva da ação integral durante períodos de saturação, foi ainda implementado um mecanismo de anti-windup baseado em retroação da diferença entre o sinal saturado e o sinal não saturado do controlador.

Esta técnica contribui para melhorar o comportamento transitório do sistema e reduzir o tempo de recuperação após situações de saturação.

A Figura 3.12 apresenta a implementação das malhas internas de corrente utilizadas no controlador vetorial.

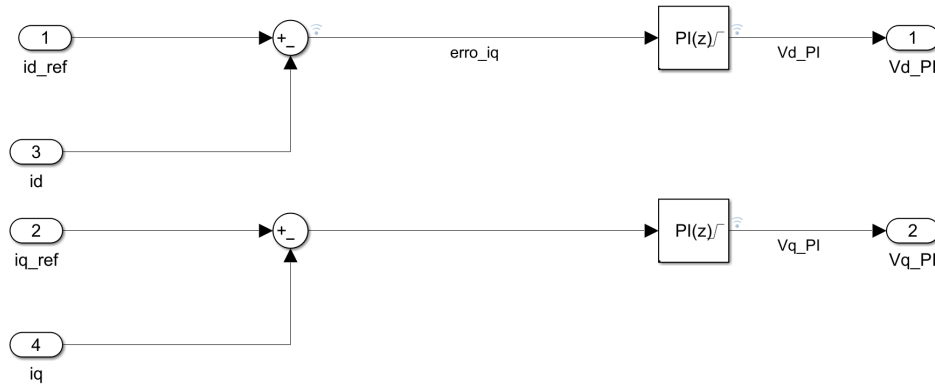


Figura 3.12: Malhas internas de controlo das correntes i_d e i_q .

3.6.3.4 Compensação dos Termos de Acoplamento e Geração dos Sinais PWM

Embora a transformação para o referencial síncrono dq permita desacoplar parcialmente o controlo do fluxo e do binário da máquina, as equações elétricas da PMSM continuam a apresentar termos de acoplamento entre os dois eixos. Estes termos resultam da rotação do referencial síncrono e da interação entre o fluxo magnético do rotor e as correntes estatóricas.

Para melhorar o desempenho dinâmico das malhas internas de corrente foi implementada uma estratégia de compensação destes termos, normalmente designada por desacoplamento (*decoupling*).

A Figura 3.13 apresenta o bloco responsável pela compensação dos termos de acoplamento implementado no controlador vetorial.

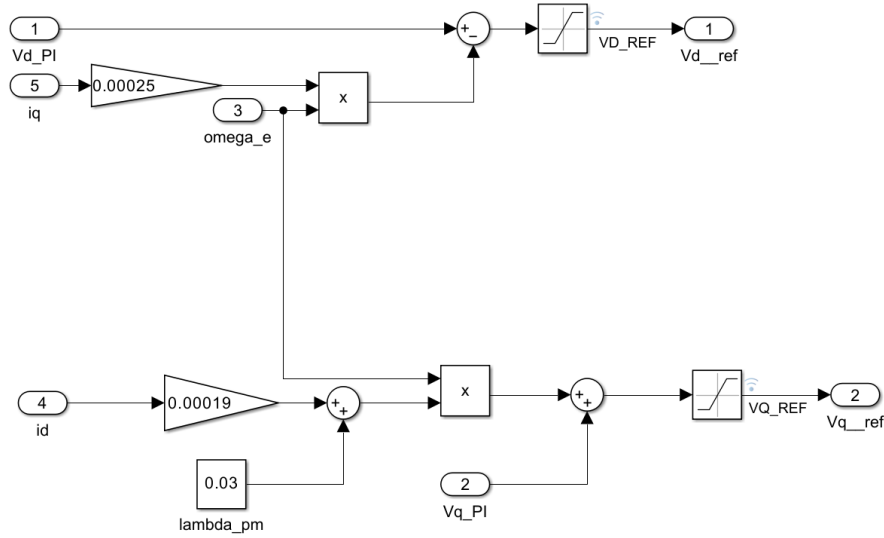


Figura 3.13: Implementação da compensação dos termos de acoplamento.

As tensões de referência aplicadas ao modulador PWM são obtidas através da soma das saídas dos controladores PI com os respectivos termos de desacoplamento.

Para o eixo d , a tensão de referência pode ser expressa por:

$$v_d = v_{d,PI} - \omega_e L_q i_q \quad (3.50)$$

Para o eixo q , obtém-se:

$$v_q = v_{q,PI} + \omega_e (L_d i_d + \lambda_{pm}) \quad (3.51)$$

onde:

- v_d e v_q representam as tensões de referência nos eixos d e q ;
- $v_{d,PI}$ e $v_{q,PI}$ correspondem às saídas dos controladores PI;
- ω_e representa a velocidade angular elétrica;
- L_d e L_q representam as indutâncias da máquina;
- λ_{pm} corresponde ao fluxo magnético dos ímãs permanentes.

A compensação destes termos reduz a interação entre as malhas de corrente, permitindo que os controladores PI atuem de forma aproximadamente independente sobre cada eixo. Como consequência, obtêm-se respostas transitórias mais rápidas e um seguimento mais preciso das referências de corrente.

Após a compensação, as tensões de referência calculadas no referencial síncrono dq são convertidas novamente para grandezas trifásicas através da aplicação das transformações inversas de Park e Clarke.

O resultado deste processo corresponde às referências de tensão trifásicas v_a^* , v_b^* e v_c^* , utilizadas para a geração dos sinais de comando dos semicondutores do inversor.

A Figura 3.14 apresenta a estrutura implementada para a geração dos sinais PWM.

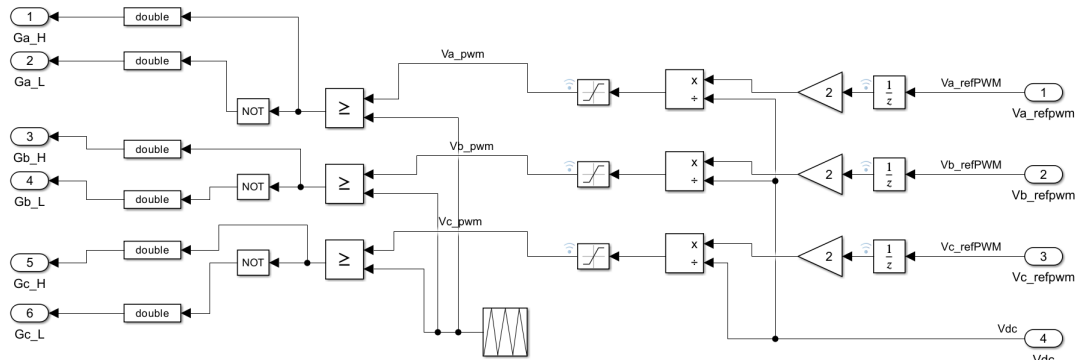


Figura 3.14: Sistema de geração dos sinais PWM.

A modulação é realizada através da comparação das referências trifásicas normalizadas com uma portadora triangular de elevada frequência. Sempre que a referência apresenta um valor superior ao da portadora, o semicondutor superior do respetivo braço do conversor é comandado para condução. Caso contrário, o comando é transferido para o semicondutor inferior.

Este processo permite sintetizar tensões alternadas aproximadamente sinusoidais a partir da tensão contínua disponível no barramento DC.

A frequência de comutação utilizada foi:

$$f_{sw} = 20 \text{ kHz} \quad (3.52)$$

correspondendo ao período de comutação:

$$T_{sw} = 50 \mu s \quad (3.53)$$

A escolha desta frequência representa um compromisso entre qualidade da forma de onda, desempenho dinâmico e perdas de comutação. Frequências mais elevadas permitem reduzir o conteúdo harmónico das correntes da máquina, mas aumentam simultaneamente as perdas nos semicondutores. Por outro lado, frequências inferiores conduzem a maiores ondulações de corrente e a um desempenho dinâmico inferior.

Os sinais PWM gerados são finalmente aplicados aos seis IGBTs do inversor trifásico, permitindo controlar as tensões aplicadas à PMSM e, consequentemente, regular o binário e a velocidade do sistema de acionamento.

Desta forma, a estratégia de controlo implementada assegura o seguimento da referência de velocidade definida para o elevador, garantindo simultaneamente uma operação eficiente da máquina elétrica e do conversor eletrónico de potência.

3.6.4 Perfil de Velocidade e Carga Aplicada

Para a validação do sistema de acionamento foi definido um perfil de velocidade de referência representativo do funcionamento de um elevador elétrico em condições normais de operação. Este perfil foi construído em ambiente MATLAB/Simulink através de um bloco do tipo *Signal Builder*, permitindo definir diferentes intervalos de funcionamento ao longo do tempo.

Ao contrário de uma referência em degrau, o perfil adotado inclui variações progressivas de velocidade, permitindo representar fases de aceleração, velocidade aproximadamente constante, desaceleração e paragem. Esta abordagem permite aproximar melhor o comportamento esperado num sistema real de elevação, evitando solicitações instantâneas não realistas ao controlador de velocidade.

O perfil considerado contempla diferentes modos de operação do elevador, incluindo o arranque a partir do repouso, o movimento num determinado sentido, a paragem intermédia, o movimento em sentido contrário e a paragem final. Desta forma, torna-se possível avaliar o comportamento do acionamento em condições de motorização e de regeneração, sem recorrer a múltiplos ensaios independentes.

A carga mecânica aplicada ao motor foi calculada a partir do modelo mecânico equivalente apresentado na Secção 3.3. A força resultante depende da diferença entre a massa da cabine com carga e a massa do contrapeso, sendo posteriormente convertida em binário resistente aplicado ao sistema de acionamento.

De forma geral, o binário aplicado à polia pode ser obtido por:

$$T_{polia} = F \cdot r \quad (3.54)$$

onde F representa a força resultante associada ao desequilíbrio entre a cabine carregada e o contrapeso, e r representa o raio equivalente da polia.

Considerando a relação de transmissão adotada no modelo, o binário aplicado ao eixo do motor é dado por:

$$T_{motor} = N \cdot T_{polia} \quad (3.55)$$

onde N representa a relação de transmissão mecânica considerada no sistema de acionamento.

O perfil de carga utilizado permite representar variações associadas à massa transportada pelo elevador, possibilitando a análise do comportamento do sistema em condições próximas das esperadas para o caso de estudo. Em particular, a utilização da carga máxima considerada permite avaliar o desempenho do controlo numa condição exigente para o sistema de acionamento.

Os resultados obtidos para este perfil de ensaio são apresentados e discutidos no Capítulo 4, onde se avalia o seguimento da referência de velocidade, o comportamento das correntes no referencial dq , o binário eletromagnético desenvolvido e os fluxos de potência associados aos modos de motorização e regeneração.

3.7 Sistema de Interface entre o Barramento DC e o Sistema de Armazenamento

3.7.1 Função e Princípio de Funcionamento

O sistema de armazenamento de energia encontra-se ligado ao barramento DC principal através de um conversor DC/DC bidirecional do tipo Dual Active Bridge (DAB). Este subsistema é responsável pela transferência controlada de energia entre o barramento DC, operando a uma tensão nominal de 800 V, e o sistema de armazenamento, cujo nível de tensão nominal é de aproximadamente 400 V.

A utilização de uma topologia DAB permite combinar três características particularmente importantes para a aplicação considerada: operação bidirecional, adaptação dos níveis de tensão e isolamento galvânico. A transferência de energia pode ocorrer em ambos os sentidos, permitindo tanto o carregamento como a descarga do sistema de armazenamento. Simultaneamente, a presença de um transformador de alta frequência assegura o isolamento elétrico entre os dois lados do conversor, contribuindo para a segurança e flexibilidade da arquitetura desenvolvida.

Durante o funcionamento regenerativo do elevador, parte da energia recuperada pelo sistema de acionamento pode ser transferida para o sistema de armazenamento através do conversor DAB. Nesta condição, a potência flui do barramento DC principal para o lado associado ao armazenamento, permitindo aumentar a energia disponível para utilizações futuras.

Por outro lado, em situações de falha da alimentação principal ou quando é necessário fornecer energia ao barramento DC, o sentido do fluxo energético pode ser invertido. Neste modo de funcionamento, a energia armazenada é transferida para o barramento principal, contribuindo para alimentar os restantes subsistemas da arquitetura e possibilitando a operação de emergência do elevador.

O princípio de funcionamento do DAB baseia-se na utilização de duas pontes ativas completas localizadas em ambos os lados de um transformador de alta frequência. Cada ponte converte a tensão contínua disponível no respetivo lado em formas de onda alternadas de elevada frequência, permitindo a transferência de energia através do transformador.

A potência transferida entre os dois lados do conversor é regulada através do desfasamento angular entre as tensões geradas pelas duas pontes, normalmente designado por *phase shift*. Quando ambas as pontes operam sem desfasamento, a potência média transferida é reduzida. À medida que o desfasamento aumenta, a potência transferida aumenta igualmente. O sinal do desfasamento determina ainda o sentido do fluxo energético, permitindo controlar de forma contínua o carregamento ou descarregamento do sistema de armazenamento.

Esta estratégia de controlo apresenta elevada eficiência, reduzido número de componentes passivos e capacidade de operação bidirecional, características que tornam o conversor DAB particularmente adequado para sistemas de armazenamento de energia ligados a barramentos DC, como o considerado nesta dissertação.

3.7.2 Modelação do Circuito de Potência

O conversor DAB desenvolvido neste trabalho foi implementado com o objetivo de estabelecer uma ligação bidirecional entre o barramento DC principal e o sistema de armazenamento de energia. Durante a fase de desenvolvimento e validação deste subsistema, o barramento DC foi representado através de uma fonte de tensão ideal de 800 V. Esta abordagem permitiu analisar isoladamente o comportamento do conversor e da estratégia de controlo implementada, eliminando a influência da dinâmica do barramento DC e dos restantes subsistemas da arquitetura.

A Figura 3.15 apresenta o circuito de potência implementado para o conversor DAB.

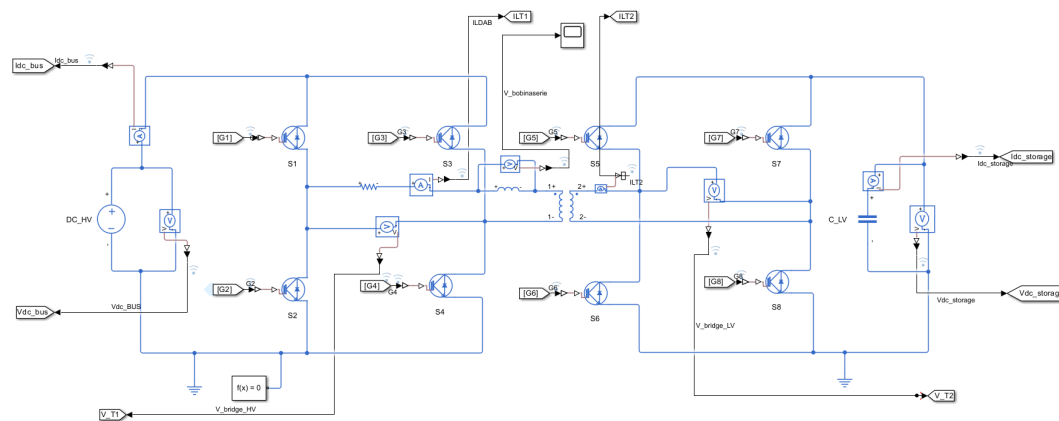


Figura 3.15: Circuito de potência do conversor Dual Active Bridge implementado.

O circuito é constituído por duas pontes completas de semicondutores, uma associada ao lado de alta tensão e outra ao lado de baixa tensão. Cada ponte é formada por quatro IGBTs com díodos antiparalelo, totalizando oito dispositivos de comutação. Esta configuração permite gerar tensões alternadas de elevada frequência em ambos os lados do transformador e possibilita a transferência bidirecional de potência entre o barramento DC e o sistema de armazenamento.

A transferência de energia entre ambos os lados do conversor é realizada através de um transformador ideal de alta frequência. Foi adotada uma relação de transformação igual a 2, permitindo compatibilizar a tensão nominal de 800 V do barramento DC com a tensão nominal de aproximadamente 400 V do sistema de armazenamento. Esta escolha simplifica a integração do conversor na arquitetura proposta e permite operar o sistema de armazenamento a um nível de tensão inferior, mantendo simultaneamente correntes e esforços elétricos compatíveis com a aplicação considerada.

Para representar a dinâmica energética do conversor foi introduzida uma indutância série de $200 \mu\text{H}$ no lado de alta tensão. Este elemento desempenha um papel fundamental na transferência de potência entre ambos os lados do sistema, limitando a corrente circulante e armazenando temporariamente energia durante o processo de conversão. O valor adotado resulta de um compromisso entre capacidade de transferência de potência, limitação da ondulação de corrente e estabilidade do sistema.

Foi igualmente considerada uma resistência série de 0.1Ω , utilizada para representar as perdas associadas aos elementos passivos do circuito e aproximar o comportamento do modelo às condições observadas num sistema real.

Os principais parâmetros adotados para o transformador e para os elementos passivos encontram-se resumidos na Tabela 3.10.

Tabela 3.10: Parâmetros dos elementos passivos do conversor DAB

Parâmetro	Valor
Relação do transformador	2
Indutância série	$200 \mu\text{H}$
Resistência série	0.1Ω

No lado associado ao sistema de armazenamento foi implementado um condensador de 5 mF com resistência série equivalente de 0.01Ω . Este elemento é responsável pela estabilização da tensão DC, absorvendo as oscilações provocadas pela comutação dos semicondutores e pelas variações transitórias de potência. A capacidade selecionada permite reduzir a ondulação de tensão observada no lado de baixa tensão e contribuir para uma operação mais estável do conversor.

Os parâmetros considerados para este elemento encontram-se apresentados na Tabela 3.11.

Tabela 3.11: Parâmetros do condensador do sistema de armazenamento

Parâmetro	Valor
Capacitância	5 mF
Resistência série equivalente	0.01Ω

De forma a possibilitar a monitorização do desempenho energético do conversor, foram implementados sensores de tensão e corrente em diferentes pontos do circuito. Estas medições permitem acompanhar o comportamento das grandezas elétricas associadas ao barramento DC, ao sistema de armazenamento e ao transformador durante os diferentes modos de funcionamento. A monitorização destas variáveis assume particular importância durante a fase de validação, permitindo verificar a coerência da transferência de energia entre ambos os lados do conversor.

A potência instantânea pode ser calculada através do produto entre a tensão e a corrente medidas num determinado ponto do circuito:

$$P(t) = V(t) \cdot I(t) \quad (3.56)$$

onde $V(t)$ representa a tensão instantânea e $I(t)$ a corrente instantânea correspondente.

A potência média utilizada na análise energética do conversor pode ser obtida através da expressão:

$$P_{med} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t), dt \quad (3.57)$$

onde T representa o intervalo temporal considerado para o cálculo da média.

Em condições ideais, e desconsiderando as perdas associadas aos semicondutores, ao transformador e aos elementos passivos, a potência média transferida no lado de alta tensão deverá ser aproximadamente igual à potência média observada no lado de baixa tensão. As diferenças verificadas entre ambos os valores correspondem às perdas introduzidas pelos diferentes componentes do conversor.

Desta forma, o modelo desenvolvido permite representar os principais fenómenos elétricos associados ao funcionamento do conversor DAB, constituindo uma base adequada para a implementação da estratégia de controlo apresentada na secção seguinte.

3.7.3 Estratégia de Controlo

A transferência de potência no conversor DAB é realizada através do controlo do desfasamento angular entre as tensões geradas pelas duas pontes ativas. Ao contrário de outras topologias de conversão eletrónica de potência, onde a potência transferida é regulada através da variação do *duty cycle* dos sinais PWM, no conversor DAB a potência é controlada mantendo um *duty cycle* constante e ajustando apenas o *phase shift* entre as duas pontes.

A estratégia de controlo implementada encontra-se representada na Figura 3.16.

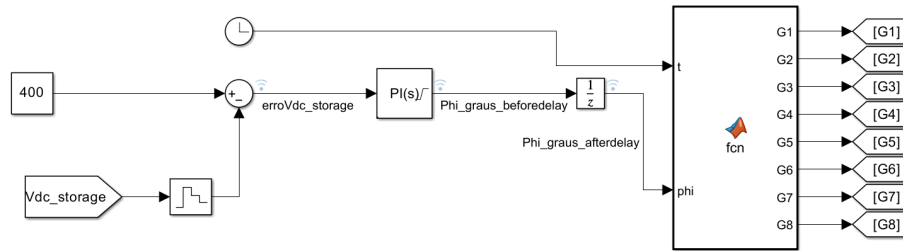


Figura 3.16: Estrutura geral da malha de controlo do conversor DAB.

O sistema de controlo recebe como entrada a tensão medida no lado do sistema de armazenamento ($V_{storage}$) e compara-a com uma referência de 400 V. O erro obtido é processado por um controlador proporcional-integral (PI), responsável por gerar o valor de desfasamento angular necessário para regular a transferência de potência entre os dois lados do conversor.

O erro utilizado pelo controlador é definido por:

$$e(t) = V_{ref} - V_{storage} \quad (3.58)$$

onde:

- $V_{ref} = 400$ V;
- $V_{storage}$ corresponde à tensão medida no sistema de armazenamento.

A saída do controlador PI é dada por:

$$\phi(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t), dt \quad (3.59)$$

onde:

- K_p representa o ganho proporcional;
- K_i representa o ganho integral;
- ϕ representa o desfasamento angular aplicado entre as duas pontes.

Os parâmetros adotados para o controlador encontram-se apresentados na Tabela 3.12.

Tabela 3.12: Parâmetros do controlador PI

Parâmetro	Valor
Tensão de referência V_{ref}	400 V
Ganho proporcional K_p	0.3
Ganho integral K_i	5
Saturação operacional	$\pm 135^\circ$
Frequência de comutação	20 kHz

Embora o *phase shift* físico do conversor possa variar entre -180° e 180° , a saída do controlador foi limitada a uma gama operacional de $\pm 135^\circ$. Esta limitação permite explorar uma ampla gama de funcionamento do conversor, evitando simultaneamente a operação muito próxima dos limites físicos do sistema.

O valor de *phase shift* calculado pelo controlador é posteriormente aplicado a uma função MATLAB responsável pela geração dos sinais de comando dos oito IGBTs do conversor. A implementação utilizada encontra-se apresentada na Figura 3.17.

```

function [G1,G2,G3,G4,G5,G6,G7,G8] = fcn(t,phi)

fs = 20000;
T = 1/fs;
% Saturação de segurança do phase shift
phi = max(min(phi,180),-180);

phi=phi/360*T;

% Ponte HV
tau1 = mod(t,T)/T;
S1 = tau1 < 0.5;

G1 = double(S1);
G2 = double(~S1);
G3 = double(~S1);
G4 = double(S1);

% Ponte LV desfasada
tau2 = mod(t - phi,T)/T;
S2 = tau2 < 0.5;

G5 = double(S2);
G6 = double(~S2);
G7 = double(~S2);
G8 = double(S2);

end

```

Figura 3.17: Implementação da geração dos sinais de comando através de uma função MATLAB.

A função recebe como entradas o tempo de simulação e o valor do *phase shift* calculado pelo controlador, produzindo como saídas os sinais de comando G1 a G8, correspondentes aos oito interruptores do conversor.

A ponte de alta tensão, constituída pelos interruptores S1 a S4, é utilizada como referência. Os sinais de comando são gerados sob a forma de ondas quadradas com frequência de 20 kHz e *duty cycle* fixo de 50

A ponte de baixa tensão, constituída pelos interruptores S5 a S8, utiliza a mesma frequência de comutação e o mesmo *duty cycle*, sendo a única diferença a introdução de um desfasamento angular relativamente à ponte de alta tensão. Desta forma, a potência transferida é regulada exclusivamente através da variação do *phase shift*.

A utilização de um *duty cycle* constante de 50% corresponde ao modo de operação convencional dos conversores DAB e simplifica significativamente a estratégia de controlo, uma vez que toda a regulação da potência passa a depender apenas do desfasamento angular entre as duas pontes.

O desfasamento angular encontra-se limitado ao intervalo:

$$-180^\circ \leq \phi \leq 180^\circ \quad (3.60)$$

uma vez que valores exteriores produzem formas de onda equivalentes devido à natureza periódica dos sinais gerados.

A potência transferida pelo conversor pode ser aproximada pela seguinte expressão:

$$P = \frac{nV_1V_2}{2\pi f_s L} \phi \left(1 - \frac{|\phi|}{\pi} \right) \quad (3.61)$$

onde:

- P representa a potência transferida;
- n representa a relação de transformação do transformador;
- V_1 representa a tensão do lado de alta tensão;
- V_2 representa a tensão do lado de baixa tensão;
- f_s representa a frequência de comutação;
- L representa a indutância série;
- ϕ representa o desfasamento angular entre as duas pontes.

Esta expressão demonstra que o principal parâmetro responsável pela regulação da potência transferida é o *phase shift*. À medida que aumenta o valor absoluto do desfasamento, aumenta igualmente a potência transferida entre ambos os lados do conversor.

Fisicamente, a transferência de potência resulta da diferença instantânea entre as tensões produzidas pelas duas pontes ativas. Quando ambas as pontes operam sem desfasamento, a diferença de potencial aplicada à indutância série é reduzida, resultando numa corrente média próxima de zero e, consequentemente, numa potência transferida reduzida.

Quando é introduzido um desfasamento angular entre as pontes, surge uma diferença de tensão entre os dois lados do transformador. Esta diferença é aplicada à indutância série e, de acordo com a relação

$$v_L = L \frac{di}{dt} \quad (3.62)$$

origina a circulação de corrente através do transformador. Esta corrente constitui o mecanismo responsável pela transferência de energia entre ambos os lados do conversor.

Assim, a corrente que circula na indutância série pode ser encarada como um indicador direto da potência transferida pelo DAB. Quanto maior for o desfasamento aplicado, maior será a diferença de tensão observada na indutância, aumentando a corrente transferida e, consequentemente, a potência trocada entre o barramento DC e o sistema de armazenamento.

Desta forma, o controle implementado permite regular automaticamente a tensão do sistema de armazenamento em torno da referência de 400 V, assegurando simultaneamente uma transferência bidirecional de potência compatível com os diferentes modos de funcionamento previstos para o sistema desenvolvido.

3.8 Sistema de Dissipação de Energia por Brake Chopper

3.8.1 Função e Princípio de Funcionamento

Durante o funcionamento regenerativo do elevador, o acionamento elétrico pode converter energia mecânica em energia elétrica, devolvendo-a ao barramento DC. Em condições normais, esta energia pode ser absorvida pelo sistema de armazenamento através do conversor DAB ou devolvida à rede elétrica através do conversor AFE. No entanto, podem ocorrer situações em que nenhum destes subsistemas consegue absorver a totalidade da energia regenerada disponível.

Nestas condições, a energia acumulada no barramento DC provoca um aumento da sua tensão, podendo conduzir a valores superiores aos limites admissíveis para os semicondutores e restantes componentes eletrónicos do sistema. Para evitar esta situação, foi implementado um sistema de proteção baseado num Brake Chopper.

O Brake Chopper consiste num conversor DC/DC simples, constituído por um interruptor eletrónico e uma resistência de travagem ligados em paralelo ao barramento DC. Quando a tensão do barramento ultrapassa um determinado valor, o interruptor é ativado, permitindo a circulação de corrente através da resistência. A energia excedente é então convertida em calor e dissipada de forma controlada.

Desta forma, o Brake Chopper atua como um mecanismo de proteção do barramento DC, garantindo que a tensão permanece dentro de limites seguros mesmo quando a energia regenerada não pode ser absorvida pelos restantes subsistemas da arquitetura.

Importa referir que esta solução não constitui o modo preferencial de gestão da energia regenerada. Sempre que possível, a energia recuperada deve ser armazenada ou devolvida à rede elétrica. O Brake Chopper é utilizado apenas como mecanismo de segurança, atuando em situações de emergência ou saturação energética do sistema.

3.8.2 Modelação e Estratégia de Controlo

A Figura 3.18 apresenta o modelo desenvolvido para o sistema Brake Chopper.

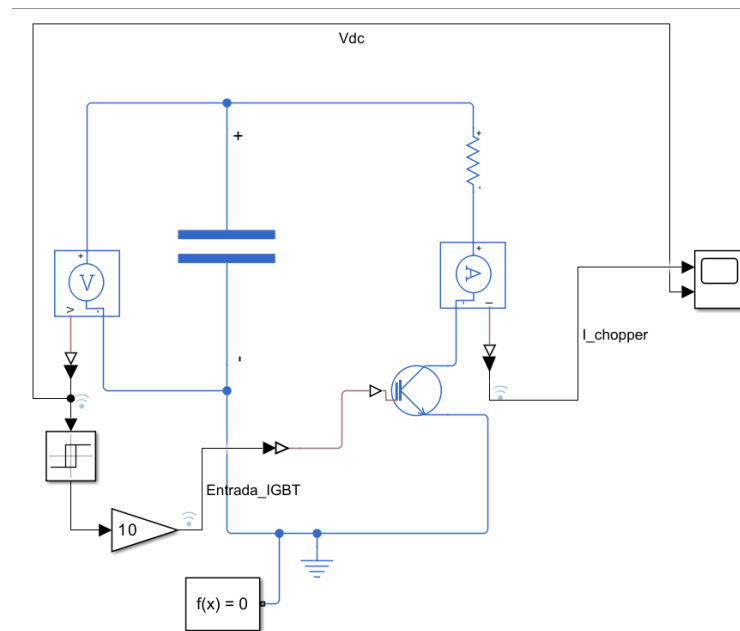


Figura 3.18: Modelo do sistema Brake Chopper implementado em Simulink.

O circuito é constituído por uma resistência de travagem, um IGBT responsável pela sua comutação e um sistema de monitorização da tensão do barramento DC. O conjunto encontra-se ligado em paralelo ao barramento principal, permitindo absorver energia apenas quando necessário.

Os principais parâmetros utilizados encontram-se resumidos na Tabela 3.13.

Tabela 3.13: Parâmetros do Brake Chopper

Parâmetro	Valor
Tensão nominal do barramento DC	800 V
Capacitância do barramento DC	5 mF
Resistência de travagem	100 Ω
Tensão de ativação	830 V
Tensão de desativação	810 V

A tensão nominal do barramento DC foi definida como 800 V, valor adotado em toda a arquitetura desenvolvida. Considerando este valor nominal, foi estabelecido um limiar de ativação de 830 V, correspondente a uma sobretensão moderada relativamente ao ponto de funcionamento normal do sistema.

A ativação do Brake Chopper antes de atingir níveis mais elevados de tensão permite atuar preventivamente sobre a sobretensão do barramento, reduzindo os esforços elétricos impostos aos semicondutores e restantes componentes eletrónicos.

A estratégia de controlo implementada baseia-se na utilização de um bloco do tipo Relay, responsável pela monitorização contínua da tensão do barramento DC. Quando a tensão ultrapassa os 830 V, o relé gera um sinal lógico que ativa o IGBT e liga a resistência de travagem ao barramento.

O sistema apenas é desativado quando a tensão desce abaixo dos 810 V. Esta diferença entre os valores de ativação e desativação constitui uma histerese de controlo, evitando comutações excessivamente frequentes do interruptor quando a tensão oscila nas proximidades do valor limite.

A lógica de funcionamento pode ser descrita por:

$$\text{Brake Chopper ON} \quad \text{se} \quad V_{dc} > 830 \text{ V} \quad (3.63)$$

$$\text{Brake Chopper OFF} \quad \text{se} \quad V_{dc} < 810 \text{ V} \quad (3.64)$$

Quando o IGBT entra em condução, a corrente passa a circular através da resistência de travagem, dissipando a energia excedente sob a forma de calor. A potência dissipada pode ser estimada através da expressão:

$$P_R = \frac{V_{dc}^2}{R} \quad (3.65)$$

onde:

- P_R representa a potência dissipada na resistência;
- V_{dc} representa a tensão do barramento DC;
- R representa a resistência de travagem.

Considerando o instante de ativação do sistema, correspondente a aproximadamente 830 V, obtém-se:

$$P_R = \frac{830^2}{100} \quad (3.66)$$

$$P_R = 6889 \text{ W} \quad (3.67)$$

$$P_R \approx 6.9 \text{ kW} \quad (3.68)$$

Este valor é superior à potência máxima prevista para o sistema de elevador considerado, garantindo capacidade suficiente para absorver a energia regenerada em situações críticas e limitar o aumento da tensão do barramento DC.

A resistência de 100 Ω foi seleccionada de forma a assegurar uma capacidade de dissipação adequada sem originar correntes excessivamente elevadas durante a atuação do sistema. Desta forma, obtém-se um compromisso entre capacidade de absorção de energia, limitação das correntes de travagem e proteção dos componentes eletrónicos.

O condensador de 5 mF presente no barramento DC desempenha igualmente um papel importante durante estes eventos transitórios, armazenando temporariamente energia e contribuindo para reduzir a velocidade de variação da tensão do barramento até à atuação do Brake Chopper.

Desta forma, o sistema desenvolvido permite proteger eficazmente o barramento DC contra sobretensões resultantes da regeneração de energia, assegurando a operação segura dos restantes subsistemas da arquitetura proposta.

3.9 Dimensionamento do Sistema de Armazenamento

3.9.1 Objetivo da Ferramenta de Dimensionamento

A seleção de um sistema de armazenamento para elevadores regenerativos depende de diversos fatores, nomeadamente das características do edifício, da carga transportada, da utilização prevista e dos requisitos de operação em emergência. Desta forma, não existe uma solução universal aplicável a todas as instalações.

Com o objetivo de apoiar esta fase de projeto, foi desenvolvida uma ferramenta de dimensionamento em MATLAB capaz de estimar os requisitos energéticos e de potência associados a diferentes cenários de utilização. A ferramenta permite ao utilizador definir as principais características do sistema, incluindo o número de pisos, altura entre pisos, massa da cabine, massa do contrapeso, velocidade nominal, aceleração e objetivos de funcionamento em emergência.

A partir destes dados, o programa calcula automaticamente os requisitos mínimos de armazenamento, a potência necessária para o conversor DAB, os níveis de corrente esperados e uma estimativa da capacidade necessária para diferentes tecnologias de armazenamento. Desta forma, a ferramenta fornece uma base quantitativa para a seleção e dimensionamento do sistema de armazenamento mais adequado a cada aplicação.

3.9.2 Metodologia de Dimensionamento

O cálculo dos requisitos energéticos baseia-se inicialmente na massa desequilibrada do sistema elevador-contrapeso, definida por:

$$m_{eq} = |m_{cabine+carga} - m_{contrapeso}| \quad (3.69)$$

A energia elétrica necessária para deslocar a cabine entre dois pisos é estimada a partir da energia potencial gravítica e do rendimento global do sistema:

$$E_{piso} = \frac{m_{eq}gh_{piso}}{\eta} \quad (3.70)$$

onde:

- m_{eq} representa a massa desequilibrada;
- g representa a aceleração gravítica;
- h_{piso} representa a altura entre pisos;
- η representa o rendimento global do sistema.

A potência de regime é estimada por:

$$P_{regime} = \frac{m_{eq} g v}{\eta} \quad (3.71)$$

enquanto a potência de pico considera adicionalmente o efeito da aceleração:

$$P_{pico} = \frac{(m_{eq} g + m_{eq} a) v}{\eta} \quad (3.72)$$

Estas grandezas permitem determinar simultaneamente os requisitos energéticos do sistema de armazenamento e os requisitos de potência do conversor DAB responsável pela sua interface com o barramento DC.

A ferramenta permite ainda definir diferentes objetivos de funcionamento em emergência, incluindo a deslocação para o piso mais próximo, a deslocação até ao piso térreo, a realização de múltiplas viagens de emergência ou a manutenção de serviço durante um período prolongado. Para aumentar a robustez do dimensionamento, é aplicada uma margem de segurança adicional sobre a energia calculada.

O dimensionamento foi realizado segundo uma abordagem conservadora, privilegiando a segurança e a capacidade de operação em condições adversas. Para tal, considerou-se a massa desequilibrada máxima entre a cabine e o contrapeso, bem como os percursos mais exigentes dentro do edifício. Desta forma, os resultados obtidos correspondem ao pior cenário previsível de funcionamento, garantindo que o sistema de armazenamento possui energia suficiente para cumprir os objetivos definidos mesmo em situações desfavoráveis.

A energia total necessária depende não apenas da energia requerida para uma única deslocação, mas também do número de viagens de emergência pretendidas. Assim, a ferramenta permite analisar diferentes cenários de operação, desde a deslocação até ao piso mais próximo até múltiplas viagens consecutivas ou períodos prolongados de funcionamento autónomo. Em todos os casos, é aplicada uma margem adicional de segurança, garantindo que o sistema mantém capacidade suficiente para evitar situações críticas, como a imobilização da cabine entre pisos.

3.9.3 Tecnologias de Armazenamento Consideradas

Foram consideradas três abordagens possíveis para o sistema de armazenamento: supercondensadores, baterias e sistemas híbridos.

Os supercondensadores caracterizam-se por apresentar elevada densidade de potência, reduzidos tempos de carregamento e um número muito elevado de ciclos de carga e descarga. Estas características tornam-nos particularmente adequados para absorver energia regenerada e fornecer energia durante curtos períodos de tempo. No entanto, apresentam uma densidade energética relativamente reduzida, limitando a sua autonomia.

As baterias apresentam uma densidade energética significativamente superior, permitindo armazenar maiores quantidades de energia e suportar períodos prolongados de funcionamento. Em

contrapartida, possuem menor capacidade para suportar ciclos repetitivos de elevada potência e apresentam envelhecimento associado ao processo de carga e descarga.

Os sistemas híbridos procuram combinar as vantagens de ambas as tecnologias, utilizando supercondensadores para absorção de potência instantânea e baterias para armazenamento energético de longa duração. A escolha final depende dos requisitos específicos de cada instalação, do perfil de utilização e do nível de criticidade pretendido.

3.9.4 Resultados Obtidos para o Caso de Estudo

A ferramenta foi aplicada ao caso de estudo considerado nesta dissertação, correspondente a um edifício residencial de oito pisos com características compatíveis com a arquitetura desenvolvida.

Os principais resultados obtidos encontram-se apresentados na Tabela 3.14.

Tabela 3.14: Resultados obtidos para o caso de estudo residencial de 8 pisos

Parâmetro	Valor
Número de pisos	8
Massa desequilibrada	315 kg
Energia elétrica por piso	12.36 kJ
Energia até ao piso térreo	98.88 kJ
Potência de regime	4.12 kW
Potência de pico	4.33 kW
Energia de emergência	494.42 kJ
Energia dimensionada com margem	642.75 kJ
Capacitância mínima equivalente	18.36 F
Energia mínima de bateria	178.54 Wh
Energia recomendada de bateria	214.25 Wh
Potência recomendada para o DAB	5.41 kW
Corrente máxima no lado de armazenamento	10.83 A
SOC mínimo de reserva	7.14 %

A Figura 3.19 apresenta a influência da capacitância do supercondensador na autonomia energética disponível.

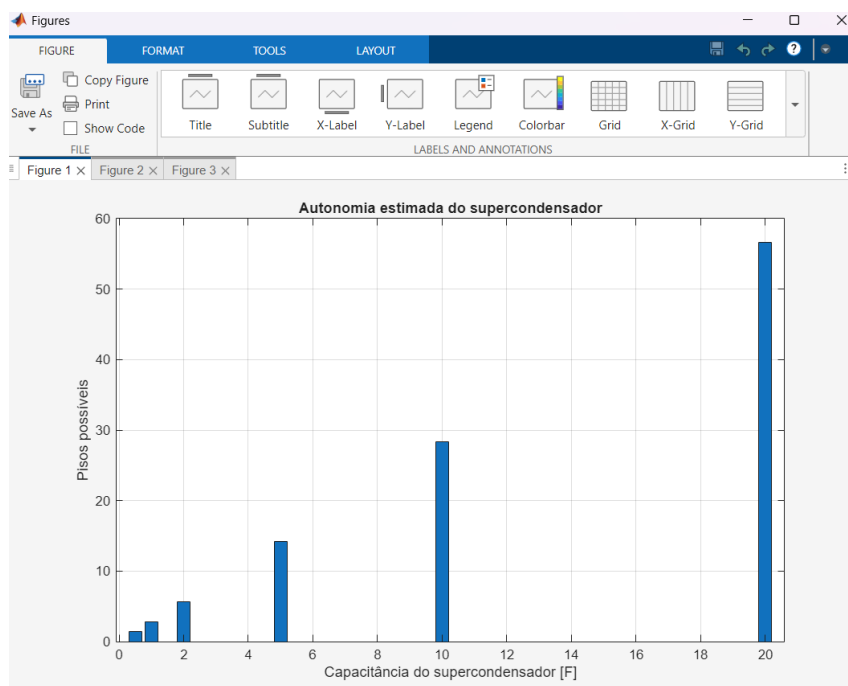


Figura 3.19: Autonomia estimada do supercondensador em função da capacitância.

3.9.5 Discussão dos Resultados

Importa salientar que os resultados apresentados correspondem a um dimensionamento para condições de operação conservadoras. Na maioria das situações reais, os requisitos energéticos serão inferiores aos calculados, uma vez que raramente ocorre simultaneamente o percurso máximo e a condição de carga mais desfavorável. Ainda assim, o dimensionamento para o pior caso permite garantir elevados níveis de segurança e disponibilidade do sistema, objetivos prioritários da arquitetura proposta.

Os resultados obtidos mostram que os requisitos energéticos associados ao cenário residencial considerado são relativamente modestos quando comparados com as capacidades disponíveis em sistemas comerciais de armazenamento atualmente disponíveis no mercado.

Verifica-se igualmente que a potência requerida ao conversor DAB permanece compatível com a arquitetura proposta, sendo obtida uma potência recomendada de aproximadamente 5.4 kW para assegurar margem suficiente durante condições transitórias.

Embora os requisitos mínimos possam ser satisfeitos através da utilização exclusiva de baterias ou de supercondensadores, a escolha da tecnologia mais adequada depende do objetivo operacional pretendido. Soluções baseadas em supercondensadores apresentam vantagens em aplicações focadas na recuperação de energia regenerada e em evacuações de curta duração, enquanto sistemas baseados em baterias oferecem maior autonomia e flexibilidade operacional. Para aplicações mais exigentes poderá ainda ser considerada a utilização de sistemas híbridos, combinando as vantagens de ambas as tecnologias.

3.10 Sistema de Gestão de Energia (EMS)

3.10.1 Objetivos do Sistema de Gestão de Energia

O Sistema de Gestão de Energia (*Energy Management System* – EMS) constitui a camada supervisória da arquitetura desenvolvida, sendo responsável pela coordenação dos diferentes subsistemas energéticos presentes no elevador. O seu principal objetivo consiste em garantir uma operação segura, eficiente e energeticamente otimizada, definindo em cada instante o destino da energia disponível e o modo de funcionamento mais adequado para cada condição de operação.

Ao contrário dos controladores locais implementados nos conversores de potência, cuja função é regular variáveis elétricas específicas, o EMS atua a um nível superior, tomando decisões globais com base no estado da rede elétrica, na tensão do barramento DC, na potência do motor e no estado de carga do sistema de armazenamento.

Desta forma, o EMS é responsável por coordenar o funcionamento do AFE, do inversor, do conversor DAB e do brake chopper, assegurando simultaneamente a recuperação de energia regenerada, a manutenção de uma reserva mínima de energia para situações de emergência e a proteção global do sistema.

3.10.2 Modelo Conceptual e Fluxograma de Funcionamento

A Figura 3.20 apresenta o fluxograma conceptual desenvolvido para o sistema de gestão de energia proposto.

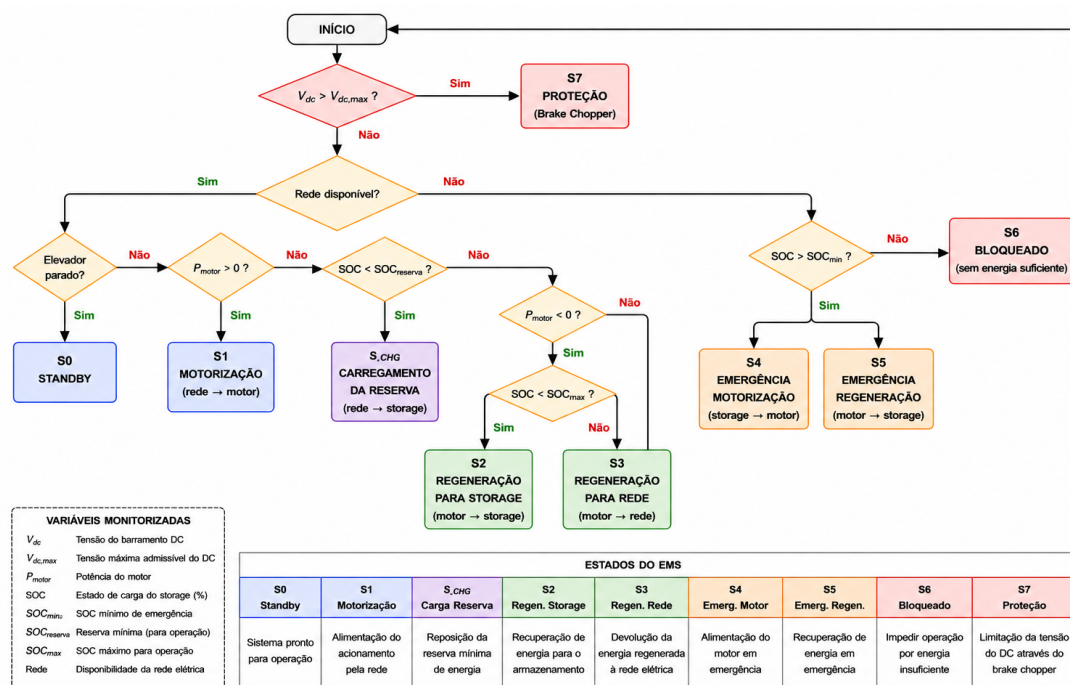


Figura 3.20: Fluxograma conceptual do sistema de gestão de energia.

O EMS monitoriza continuamente um conjunto reduzido de variáveis consideradas suficientes para a tomada de decisão global do sistema:

- Tensão do barramento DC (V_{dc});
- Disponibilidade da rede elétrica ($grid_{ok}$);
- Potência do motor (P_{motor});
- Estado de carga do sistema de armazenamento (SOC);
- Limites mínimo e máximo de operação do armazenamento.

Com base nestas variáveis, o sistema seleciona automaticamente o estado de funcionamento mais adequado, ativando ou desativando os diferentes conversores de potência presentes na arquitetura.

A Tabela 3.15 resume os estados considerados pelo EMS.

Tabela 3.15: Estados considerados pelo EMS

Estado	Designação	Objetivo principal
S0	Standby	Sistema pronto para operação
S1	Motorização	Alimentação do acionamento pela rede
S_{CHG}	Carregamento da reserva	Reposição da reserva mínima de energia
S2	Regeneração para storage	Maximização da recuperação de energia
S3	Regeneração para rede	Evitar sobrecarga do armazenamento
S4	Emergência motorização	Operação através do armazenamento
S5	Emergência regeneração	Recuperação de energia em emergência
S6	Bloqueado	Impedir operação sem energia suficiente
S7	Proteção	Limitação da tensão do barramento DC

3.10.3 Descrição dos Modos de Operação

Em condições normais de funcionamento, quando o elevador se encontra parado, o sistema permanece no estado S0 (Standby), mantendo os subsistemas prontos para operação. Quando é solicitado movimento e a potência do motor é positiva, o EMS entra no estado S1 (Motorização), sendo a energia fornecida pela rede elétrica através do AFE e do barramento DC.

Sempre que o estado de carga do sistema de armazenamento desce abaixo da reserva mínima definida, é ativado o estado de carregamento da reserva (S_{CHG}), permitindo repor a energia necessária para garantir futuras operações de emergência.

Durante o funcionamento regenerativo do elevador ($P_{motor} < 0$), o EMS procura prioritariamente armazenar a energia recuperada. Assim, enquanto o armazenamento não atingir o limite máximo de carga, o sistema opera em S2 (Regeneração para Storage), encaminhando a energia regenerada para o sistema de armazenamento através do conversor DAB.

Quando o armazenamento atinge o limite máximo definido, o sistema transita para S3 (Regeneração para Rede), permitindo que a energia regenerada seja devolvida à rede elétrica através do AFE, evitando a sobrecarga do sistema de armazenamento.

Na ausência da rede elétrica, o EMS entra em modo de emergência. Se existir energia suficiente disponível, o sistema opera em S4 (Emergência Motorização), utilizando o armazenamento para alimentar o acionamento do elevador. Caso ocorra regeneração durante esta operação, o EMS pode transitar para S5 (Emergência Regeneração), permitindo recuperar parte da energia mecânica disponível e aumentar a autonomia do sistema.

Se o estado de carga do armazenamento descer abaixo do limite mínimo definido para operação segura, o EMS entra em S6 (Bloqueado), impedindo novas deslocamentos e garantindo que o elevador permanece numa condição segura.

Por fim, sempre que a tensão do barramento DC ultrapassa o limite máximo admissível, é ativado o estado S7 (Proteção), que utiliza o brake chopper para dissipar o excesso de energia e limitar a tensão do barramento DC, protegendo os restantes componentes do sistema.

3.10.4 Integração dos Subsistemas

A arquitetura desenvolvida foi concebida de forma modular, sendo cada subsistema modelado e validado individualmente. O EMS atua como elemento integrador, coordenando o funcionamento conjunto do AFE, do inversor, do conversor DAB, do sistema de armazenamento e do brake chopper.

Através desta abordagem, torna-se possível gerir de forma centralizada os diferentes fluxos energéticos presentes no sistema, maximizando a recuperação de energia regenerada, garantindo a disponibilidade de energia para operação de emergência e assegurando simultaneamente a proteção dos equipamentos.

Desta forma, o EMS constitui o elemento responsável pela coordenação global da arquitetura proposta, permitindo que os diferentes subsistemas operem de forma integrada e coerente com os objetivos de eficiência energética, segurança e continuidade de serviço definidos para esta dissertação.

Capítulo 4

Validação dos Subsistemas

4.1 Estratégia de Validação

A validação do sistema proposto foi realizada de forma modular, recorrendo à análise individual dos diferentes subsistemas desenvolvidos ao longo da presente dissertação. Esta abordagem permitiu avaliar separadamente o comportamento de cada conversor, bem como das respetivas estratégias de controlo, simplificando a identificação e interpretação dos fenómenos observados.

Foram considerados os quatro subsistemas físicos implementados em ambiente MATLAB/Simulink: o conversor Active Front-End (AFE), o sistema de acionamento baseado num motor síncrono de ímanes permanentes (PMSM), o conversor Dual Active Bridge (DAB) e o sistema de proteção do barramento DC baseado num Brake Chopper.

Para cada subsistema foram definidos cenários de ensaio representativos das condições de funcionamento esperadas num sistema de elevação com capacidade de regeneração de energia e alimentação de emergência. Em cada caso foram analisadas as principais grandezas elétricas, mecânicas e energéticas associadas ao respetivo funcionamento, permitindo verificar o correto desempenho das malhas de controlo implementadas.

A validação incidiu particularmente sobre a capacidade de regulação das variáveis controladas, a estabilidade das respostas obtidas e a coerência dos fluxos de potência observados em cada modo de operação. Desta forma, procurou-se demonstrar que os diferentes subsistemas cumprem os requisitos funcionais definidos para a arquitetura proposta.

4.2 Validação do Conversor AFE

4.2.1 Descrição do Ensaio

A validação do conversor Active Front-End (AFE) foi realizada em ambiente MATLAB/Simulink através da aplicação de uma perturbação controlada ao barramento DC. Para tal, foi utilizada uma fonte de corrente ideal ligada ao barramento, permitindo simular diferentes condições de transferência de potência entre a rede elétrica e o barramento DC sem recorrer à integração dos restantes subsistemas.

O principal objetivo do ensaio consistiu em avaliar a capacidade do conversor AFE para regular a tensão do barramento perante situações de consumo e regeneração de energia.

Foi aplicado ao barramento DC o perfil de corrente apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Perfil de corrente aplicado ao barramento DC.

Intervalo de tempo (s)	Corrente aplicada (A)
0.0 – 0.5	0
0.5 – 0.85	-7
0.85 – 1.2	0
1.2 – 1.6	+7
1.6 – 2.0	0

A amplitude de 7 A foi selecionada por corresponder aproximadamente a uma potência de:

$$P = V_{dc} \cdot I_{dc} \quad (4.1)$$

$$P = 800 \times 7 = 5600 \text{ W} \quad (4.2)$$

correspondendo a aproximadamente 5.6 kW, valor superior à potência máxima estimada para o caso de estudo considerado. Desta forma, foi possível validar o funcionamento do sistema numa condição conservativa.

Durante o intervalo correspondente à aplicação de corrente negativa, a fonte retira energia do barramento DC, simulando uma condição de consumo de potência. Nesta situação, o conversor AFE absorve energia da rede elétrica para manter a tensão do barramento regulada.

Por outro lado, durante o intervalo correspondente à aplicação de corrente positiva, a fonte injeta energia no barramento DC, simulando uma condição regenerativa. Nestas circunstâncias, o conversor transfere potência do barramento para a rede elétrica.

Este ensaio permite assim validar simultaneamente a malha externa de regulação da tensão do barramento DC e as malhas internas de controlo das correntes no referencial síncrono dq.

4.2.2 Resultados Obtidos

A Figura 4.1 apresenta a evolução das correntes no referencial síncrono dq ao longo do ensaio realizado.

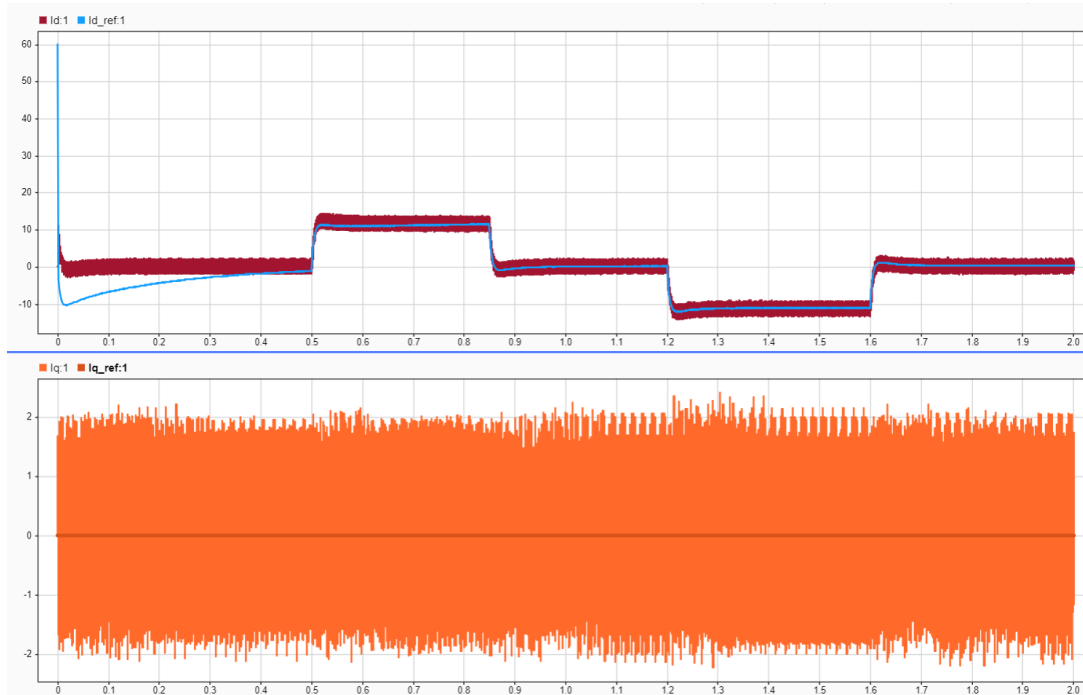


Figura 4.1: Correntes I_d , $I_{d,ref}$, I_q e $I_{q,ref}$.

Observa-se que a componente ativa da corrente, I_d , acompanha adequadamente a respectiva referência gerada pela malha externa de tensão. Durante o intervalo compreendido entre 0.5 s e 0.85 s, correspondente ao consumo de potência no barramento DC, I_d assume valores positivos, indicando transferência de potência da rede para o barramento.

Posteriormente, entre 1.2 s e 1.6 s, I_d assume valores negativos, evidenciando a transferência de potência do barramento DC para a rede elétrica. Este comportamento confirma a capacidade de operação bidirecional do conversor.

Verifica-se ainda que a componente I_q permanece próxima da referência nula durante todo o ensaio, apresentando apenas pequenas oscilações associadas ao processo de comutação e discretização do sistema de controlo. Este resultado indica que a potência reativa trocada com a rede se mantém reduzida, sendo a transferência energética realizada essencialmente através da componente ativa da corrente.

A Figura 4.2 apresenta as correntes trifásicas medidas do lado da rede elétrica.

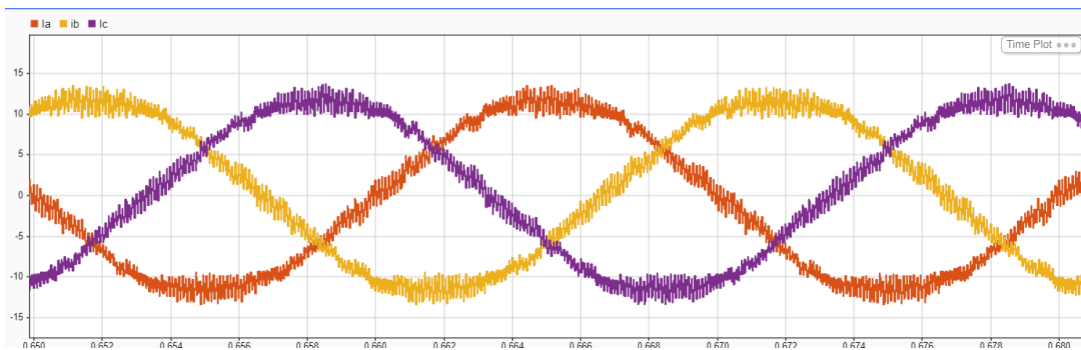


Figura 4.2: Correntes trifásicas da rede.

Observa-se que as correntes apresentam comportamento aproximadamente sinusoidal e equilibrado, mantendo o desfasamento característico de 120° entre fases. Verifica-se igualmente que a amplitude das correntes aumenta quando a componente I_d assume valores mais elevados, refletindo o aumento da potência ativa transferida entre a rede elétrica e o barramento DC.

A Figura 4.3 apresenta simultaneamente a evolução da tensão do barramento DC e das potências médias calculadas do lado AC e do lado DC.

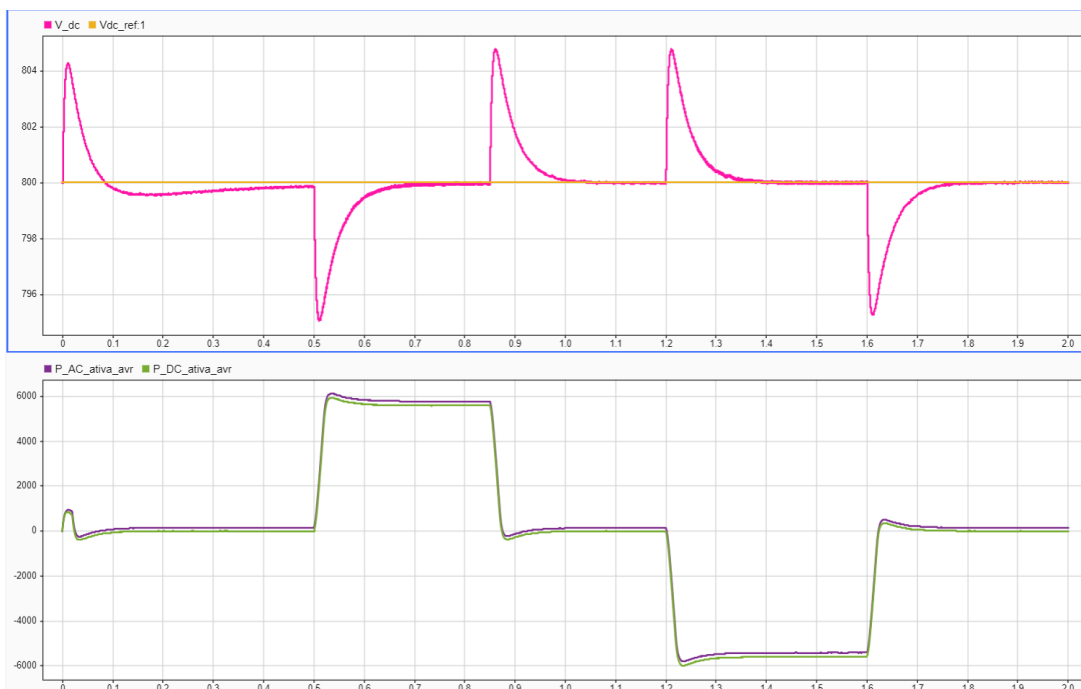


Figura 4.3: Tensão do barramento DC e potências médias.

Observa-se que a tensão do barramento permanece próxima do valor de referência de 800 V durante todo o ensaio. Após cada variação da corrente aplicada ao barramento surgem pequenas oscilações transitórias, rapidamente compensadas pela ação da malha de controlo, restabelecendo o valor de referência.

Relativamente às potências médias, verifica-se uma elevada concordância entre a potência do lado AC e a potência do lado DC, demonstrando a coerência energética do modelo implementado.

Durante o intervalo de consumo de potência, ambas assumem valores positivos, correspondendo à transferência de energia da rede para o barramento. Durante o intervalo regenerativo, ambas assumem valores negativos, indicando a devolução de energia do barramento para a rede elétrica.

Os resultados obtidos demonstram que o conversor AFE é capaz de regular eficazmente a tensão do barramento DC, manter correntes equilibradas do lado da rede e realizar transferência bidirecional de potência, cumprindo assim os objetivos definidos para este subsistema.

4.3 Validação do Sistema de Acionamento com PMSM

4.3.1 Descrição do Ensaio

A validação do sistema de acionamento foi realizada utilizando a carga máxima considerada para o caso de estudo desenvolvido ao longo da dissertação. Esta condição corresponde ao cenário mais exigente para o acionamento, uma vez que origina a maior diferença de massas entre a cabine carregada e o contrapeso, resultando no maior binário resistente aplicado ao motor.

O ensaio foi realizado considerando uma carga transportada de 630 kg, mantendo-se este valor constante durante toda a simulação. Considerando a massa da cabine carregada e a massa do contrapeso utilizadas no modelo mecânico, obtém-se uma diferença de massas aproximada de 315 kg, responsável pelo esforço mecânico aplicado ao sistema de acionamento.

Foi utilizado um perfil de velocidade implementado através de um bloco Signal Builder em ambiente MATLAB/Simulink. Ao contrário de uma referência em degrau, este perfil inclui rampas de aceleração e desaceleração, permitindo representar de forma mais realista o funcionamento de um elevador elétrico.

O perfil contempla diferentes modos de funcionamento ao longo dos 5.5 s de simulação. Inicialmente o sistema permanece parado, seguindo-se uma fase de aceleração até velocidade positiva, uma fase de velocidade aproximadamente constante, uma paragem intermédia, uma nova aceleração até velocidade negativa e uma paragem final.

A velocidade máxima de referência utilizada corresponde aproximadamente a 375 rad/s, equivalente a cerca de 3580 rpm, valor obtido a partir do modelo mecânico desenvolvido no Capítulo 3 e compatível com a gama de funcionamento típica de máquinas síncronas de ímanes permanentes utilizadas em sistemas de tração de elevadores.

Esta estratégia permite avaliar, num único ensaio, o comportamento do acionamento em condições de motorização e regeneração, possibilitando a análise simultânea da resposta dinâmica do sistema, do comportamento das correntes no referencial dq, do binário eletromagnético desenvolvido e dos fluxos de potência associados aos diferentes modos de operação.

4.3.2 Velocidade e Fluxo de Potência

A Figura 4.4 apresenta a evolução da velocidade angular do motor e dos fluxos de potência associados ao sistema de acionamento.

Observa-se que a velocidade desenvolvida pelo motor acompanha adequadamente a referência imposta ao longo de todo o ensaio. Durante as fases de aceleração verifica-se um pequeno atraso associado à dinâmica mecânica do sistema e às limitações de binário disponíveis, sendo posteriormente atingido o valor de referência com erro reduzido em regime permanente.

Verifica-se igualmente que a resposta durante as fases de desaceleração apresenta uma dinâmica mais rápida, resultado da contribuição simultânea da travagem elétrica e da carga mecânica aplicada ao sistema.

Durante a inversão de sentido observa-se um seguimento adequado da referência, demonstrando a capacidade do acionamento para operar em ambos os sentidos de rotação.

Relativamente aos fluxos de potência, verifica-se que durante a fase de subida a potência assume valores positivos, indicando transferência de energia do barramento DC para a máquina elétrica e consequente funcionamento em motorização. Durante a fase de descida observa-se a inversão do sinal da potência, evidenciando o funcionamento regenerativo do sistema e a devolução de energia ao barramento DC.

As potências medidas nos diferentes pontos do sistema apresentam uma evolução coerente ao longo do ensaio, observando-se pequenas diferenças associadas às perdas existentes nos conversores e na máquina elétrica.

Os resultados obtidos demonstram que o acionamento é capaz de operar corretamente tanto em motorização como em regeneração, assegurando simultaneamente o seguimento da referência de velocidade e a gestão adequada dos fluxos energéticos associados ao sistema de elevação.



Figura 4.4: Velocidade angular do motor e fluxos de potência do acionamento.

4.3.3 Correntes no Referencial dq e Binário Eletromagnético

A Figura 4.5 apresenta a evolução das correntes no referencial síncrono dq e do binário eletromagnético desenvolvido pela máquina.

Observa-se que a corrente em quadratura I_q , responsável pela produção de binário, acompanha adequadamente a respetiva referência gerada pelo controlador de velocidade. Durante as fases de aceleração verificam-se valores mais elevados de corrente, refletindo a necessidade de desenvolver binário adicional para acelerar o conjunto mecânico. Em regime aproximadamente permanente, a corrente estabiliza em valores compatíveis com a carga aplicada.

Verifica-se igualmente a alteração do sinal da corrente I_q durante determinadas fases transitórias do ensaio, evidenciando a adaptação do sistema às diferentes condições de funcionamento e aos diferentes fluxos energéticos exigidos pelo acionamento.

O binário eletromagnético acompanha diretamente a evolução da corrente I_q , confirmando a relação existente entre ambas as variáveis e o correto funcionamento da estratégia de controlo vetorial implementada.

Relativamente à componente direta da corrente, verifica-se que I_d permanece próxima da referência imposta, igual a zero. Apesar da existência de oscilações associadas ao processo de modulação PWM e à dinâmica dos controladores, a componente direta mantém valores reduzidos quando comparada com a corrente de binário, confirmando o desacoplamento entre fluxo e binário característico da estratégia FOC.

Os maiores valores de corrente e binário ocorrem durante as fases transitórias de aceleração e desaceleração, situação expectável devido à necessidade de vencer simultaneamente a carga mecânica aplicada e a inércia do sistema.

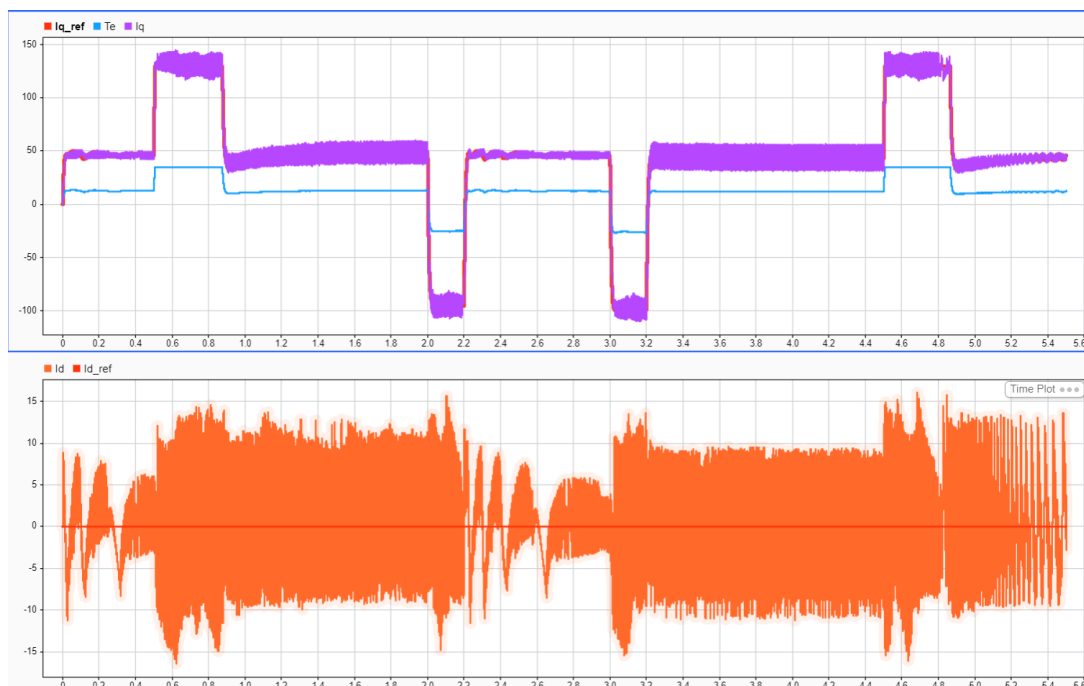


Figura 4.5: Correntes no referencial dq e binário eletromagnético.

4.3.4 Correntes Trifásicas da Máquina

A Figura 4.6 apresenta um detalhe das correntes trifásicas da máquina em regime de funcionamento.

Observa-se que as correntes das três fases apresentam formas aproximadamente sinusoidais e uma defasagem próxima de 120° , comportamento esperado para uma máquina síncrona de ímanes permanentes alimentada por um inversor trifásico.

Verifica-se ainda que a frequência das correntes varia de acordo com a velocidade de rotação do motor, aumentando durante os períodos de maior velocidade e diminuindo durante os períodos de menor velocidade, conforme previsto pela teoria de funcionamento da máquina.

Os maiores valores de corrente são observados durante as fases de aceleração e desaceleração, onde o acionamento necessita de desenvolver binário adicional para acelerar ou travar o sistema mecânico. Em regime aproximadamente permanente, as correntes apresentam amplitudes mais reduzidas e praticamente constantes.

As pequenas oscilações de alta frequência observadas nas formas de onda resultam da estratégia de modulação PWM utilizada pelo inversor. Verifica-se ainda que as correntes permanecem equilibradas entre fases, não sendo observadas assimetrias significativas.

Os resultados obtidos confirmam o correto funcionamento do inversor e a adequada geração do sistema trifásico necessário ao acionamento da máquina elétrica.

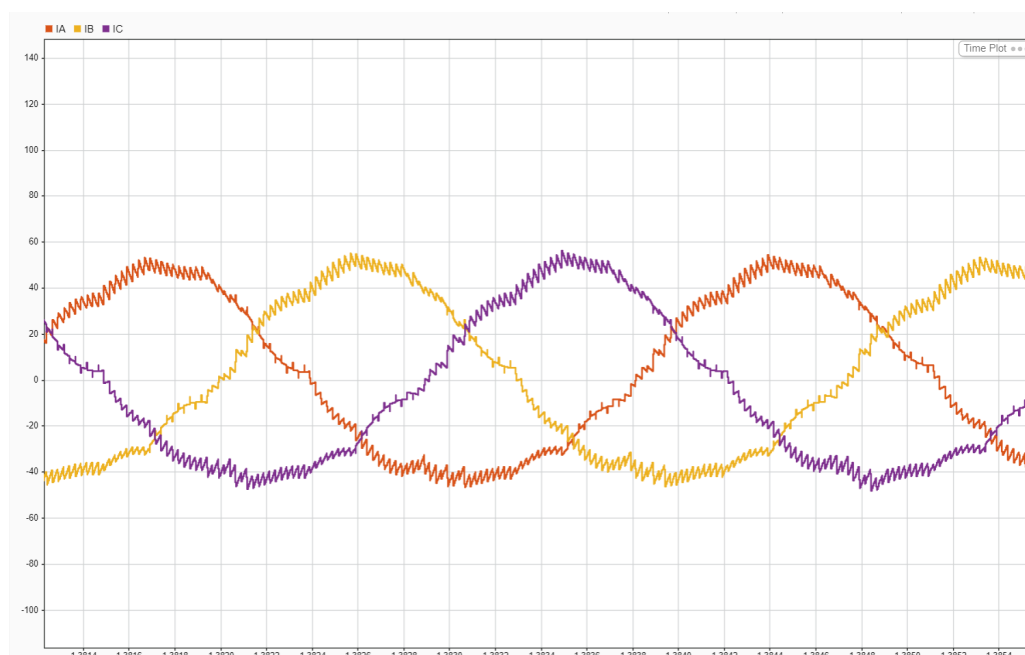


Figura 4.6: Correntes trifásicas da PMSM.

4.3.5 Conclusão da Validação do Acionamento

Os resultados apresentados demonstram que o sistema de acionamento baseado numa máquina síncrona de ímanes permanentes e controlo vetorial orientado pelo fluxo é capaz de cumprir os

requisitos definidos para o caso de estudo considerado.

Verificou-se o correto seguimento da referência de velocidade, o adequado funcionamento das malhas de corrente no referencial dq, a produção do binário necessário durante os diferentes regimes de funcionamento e a capacidade de operar tanto em motorização como em regeneração.

Adicionalmente, as correntes trifásicas apresentaram comportamento equilibrado e coerente com o funcionamento esperado da máquina elétrica, confirmando a correta implementação do inversor e da estratégia de controlo adotada. Com base nos resultados obtidos, considera-se validado o subsistema de acionamento desenvolvido para a arquitetura proposta.

4.4 Validação do Conversor DAB

4.4.1 Descrição dos Ensaios

A validação do conversor Dual Active Bridge (DAB) foi realizada através de três ensaios independentes, com o objetivo de avaliar a capacidade de transferência bidirecional de potência e a regulação da tensão do sistema de armazenamento em torno do valor nominal de 400 V.

Tal como descrito no Capítulo 3, o DAB é responsável pela interface bidirecional entre o barramento DC principal de 800 V e o sistema de armazenamento de energia de 400 V. O controlo é efetuado através da variação do *phase shift* entre as tensões quadradas geradas pelas duas pontes ativas, mantendo um *duty-cycle* constante de 50%.

Foram considerados os seguintes cenários:

- Ensaio 1 – Descarregamento do armazenamento: tensão inicial de 450 V;
- Ensaio 2 – Carregamento do armazenamento: tensão inicial de 350 V;
- Ensaio 3 – Equilíbrio: tensão inicial de 400 V.

Em todos os ensaios foi utilizada uma referência de tensão de 400 V e um tempo de simulação de 0.5 s.

O objetivo consiste em verificar:

- a capacidade de regulação da tensão do armazenamento;
- a transferência bidirecional de potência;
- o funcionamento do controlador PI;
- a atuação do *phase shift* como variável de controlo;
- a coerência dos fluxos de potência entre ambos os lados do conversor.

4.4.2 Ensaio 1 – Descarregamento do armazenamento (450 V $\rightarrow$ 400 V)

A Figura 4.7 apresenta a evolução da tensão do sistema de armazenamento e do *phase shift* durante o processo de descarga.



Figura 4.7: Regulação da tensão do armazenamento durante o ensaio de descarregamento.

Observa-se que a tensão inicial de 450 V é progressivamente reduzida até ao valor de referência de 400 V. Durante este processo, o controlador PI gera um *phase shift* negativo, atingindo aproximadamente -15° , promovendo a transferência de energia do lado do armazenamento para o barramento DC principal.

À medida que a tensão se aproxima da referência, o erro diminui e o *phase shift* converge para valores próximos de zero, reduzindo gradualmente a potência transferida.

A Figura 4.8 apresenta um detalhe das tensões geradas pelas duas pontes ativas.

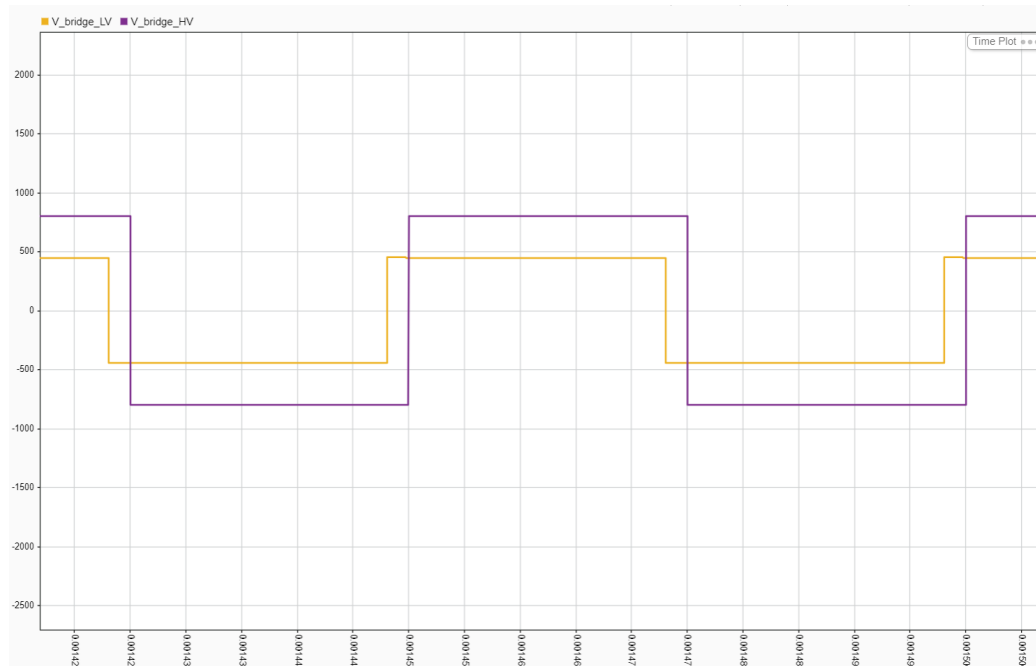


Figura 4.8: Tensões das pontes HV e LV durante a transferência de potência.

Verifica-se que ambas as pontes produzem tensões quadradas com *duty-cycle* de 50%, existindo um desfasamento temporal entre elas responsável pela transferência de potência. Este resultado confirma o princípio de funcionamento do DAB baseado em controlo por *phase shift*.

A Figura 4.9 apresenta as potências médias medidas nos dois lados do conversor.

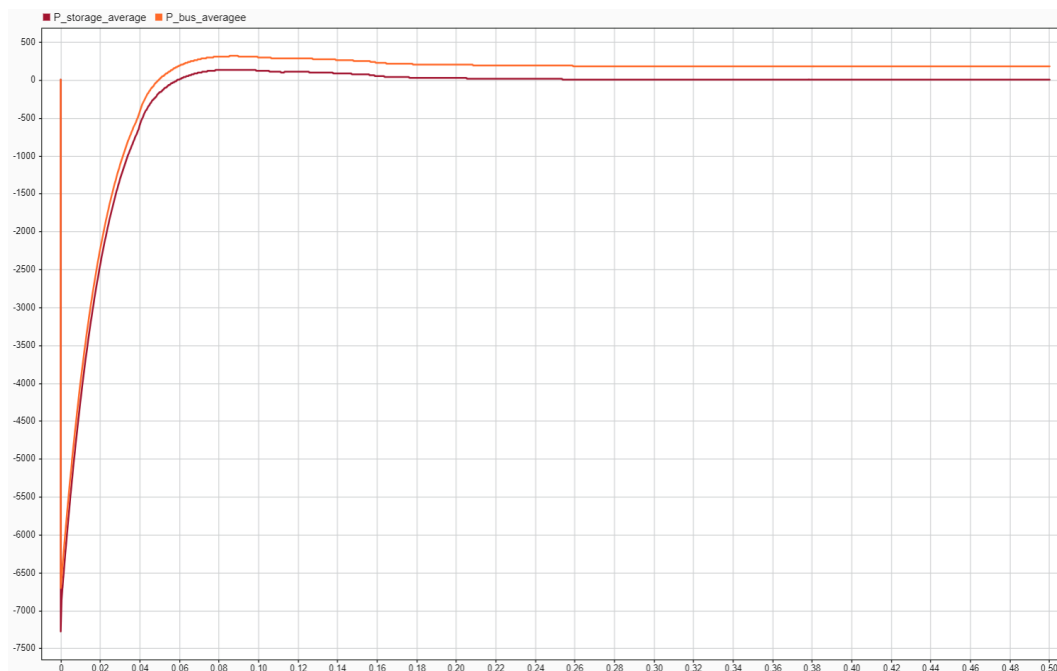


Figura 4.9: Potências médias durante o descarregamento do armazenamento.

No instante inicial verifica-se uma transferência de potência elevada, superior a 6 kW, necessária para corrigir rapidamente o erro de tensão existente. À medida que a tensão converge para 400 V, a potência transferida diminui progressivamente até valores próximos de zero.

Os resultados demonstram que o conversor é capaz de transferir energia do sistema de armazenamento para o barramento DC, validando o modo de descarga.

4.4.3 Ensaio 2 – Carregamento do armazenamento (350 V $\rightarrow$ 400 V)

A Figura 4.10 apresenta a evolução da tensão do armazenamento e do *phase shift* para uma tensão inicial de 350 V.

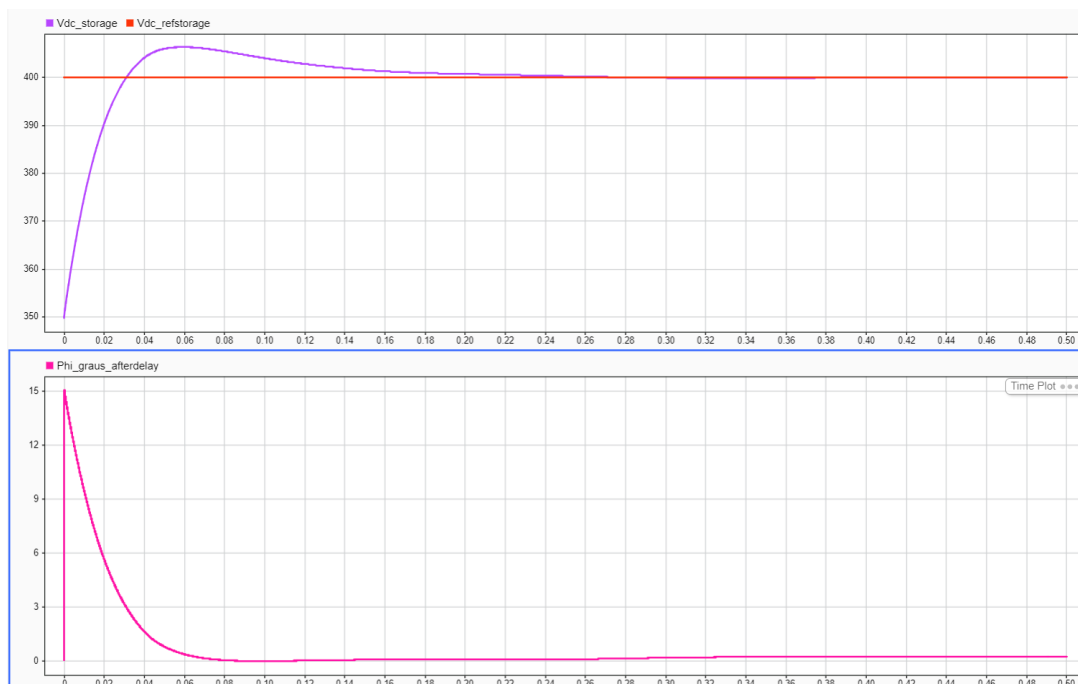


Figura 4.10: Regulação da tensão do armazenamento durante o ensaio de carregamento.

Neste cenário a tensão inicial encontra-se abaixo do valor de referência. Consequentemente, o controlador gera um *phase shift* positivo, atingindo aproximadamente $+15^\circ$, promovendo a transferência de potência do barramento DC para o sistema de armazenamento.

Observa-se uma rápida subida da tensão até valores ligeiramente superiores à referência, seguida de uma estabilização progressiva em torno dos 400 V.

À medida que o erro diminui, o *phase shift* reduz-se gradualmente até valores próximos de zero, reduzindo a potência transferida.

A Figura 4.11 apresenta as potências médias medidas durante o carregamento.

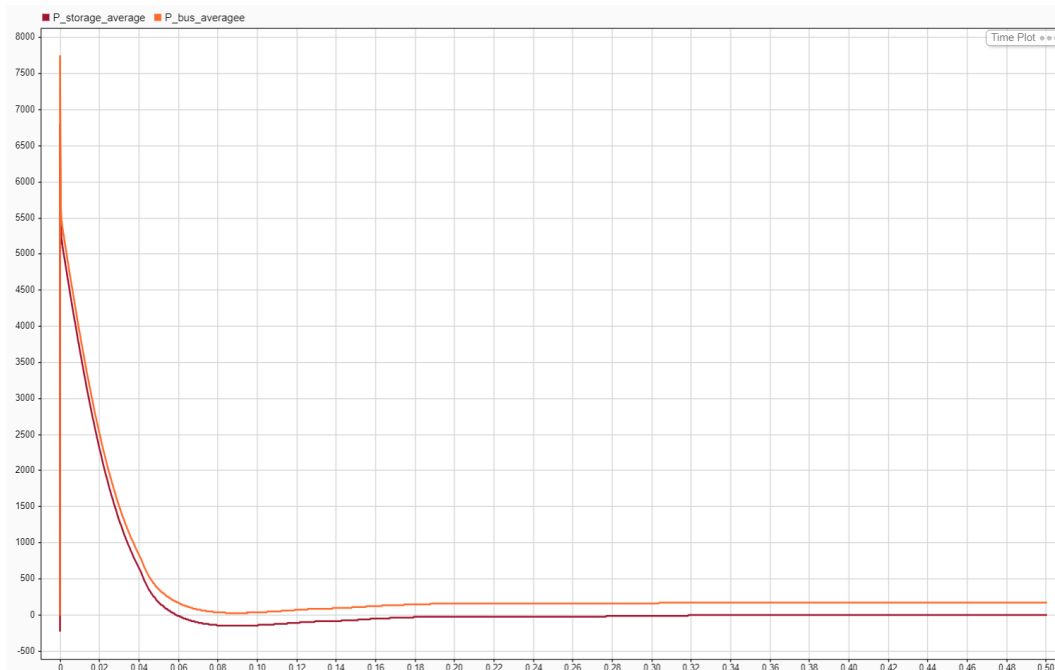


Figura 4.11: Potências médias durante o carregamento do armazenamento.

Verifica-se inicialmente uma transferência de potência elevada, superior a 7 kW, necessária para elevar rapidamente a tensão do armazenamento. Posteriormente, a potência diminui à medida que a tensão converge para o valor de referência.

Este ensaio confirma a capacidade do DAB em transferir energia no sentido inverso relativamente ao ensaio anterior, validando a operação bidirecional do conversor.

4.4.4 Ensaio 3 – Condição de equilíbrio (400 V → 400 V)

Para validar o comportamento do sistema em condições de equilíbrio foi realizado um terceiro ensaio com tensão inicial igual à referência.

A Figura 4.12 apresenta a evolução da tensão do armazenamento e do respetivo *phase shift*.

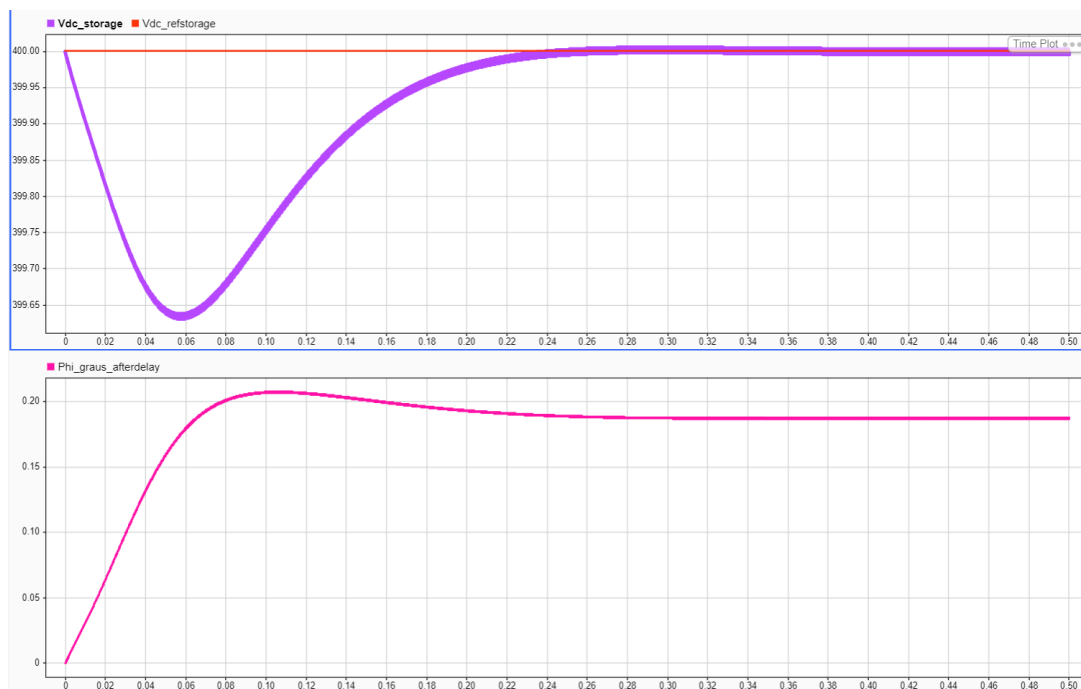


Figura 4.12: Regulação da tensão do armazenamento em condição de equilíbrio.

Como a tensão inicial coincide com a referência, o erro de controle é praticamente nulo. Consequentemente, o *phase shift* permanece muito próximo de zero durante toda a simulação, não sendo necessária uma transferência significativa de potência entre os dois lados do conversor.

A Figura 4.13 apresenta as potências médias medidas.

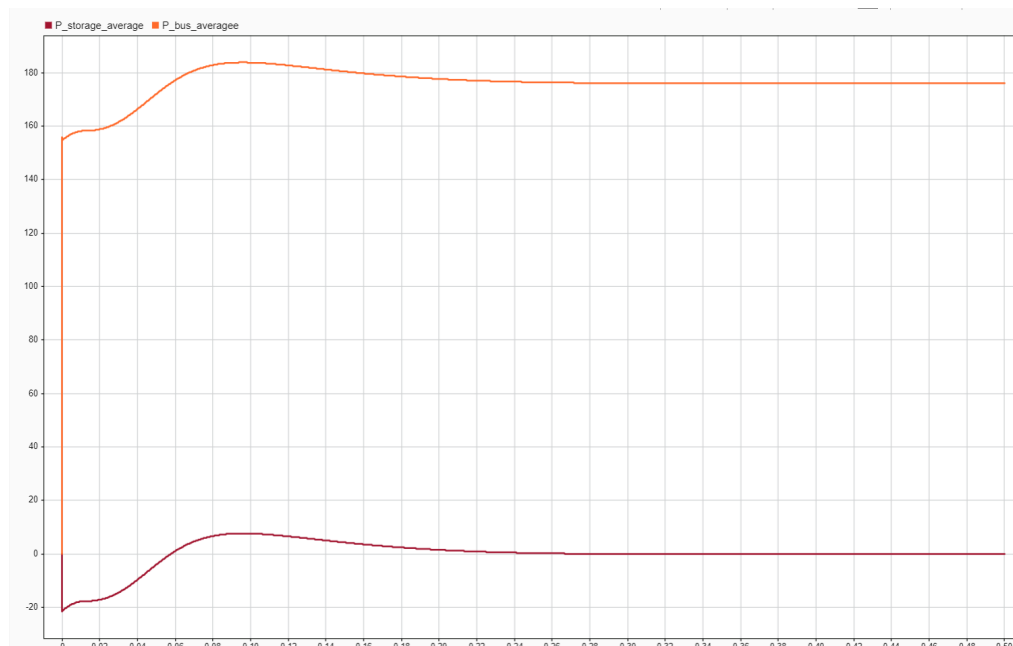


Figura 4.13: Potências médias em condição de equilíbrio.

Observa-se que a potência transferida é muito reduzida quando comparada com os ensaios anteriores. Os pequenos valores residuais observados resultam das perdas dos semicondutores, dos elementos passivos e dos efeitos numéricos associados à simulação.

Este comportamento era esperado e demonstra que o controlador mantém o sistema em equilíbrio quando a tensão do armazenamento já se encontra no valor pretendido.

4.4.5 Discussão dos Resultados

Os resultados obtidos permitem validar o funcionamento do conversor DAB desenvolvido.

Nos ensaios de carregamento e descarregamento observou-se a convergência da tensão do armazenamento para o valor de referência de 400 V, comprovando o correto funcionamento da malha de controlo implementada.

Adicionalmente, verificou-se que:

- *phase shift* positivo promove transferência de potência do barramento DC para o armazenamento;
- *phase shift* negativo promove transferência de potência do armazenamento para o barramento DC;
- *phase shift* próximo de zero resulta numa transferência de potência praticamente nula;
- as duas pontes ativas mantêm *duty-cycle* constante de 50%, sendo a potência controlada exclusivamente através do desfasamento entre as tensões geradas;
- os fluxos de potência observados são coerentes com a teoria de funcionamento do conversor DAB.

Desta forma, considera-se validada a capacidade de transferência bidirecional de energia e a regulação da tensão do sistema de armazenamento, cumprindo os objetivos definidos para este subsistema.

4.5 Validação do Sistema Brake Chopper

Com o objetivo de validar o funcionamento do sistema de proteção por Brake Chopper, foi realizado um ensaio de sobretensão controlada sobre o barramento DC. O modelo utilizado corresponde ao apresentado no Capítulo 3, sendo constituído por um condensador de barramento de 5 mF, uma resistência de travagem de 100 Ω , um IGBT de comutação e uma lógica de controlo baseada num bloco Relay com histerese.

Para provocar a atuação do sistema, foi imposta uma tensão inicial de 850 V ao condensador do barramento DC, valor superior ao limiar de ativação definido para o Brake Chopper. Adicionalmente, foi ligada em paralelo ao barramento uma fonte de corrente controlada, utilizada para representar a injeção de energia regenerada no barramento DC. Durante os primeiros 0.2 s da simulação a

corrente injetada foi mantida em 0 A, sendo posteriormente aplicada uma corrente constante de 1 A até ao final do ensaio.

A lógica de controlo implementada estabelece a ativação do Brake Chopper quando a tensão do barramento ultrapassa os 830 V e a sua desativação quando a tensão desce abaixo dos 810 V. Desta forma é criada uma banda de histerese de 20 V que evita comutações excessivamente frequentes do semicondutor.

A Figura 4.14 apresenta a evolução da tensão do barramento DC e do sinal de comando aplicado ao IGBT durante o ensaio.

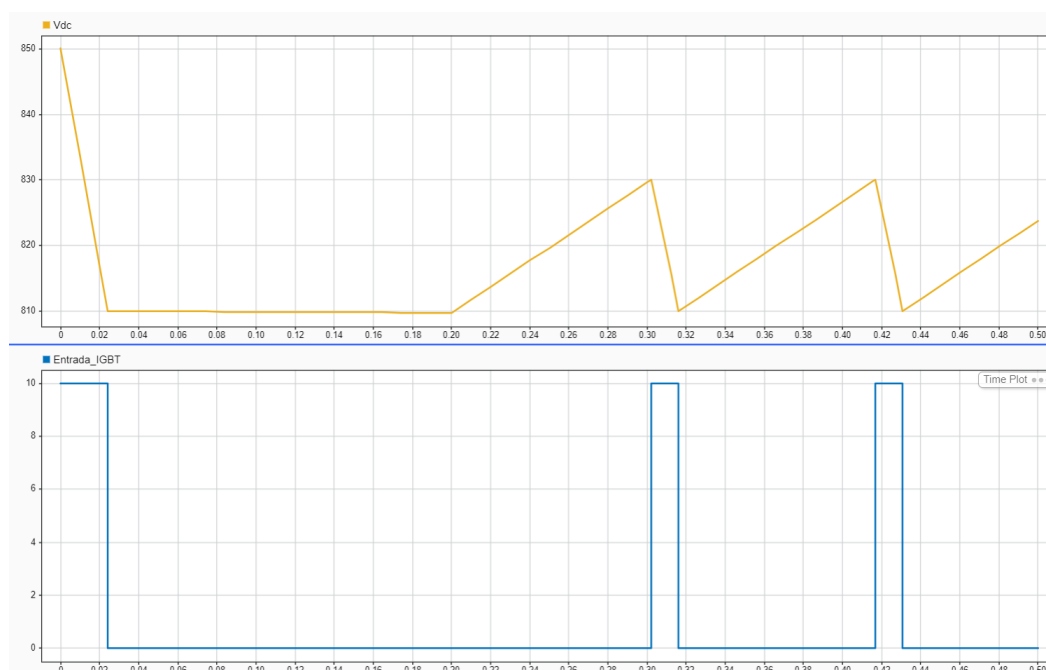


Figura 4.14: Evolução da tensão do barramento DC e sinal de comando do IGBT.

Observa-se que, no instante inicial, a tensão do barramento se encontra acima do limiar de ativação, levando à entrada imediata em condução do IGBT. Como consequência, a resistência de travagem absorve energia do condensador e a tensão do barramento diminui rapidamente até atingir aproximadamente 810 V, instante em que o sistema é desativado.

A partir de 0,2 s, a corrente regenerada simulada pela fonte de corrente controlada passa a injetar energia no barramento DC. Esta energia provoca um aumento gradual da tensão até ao valor de ativação de 830 V. Sempre que este limiar é atingido, o Brake Chopper entra novamente em funcionamento, dissipando a energia excedente e reduzindo a tensão do barramento até ao limiar inferior de 810 V. Este comportamento repete-se ciclicamente ao longo da simulação, demonstrando o correto funcionamento da estratégia de controlo implementada.

A Figura 4.15 apresenta a potência dissipada na resistência de travagem durante a atuação do sistema.

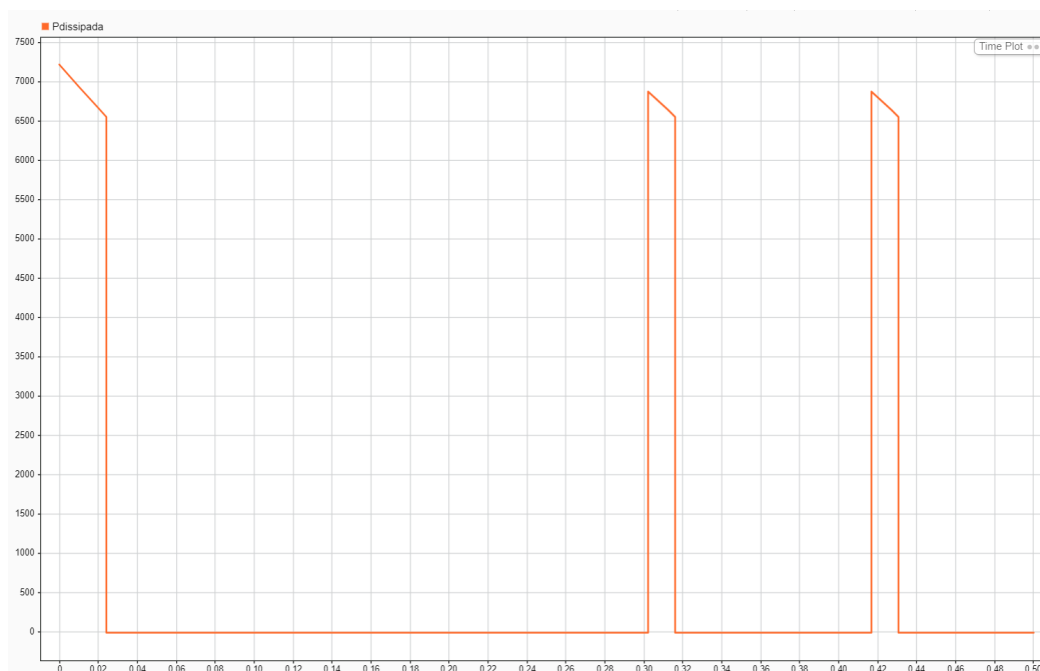


Figura 4.15: Potência dissipada pelo Brake Chopper.

Verifica-se que a potência dissipada apenas assume valores diferentes de zero durante os intervalos em que o IGBT se encontra em condução.

Verifica-se que a potência dissipada atinge valores próximos de 7 kW durante os períodos de condução do IGBT. Estes valores encontram-se em concordância com o dimensionamento apresentado no Capítulo 3 e são superiores à potência normalmente exigida pelo caso de estudo considerado, correspondente a um elevador residencial de aproximadamente 8 pisos. Desta forma, a resistência de travagem adotada apresenta uma margem de segurança adicional, constituindo uma solução conservadora capaz de absorver situações de regeneração mais severas do que aquelas previstas em funcionamento normal.

Observa-se igualmente uma ligeira redução da potência ao longo de cada período de atuação, consequência da diminuição progressiva da tensão do barramento durante a descarga do condensador.

Os resultados obtidos demonstram que o sistema Brake Chopper implementado é capaz de limitar eficazmente a tensão do barramento DC, mantendo-a dentro dos limites de segurança estabelecidos e protegendo os restantes conversores da arquitetura perante situações de regeneração excessiva ou indisponibilidade temporária dos restantes mecanismos de gestão de energia.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalho Futuro

5.1 Conclusões

A presente dissertação teve como principal objetivo o desenvolvimento e validação de uma arquitetura energética para elevadores elétricos com capacidade de regeneração de energia e alimentação autónoma em situações de falha da rede elétrica.

Para atingir este objetivo foi desenvolvida uma arquitetura baseada num barramento DC comum, integrando um conversor Active Front-End (AFE), um acionamento PMSM com controlo vetorial orientado pelo campo (FOC), um conversor Dual Active Bridge (DAB), um sistema de armazenamento de energia e um mecanismo de proteção por Brake Chopper.

Numa primeira fase foi efetuado o estudo dos requisitos mecânicos e energéticos associados ao funcionamento de um elevador residencial, permitindo estabelecer as bases para o dimensionamento do barramento DC, do sistema de armazenamento e dos conversores eletrónicos de potência.

Posteriormente foi desenvolvido o modelo do conversor AFE, responsável pela interface bidirecional com a rede elétrica. Os resultados obtidos demonstraram a capacidade de regulação da tensão do barramento DC em torno dos 800 V, garantindo simultaneamente correntes sinusoidais e operação com fator de potência próximo da unidade.

Relativamente ao sistema de acionamento, foi implementado um motor síncrono de ímanes permanentes (PMSM) controlado através de uma estratégia FOC. Os ensaios realizados demonstraram o seguimento adequado das referências de velocidade em diferentes condições de operação, incluindo funcionamento em motorização e regeneração, validando o comportamento esperado das variáveis elétricas e mecânicas do sistema.

Foi igualmente desenvolvido e validado um conversor DAB destinado à transferência bidirecional de energia entre o barramento DC principal e o sistema de armazenamento. Os resultados obtidos demonstraram a capacidade de transferência de potência em ambos os sentidos através da variação do desfasamento entre as pontes ativas, bem como a regulação da tensão do lado de armazenamento em torno do valor de referência definido.

Adicionalmente foi implementado um sistema Brake Chopper destinado à proteção do barramento DC contra situações de sobretensão. Os ensaios realizados confirmaram a atuação automática

do sistema sempre que a tensão ultrapassa o limite estabelecido, permitindo dissipar a energia excedente e manter o barramento dentro dos limites de segurança definidos.

Foi ainda desenvolvido um procedimento de dimensionamento do sistema de armazenamento energético, permitindo estimar os requisitos energéticos para diferentes cenários de emergência e operação, constituindo uma ferramenta de apoio ao projeto de futuras instalações.

De forma complementar foi proposta uma estratégia conceptual de gestão de energia (EMS), responsável pela coordenação dos diferentes subsistemas e pela definição dos modos de operação da arquitetura desenvolvida.

Globalmente, os resultados obtidos permitem concluir que a arquitetura proposta é tecnicamente viável e que os diferentes subsistemas desenvolvidos apresentam um comportamento coerente com os princípios teóricos estudados, constituindo uma base sólida para o desenvolvimento de sistemas de elevadores energeticamente mais eficientes, com capacidade de recuperação de energia e suporte autónomo em situações de emergência.

5.2 Trabalho Futuro

Apesar dos resultados obtidos, existem diversos aspetos que poderão ser explorados em trabalhos futuros.

Uma das principais evoluções consiste na integração completa de todos os subsistemas num único modelo de simulação, permitindo analisar de forma conjunta a interação entre o AFE, o acionamento PMSM, o conversor DAB, o sistema de armazenamento e o mecanismo de proteção do barramento DC.

Adicionalmente, a estratégia de gestão de energia proposta poderá ser implementada e validada diretamente em ambiente de simulação, permitindo avaliar o desempenho dos diferentes modos de operação definidos.

Outra possível evolução consiste na substituição do modelo simplificado de armazenamento utilizado nesta dissertação por modelos mais detalhados de baterias e supercondensadores, incluindo a modelação do estado de carga (SOC), envelhecimento e limitações térmicas.

Por fim, a validação experimental em plataforma laboratorial ou em ambiente industrial permitiria comparar os resultados obtidos em simulação com o comportamento real do sistema, constituindo um passo importante para uma futura implementação prática da arquitetura proposta.

Referências

- [1] I. Georgiev e S. Mirchevski, «Analysis of electrical energy consumption in elevator drives,» em *2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)*, Novi Sad, Serbia: IEEE, set. de 2012, LS3d.3–1–LS3d.3–6. DOI: [10.1109/EPEPEMC.2012.6397439](https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2012.6397439).
- [2] R. Anand e M. Mahesh, «Analysis of elevator drives energy consumptions with permanent magnet machines,» em *2016 IEEE Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*, Oshawa, ON, Canada: IEEE, ago. de 2016, pp. 186–190. DOI: [10.1109/SEGE.2016.7589523](https://doi.org/10.1109/SEGE.2016.7589523).
- [3] K.-Y. Lin e K.-Y. Lian, «Actual measurement on regenerative elevator drive and energy saving benefits,» em *2017 International Automatic Control Conference (CACCS)*, Pingtung: IEEE, nov. de 2017, pp. 1–5. DOI: [10.1109/CACCS.2017.8284249](https://doi.org/10.1109/CACCS.2017.8284249).
- [4] A. T. H. T. Anh e L. H. Duc, «A regenerative braking energy recuperation from elevator operation in building by active rectifier,» *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, vol. 12, n.º 2, p. 811, 1 de jun. de 2021. DOI: [10.11591/ijpeds.v12.i2.pp811-821](https://doi.org/10.11591/ijpeds.v12.i2.pp811-821).
- [5] D. Erica, D. Godec, M. Kutija, L. Pravica e I. Pavlic, «Analysis of regenerative cycles and energy efficiency of regenerative elevators,» em *2021 International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE)*, Dubrovnik, Croatia: IEEE, 22 de set. de 2021, pp. 212–219. DOI: [10.1109/EDPE53134.2021.9604058](https://doi.org/10.1109/EDPE53134.2021.9604058).
- [6] R. Sirsi e D. Kamath, «Energy efficient elevators and technologies,» em *2017 14th IEEE India Council International Conference (INDICON)*, Roorkee: IEEE, dez. de 2017, pp. 1–4. DOI: [10.1109/INDICON.2017.8488009](https://doi.org/10.1109/INDICON.2017.8488009).
- [7] V. I. Vlachou, T. S. Karakatsanis e A. G. Kladas, «Energy savings in elevators by using a particular permanent-magnet motor drive,» *Energies*, vol. 16, n.º 12, p. 4716, 14 de jun. de 2023. DOI: [10.3390/en16124716](https://doi.org/10.3390/en16124716).
- [8] A. T. H. Thu Anh e L. H. Duc, «Super-capacitor energy storage system to recuperate regenerative braking energy in elevator operation of high buildings,» *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 12, n.º 2, p. 1358, 1 de abr. de 2022. DOI: [10.11591/ijece.v12i2.pp1358-1367](https://doi.org/10.11591/ijece.v12i2.pp1358-1367).
- [9] N. Jabbour e C. Mademlis, «Improved control strategy of a supercapacitor-based energy recovery system for elevator applications,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, pp. 1–1, 2016. DOI: [10.1109/TPEL.2016.2516104](https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2516104).
- [10] D. Godec, L. Pravica, M. Kutija e M. Makar, «Sizing of supercapacitor-based energy storage system for elevator applications,» em *2022 IEEE 1st Industrial Electronics Society Annual On-Line Conference (ONCON)*, kharagpur, India: IEEE, 9 de dez. de 2022, pp. 1–6. DOI: [10.1109/ONCON56984.2022.10126637](https://doi.org/10.1109/ONCON56984.2022.10126637).

- [11] J. Kim, Z. Han, P. Huang, D. O'Donnel e N. C. Kar, «Comparative analysis of the utilization of supercapacitor versus grid-tie inverter regenerative braking methods for elevator systems,» em *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Lisbon, Portugal: IEEE, out. de 2019, pp. 2535–2540. DOI: [10.1109/IECON.2019.8927625](https://doi.org/10.1109/IECON.2019.8927625).
- [12] N. A. M. Azhar, M. Rahman, N. M. Nordin, M. M. Rasid e S. M. Ayob, «Optimizing elevator energy efficiency: Fuzzy logic-controlled bidirectional DC-DC converter with supercapacitor energy storage,» em *2025 International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC)*, Bali, Indonesia: IEEE, 19 de nov. de 2025, pp. 528–533. DOI: [10.1109/IFEEEC65025.2025.11301100](https://doi.org/10.1109/IFEEEC65025.2025.11301100).
- [13] H. Pang, E. Lo e B. Pong, «DC electrical distribution systems in buildings,» em *2006 2nd International Conference on Power Electronics Systems and Applications*, Hong Kong, China: IEEE, nov. de 2006, pp. 115–119. DOI: [10.1109/PESA.2006.343082](https://doi.org/10.1109/PESA.2006.343082).
- [14] G. Jing, A. Zhang e H. Zhang, «Review on DC distribution network protection technology with distributed power supply,» em *2018 Chinese Automation Congress (CAC)*, Xi'an, China: IEEE, nov. de 2018, pp. 3583–3586. DOI: [10.1109/CAC.2018.8623659](https://doi.org/10.1109/CAC.2018.8623659).
- [15] L. Xu et al., «A review of DC shipboard microgrids—part i: Power architectures, energy storage, and power converters,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, n.º 5, pp. 5155–5172, mai. de 2022. DOI: [10.1109/TPEL.2021.3128417](https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3128417).
- [16] N. A. Al-Obaidi, R. A. Abbas e H. F. Khazaal, «A review of non-isolated bidirectional DC-DC converters for hybrid energy storage system,» em *2022 5th International Conference on Engineering Technology and its Applications (IICETA)*, Al-Najaf, Iraq: IEEE, 31 de mai. de 2022, pp. 248–253. DOI: [10.1109/IICETA54559.2022.9888704](https://doi.org/10.1109/IICETA54559.2022.9888704).
- [17] M. Malinowski, M. Kazmierkowski e A. Trzynadlowski, «Review and comparative study of control techniques for three-phase PWM rectifiers,» *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 63, n.º 3, pp. 349–361, nov. de 2003. DOI: [10.1016/S0378-4754\(03\)00081-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(03)00081-8).
- [18] K. Kundanam, U. Madawala, G. Covic e F. J. Lin, «An active front-end converter with wide DC-link voltage for inductive power transfer systems,» em *2025 IEEE Wireless Power Technology Conference and Expo (WPTCE)*, Rome, Italy: IEEE, 3 de jun. de 2025, pp. 1–6. DOI: [10.1109/WPTCE62521.2025.11062192](https://doi.org/10.1109/WPTCE62521.2025.11062192).
- [19] M. M. Swamy, «An active damping scheme with energy saving feature for use with regenerative converters,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, n.º 5, pp. 4386–4393, set. de 2018. DOI: [10.1109/TIA.2018.2829472](https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2829472).
- [20] S. Pillai, R. R. A. Gupta, R. Hedau e S. Gupta, «An adaptive strategy for DC-link control of active front end for four quadrant drives,» em *2020 International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC)*, Thrissur, India: IEEE, 17 de dez. de 2020, pp. 1–6. DOI: [10.1109/PICC51425.2020.9362396](https://doi.org/10.1109/PICC51425.2020.9362396).
- [21] G. Buja e M. Kazmierkowski, «Direct torque control of PWM inverter-fed AC motors—a survey,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, n.º 4, pp. 744–757, ago. de 2004. DOI: [10.1109/TIE.2004.831717](https://doi.org/10.1109/TIE.2004.831717).
- [22] A. Salem, H. Van Khang, K. G. Robbersmyr, M. Norambuena e J. Rodriguez, «Voltage source multilevel inverters with reduced device count: Topological review and novel comparative factors,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, n.º 3, pp. 2720–2747, mar. de 2021. DOI: [10.1109/TPEL.2020.3011908](https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3011908).

- [23] M. Kamran e M. Turzynski, «Exploring current source inverters: A Review of Topologies, Applications, Emerging Trends, and Key Challenges,» *IEEE Industrial Electronics Magazine*, pp. 2–25, 2026. DOI: [10.1109/MIE.2026.3666821](https://doi.org/10.1109/MIE.2026.3666821).
- [24] J. Rodriguez, S. Bernet, B. Wu, J. O. Pontt e S. Kouro, «Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drives,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, n.º 6, pp. 2930–2945, dez. de 2007. DOI: [10.1109/TIE.2007.907044](https://doi.org/10.1109/TIE.2007.907044).
- [25] I. Colak, E. Kabalci e R. Bayindir, «Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes,» *Energy Conversion and Management*, vol. 52, n.º 2, pp. 1114–1128, fev. de 2011. DOI: [10.1016/j.enconman.2010.09.006](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.09.006).
- [26] K. Tytelmaier, O. Husev, O. Veligorskyi e R. Yershov, «A review of non-isolated bidirectional dc-dc converters for energy storage systems,» em *2016 II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*, Kharkiv, Ukraine: IEEE, out. de 2016, pp. 22–28. DOI: [10.1109/YSF.2016.7753752](https://doi.org/10.1109/YSF.2016.7753752).
- [27] M. A. Alam, A. F. Minai e F. I. Bakhsh, «Isolated bidirectional DC-DC converter: A topological review,» *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 8, p. 100 594, jun. de 2024. DOI: [10.1016/j.prime.2024.100594](https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100594).
- [28] O. M. Butt, R. H. Ahmed e M. H. Ashfaq, «Systematic review on phase-shift optimization strategies of dual active bridge based DC-DC converter,» *Transportation Research Procedia*, vol. 70, pp. 107–114, 2023. DOI: [10.1016/j.trpro.2023.11.008](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.008).
- [29] A. S. Babokany, M. Jabbari, G. Shahgholian e M. Mahdavian, «A review of bidirectional dual active bridge converter,» em *2012 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, Phetchaburi, Thailand: IEEE, mai. de 2012, pp. 1–4. DOI: [10.1109/ECTICon.2012.6254316](https://doi.org/10.1109/ECTICon.2012.6254316).
- [30] H. Ataullah et al., «Analysis of the dual active bridge-based DC-DC converter topologies, high-frequency transformer, and control techniques,» *Energies*, vol. 15, n.º 23, p. 8944, 26 de nov. de 2022. DOI: [10.3390/en15238944](https://doi.org/10.3390/en15238944).
- [31] S. Krishnamoorthy e P. P. K. Panikkar, «A comprehensive review of different electric motors for electric vehicles application,» *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, vol. 15, n.º 1, p. 74, 1 de mar. de 2024. DOI: [10.11591/ijpeds.v15.i1.pp74-90](https://doi.org/10.11591/ijpeds.v15.i1.pp74-90).
- [32] R. Saxena e R. T. Ugale, «Comparative study of induction motor, permanent magnet synchronous motor and line start permanent magnet synchronous motor using finite element analysis,» em *2024 IEEE 11th Power India International Conference (PIICON)*, JAIPUR, India: IEEE, 10 de dez. de 2024, pp. 1–5. DOI: [10.1109/PIICON63519.2024.10995051](https://doi.org/10.1109/PIICON63519.2024.10995051).
- [33] T.-K. Kim et al., «Performance comparison of induction motors and IPMSMs with identical stators for use as auxiliary motors in EVs and HEVs,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 62, n.º 1, pp. 846–856, jan. de 2026. DOI: [10.1109/TIA.2025.3586565](https://doi.org/10.1109/TIA.2025.3586565).
- [34] Z. S. Liu, S. H. Fan e Y. F. Weng, «Research on optimum design and control of permanent magnet synchronous motor for elevator,» *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2878, n.º 1, p. 012018, 1 de out. de 2024. DOI: [10.1088/1742-6596/2878/1/012018](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2878/1/012018).
- [35] L. Veg e J. Laksar, «Overview of technology, problems and comparison of high speed synchronous reluctance machines,» em *2018 ELEKTRO*, Mikulov: IEEE, mai. de 2018, pp. 1–4. DOI: [10.1109/ELEKTRO.2018.8398289](https://doi.org/10.1109/ELEKTRO.2018.8398289).

- [36] S. Li, Z. Liu e Q. Xu, «A new method of elevator emergency leveling based on supercapacitor energy storage,» em *2023 35th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Yichang, China: IEEE, 20 de mai. de 2023, pp. 1380–1385. DOI: [10.1109/CCDC58219.2023.10327255](https://doi.org/10.1109/CCDC58219.2023.10327255).
- [37] F. Eroğlu, M. Kurtoğlu e A. M. Vural, «Bidirectional DC–DC converter based multilevel battery storage systems for electric vehicle and large-scale grid applications: A critical review considering different topologies, state-of-charge balancing and future trends,» *IET Renewable Power Generation*, vol. 15, n.º 5, pp. 915–938, abr. de 2021. DOI: [10.1049/rpg2.12042](https://doi.org/10.1049/rpg2.12042).
- [38] B. Siranthini, M. Babu, S. Nithya e K. Vijayalakshmi, «Comparison of elevator drives regenerative energy using DC-DC converter with battery energy storage systems in high raise buildings,» em *2023 International Conference on Innovative Computing, Intelligent Communication and Smart Electrical Systems (ICSES)*, Chennai, India: IEEE, 14 de dez. de 2023, pp. 1–7. DOI: [10.1109/ICSES60034.2023.10465444](https://doi.org/10.1109/ICSES60034.2023.10465444).
- [39] G. Pannell, B. Zahawi, D. J. Atkinson e P. Missailidis, «Evaluation of the performance of a DC-link brake chopper as a DFIG low-voltage fault-ride-through device,» *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 28, n.º 3, pp. 535–542, set. de 2013. DOI: [10.1109/TEC.2013.2261301](https://doi.org/10.1109/TEC.2013.2261301).
- [40] M. F. Zia, E. Elbouchikhi e M. Benbouzid, «Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects,» *Applied Energy*, vol. 222, pp. 1033–1055, jul. de 2018. DOI: [10.1016/j.apenergy.2018.04.103](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.103).
- [41] L. Olatomiwa, S. Mekhilef, M. Ismail e M. Moghavvemi, «Energy management strategies in hybrid renewable energy systems: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 821–835, set. de 2016. DOI: [10.1016/j.rser.2016.05.040](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.040).
- [42] D. Mariano-Hernández, L. Hernández-Callejo, A. Zorita-Lamadrid, O. Duque-Pérez e F. Santos García, «A review of strategies for building energy management system: Model predictive control, demand side management, optimization, and fault detect & diagnosis,» *Journal of Building Engineering*, vol. 33, p. 101692, jan. de 2021. DOI: [10.1016/j.jobe.2020.101692](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101692).