



# **Projeto de um Sistema de Alimentação Ininterruptível para Alimentar um Sistema de Telecomunicações ou de Informática**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Pedro Miguel Pestana Camacho**

MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES  
E REDES DE ENERGIA



UNIVERSIDADE da MADEIRA

*A Nossa Universidade*

[www.uma.pt](http://www.uma.pt)

setembro | 2012

M UMa

AM Pro

T/M uma  
62  
CAM pro

71313

# **Projeto de um Sistema de Alimentação Ininterruptível para Alimentar um Sistema de Telecomunicações ou de Informática**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Pedro Miguel Pestana Camacho**

MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES  
E REDES DE ENERGIA

UNIVERSIDADE DA MADEIRA  
SECTOR DE DOCUMENTAÇÃO  
E ARQUIVO

ORIENTAÇÃO  
João Dionísio Simões Barros

## **CONSTITUIÇÃO DO JÚRI**

### **PRESIDENTE**

Prof. Doutor Alberto de Jesus Nascimento,  
Professor Auxiliar da Universidade da Madeira,

### **ARGUENTE**

Prof. Doutor Joaquim Amândio Rodrigues Azevedo,  
Professor Auxiliar da Universidade da Madeira,

### **ORIENTADOR**

Prof. Doutor João Dionísio Simões Barros,  
Professor Auxiliar da Universidade da Madeira,

Funchal, 23 de novembro de 2012



## RESUMO

Nesta dissertação de mestrado é desenvolvido um sistema de alimentação ininterrupta, com particular foco para o aumento da durabilidade do sistema de armazenamento de energia e da otimização da qualidade da energia elétrica.

É utilizado um esquema de dupla realimentação para o controlo das correntes *ac* e das tensões *ac* e *dc*, à saída dos conversores DC/AC e AC/DC, respetivamente: 1) uma malha interna, com dinâmica mais rápida, para controlo não linear da corrente, onde são utilizados o controlo por modo de deslizamento e o controlo preditivo; 2) uma malha externa, mais lenta, que utiliza um compensador PI como controlador de tensão, que gera as referências para o controlador de corrente.

Para aumentar a vida útil das baterias é proposta a inclusão de um condensador, entre o retificador e o inversor, que fornece energia à carga na ocorrência de falhas, de curta duração, na rede elétrica, evitando que as baterias necessitem de entrar em funcionamento.

Os resultados obtidos no MATLAB/SIMULINK evidenciam que o condensador suprime as necessidades da carga em caso de falhas com curta duração. Na comparação entre os controladores de corrente verifica-se que o controlo preditivo possui um desempenho superior ao controlo por modo de deslizamento, uma vez que o tremor das tensões registado era menor, e também mostrou ser um método de controlo robusto, mesmo em condições mais adversas.

### Palavras-chave:

Sistema de alimentação ininterruptível, rede de energia elétrica, controlo por modo de deslizamento, controlo preditivo, baterias.



## **ABSTRACT**

In this master thesis is developed an uninterruptible power supply system, with particular focus to increase the durability of the energy storage system and the optimization of power quality.

It is used a double feedback scheme for controlling ac currents and ac and dc voltages in the output of the DC/AC and AC/DC converters, respectively: 1) an inner loop with faster dynamics for controlling non-linear current and where are used the sliding mode control and the predictive control; 2) an outer loop, slower, which uses a PI compensator as voltage controller, which generates references for the current controller.

To increase the lifetime of the batteries is proposed the inclusion of a capacitor between the rectifier and the inverter, which provides power to the load in the occurrence of failures of short duration in the electricity network, avoiding that the batteries need to enter in operation.

The results obtained in MATLAB / SIMULINK show that the capacitor suppresses the needs of the load in the event of faults with short duration. Comparing the current controllers it is verified that the predictive control has outperformed the sliding mode control, since the voltage ripple was lower, and also proved to be a robust method of control, even in conditions more adverse.

### **Key-words:**

Uninterruptible power supply, electric power network, sliding mode control, predictive control, batteries.





## **AGRADECIMENTOS**

Queria agradecer ao meu orientador, o Prof. Dionísio Barros, pelas horas despendidas na orientação do projeto de mestrado, pela disponibilidade que teve em esclarecer as dúvidas que apresentei, pelas ideias sugeridas para a realização do meu trabalho e todo o conhecimento que me transmitiu.

À minha família, pela força, motivação e sacrifícios que fizeram na esperança de um dia ter um futuro melhor.

Ao Eng. Filipe Santos pelo apoio prestado nos laboratórios.

Aos meus amigos pelos bons momentos passados e pela ajuda que me deram.



## LISTA DE ABREVIATURAS

- AC - Corrente alternada (*alternating current*)
- DC - Corrente contínua (*direct current*)
- DSP - Processador Digital de Sinal (*Digital Signal Processor*)
- ENV – Pré-norma Europeia
- FS-MPC - *Finite Sates Model Predictive Control*
- IEC - *International Electrotechnical Commission*
- IGBT - *Insulated Gate Bipolar Transistor*
- IEEE - *Institute of Electrical and Electronic Engineers*
- PI – Referente ao controlo proporcional integral
- PWM – Modulação por largura de impulso (*Pulse Width Modulation*)
- QEE - Qualidade da Energia Elétrica
- REE - Rede de Energia Elétrica
- SOC - *State Of Charge*
- UPS - Sistema de alimentação ininterruptível (*Uninterruptible Power Supply*)
- THD - Taxa de distorção harmónica (*Total Harmonic Distortion*)



## LISTA DE SÍMBOLOS

- abc - Sistema de coordenadas abc ou no eixo trifásico
- [C] - Matriz da transformação de *Clarke-Concórdia*
- C - capacidade genérica do condensador
- $C_{dc}$  - Capacidade do condensador *dc*, colocado entre o retificador e o inversor
- $C_k$  - Capacidade do condensador da fase *k*, com  $k \in \{A, B, C\}$
- [D] - Matriz da transformação de *Park*
- dq0* - Sistema de coordenadas *dq0* ou de *Park*
- $e_{i_{\alpha,\beta}}$  - Erro resultante da diferença entre a corrente  $i_{\alpha,\beta_{Ref}}$  e da corrente  $i_{\alpha,\beta}$
- $Fator_T$  - Fator da afetação do desempenho da bateria com a temperatura
- $f_c$  - Frequência de corte do filtro passa-baixo
- $h_{d,q_{ref}}$  - Mudança de variável para desacoplamento entre as tensões  $v_{d,q}$
- $i_k$  - Corrente da fase *k*, com  $k \in \{A, B, C\}$
- $i_{k_{Ref}}$  - Corrente de referência da fase *k*, com  $k \in \{A, B, C\}$
- $i_c$  - Valor da corrente do condensador
- $i_{dc}$  - Valor da corrente *dc* entre o retificador e o inversor
- $i_{d,q}$  - Correntes  $i_k$  no sistema de coordenadas *dq0*
- $i_{d,q_{ref}}$  - Correntes de referência geradas pelo compensador linear de tensão
- $i_{l_k}$  - Corrente na carga da fase *k*, com  $k \in \{A, B, C\}$
- $i_{l_{\alpha,\beta}}$  - Corrente na carga no sistema de coordenadas  $\alpha\beta 0$
- $i_{l_{d,q}}$  - Corrente na carga no sistema de coordenadas *dq0*
- $i_{\alpha,\beta}$  - Valor da corrente  $i_k$  no sistema de coordenadas  $\alpha\beta 0$
- $i_{\alpha,\beta_{Ref}}$  - Valor da corrente  $i_{k_{Ref}}$  no sistema de coordenadas  $\alpha\beta 0$
- $i_{\alpha,\beta}(n + 1)$  - Estimativa do valor da corrente  $i_{\alpha,\beta}$  da próxima amostra, para cálculo da função custo no controlo preditivo
- $i_{\alpha,\beta_{Ref}}(n + 1)$  - Valor da corrente  $i_{\alpha,\beta_{Ref}}$  no próximo instante de amostragem, para cálculo da função custo no controlo preditivo
- $k_{i_{d,q}}$  - Ganho integral do compensador PI do inversor de tensão *ac*
- $k_i U$  - Ganho integral do compensador PI do retificador de tensão *dc*
- $k_{p_{d,q}}$  - Ganho proporcional do compensador PI do inversor de tensão *ac*
- $k_p U$  - Ganho proporcional do compensador PI do retificador de tensão *dc*

$L$  - Valor genérico do coeficiente de auto-indução das bobinas  
 $L_k$  - Valor de auto-indução da bobina da fase  $k$ , com  $k \in \{A, B, C\}$   
 $R$  - Resistência genérica de perdas das bobinas  
 $R_{dc}$  - Resistência  $dc$  do conversor  
 $R_{lk}$  - Resistência de carga na fase  $k$ , com  $k \in \{A, B, C\}$   
 $R_k$  - Resistência de perdas na bobina  $k$ , com  $k \in \{A, B, C\}$   
 $S_{ij}$  - Semicondutor de um braço, com  $i, j \in \{1, 2, 3\}$   
 $U$  - Tensão de alimentação  $dc$   
 $U_{max}$  - Tensão máxima de alimentação  $dc$   
 $U_{min}$  - Tensão mínima de alimentação  $dc$   
 $U_{ref}$  - Tensão de referência  $dc$   
 $V$  - Valor da amplitude da tensão  $ac$   
 $V_{bateria\_desc}$  - Tensão de descarga da bateria  
 $V_{bateria\_flut}$  - Tensão de flutuação da bateria  
 $V_{bateria\_nom}$  - Tensão nominal da bateria  
 $V_k$  - Tensão no braço do conversor  $k$ , com  $k \in \{A, B, C\}$   
 $v_k$  - Valor eficaz da tensão na carga  $k$ , com  $k \in \{A, B, C\}$   
 $V_{kn}$  - Tensão simples correspondente à fase  $k$ , com  $k \in \{A, B, C\}$   
 $V_{kj}$  - Tensão composta entre as fases  $kj$ , com  $k, j \in \{A, B, C\}$   
 $v_{\alpha,\beta}$  - Tensão  $v_k$  no sistema de coordenadas  $\alpha\beta 0$   
 $v_{d,q}$  - Tensão  $v_k$  no sistema de coordenadas  $dq 0$   
 $\alpha\beta 0$  - Sistema de coordenadas  $\alpha\beta 0$  ou de *Clarke-Concórdia*  
 $\gamma_k$  - Função de existência ou de comutação  
 $\gamma_{\alpha,\beta}$  - Função de existência ou de comutação no sistema de coordenadas  $\alpha\beta 0$   
 $\gamma_{d,q}$  - Função de existência ou de comutação no sistema de coordenadas  $\alpha\beta 0$   
 $\Delta t$  - Período de amostragem  
 $\Delta i$  - Valor máximo de tremor da corrente  
 $\Delta T$  - Duração de tempo do fornecimento de energia do condensador  $dc$  para a carga  
 $\Delta U$  - Variação da tensão do condensador  $dc$   
 $\xi$  - Fator de amortecimento de um sistema de segunda ordem  
 $\varepsilon$  - Valor do erro admissível para as correntes no controlo por modo de deslizamento  
 $\omega$  - Frequência angular das grandezas alternadas sinusoidais

$\omega_n$  - Frequência angular natural do sistema

$\omega_s$  - Frequência angular de comutação dos semicondutores





## ÍNDICE

Resumo.....	vii
Abstract .....	ix
Agradecimentos .....	xi
Lista de abreviaturas .....	xiii
Lista de símbolos .....	xv
Capítulo 1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 – Motivação.....	2
1.2 – Objetivos .....	3
1.3 – Organização e conteúdos.....	3
1.4 – Contribuições originais .....	4
Capítulo 2 ESTADO DE ARTE.....	7
2.1 – Introdução .....	8
2.2 – Qualidade de Energia Elétrica.....	8
2.2.1 – Transitórios.....	8
2.2.1.1 – Transitório impulsivo .....	8
2.2.1.2 – Transitório oscilatório .....	8
2.2.2 – Variações de curta duração.....	9
2.2.3 – Variações de longa duração.....	9
2.2.4 – Desequilíbrios de tensão.....	9
2.2.5 – Distorções na forma de onda.....	9
2.2.5.1 – Componente DC.....	9
2.2.5.2 – Harmónicos .....	9
2.2.5.3 – Inter-harmónicos .....	9
2.2.5.4 – Micro-cortes de tensão .....	10
2.2.5.5 – Ruído .....	10
2.2.6 – Flutuações de tensão.....	10
2.2.7 – Variações de frequência .....	10
2.3 – Tipos de UPS.....	11
2.3.1 – UPS rotativa .....	11
2.3.2 – UPS híbrida .....	12
2.3.3 – UPS's estáticas .....	12

2.3.3.1 – UPS <i>offline</i> .....	13
2.3.3.2 – UPS <i>online</i> .....	13
2.3.3.3 – UPS interativa .....	14
2.4 – Retificador.....	16
2.5 – Inversor .....	17
2.6 – Baterias.....	18
2.6.1 – Tipos de baterias.....	18
2.6.1.1 – Chumbo-ácido ventilada.....	18
2.6.1.2 – Chumbo-ácido regulada por válvula .....	18
2.6.1.3 – Níquel-Cádmio ventiladas.....	18
2.6.1.4 – Níquel-Cádmio seladas.....	19
2.6.2 – Ciclo de vida da bateria.....	19
2.6.3 – Tecnologias de armazenamento alternativas .....	19
2.7 – DSP .....	19
2.8 – Técnicas de controlo.....	20
2.8.1 – Controlo por modo de deslizamento .....	20
2.8.2 – Controlo preditivo .....	21
2.8.3 – Controlador PI.....	22
Capítulo 3 CONVERSOR TRIFÁSICO DE CORRENTE AC .....	23
3.1 – Introdução .....	24
3.2 – Topologia .....	24
3.3 – Modo de funcionamento.....	25
3.4 – Modelo da dinâmica do conversor .....	26
3.4.1 – Modelo no sistema de coordenadas <i>abc</i> .....	26
3.4.2 – Modelo no sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$ .....	27
3.5 – Controlo das correntes trifásicas .....	28
3.5.1 – Controlo por modo de deslizamento .....	29
3.5.2 – Controlo preditivo .....	30
3.6 – Resultados de simulação .....	31
3.7 – Conclusões .....	34
Capítulo 4 CONVERSOR DC/AC, AC/DC E AC/AC TRIFÁSICO .....	35
4.1 – Introdução .....	36
4.2 – Inversor de tensão AC.....	36
4.2.1 – Modelo da dinâmica do inversor.....	37

4.2.1.1 – Modelo no sistema de coordenadas $abc$ .....	37
4.2.1.2 – Modelo no sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$ .....	37
4.2.1.3 – Modelo no sistema de coordenadas $dq0$ .....	38
4.2.2 – Controlo das tensões AC através de um compensador linear PI.....	39
4.3 – Retificador de tensão DC .....	41
4.3.1 – Modelo da dinâmica do retificador .....	42
4.3.2 – Controlo da tensão DC através de um compensador linear do tipo PI.....	43
4.4 – Conversor AC/AC.....	45
4.4.1 - Dimensionamento da bobina de entrada .....	46
4.4.2 - Dimensionamento do filtro de saída .....	46
4.4.3 - Tensão mínima no <i>link DC</i> .....	47
4.4.4 - Dimensionamento do banco de baterias.....	48
4.4.5 - Dimensionamento do banco de condensadores .....	50
4.4.6 - Exemplo prático de dimensionamento dos conversores de uma UPS .....	51
4.5 - Conclusões .....	55
Capítulo 5 AUTOMATISMOS DE COMANDO DA UPS .....	57
5.1 – Introdução .....	58
5.2 – Controlo.....	58
5.3 – Estados .....	59
5.4 – Conclusões .....	66
Capítulo 6 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO .....	69
6.1 – Testes ao sistema.....	70
6.1.1 – Funcionamento em regime permanente .....	70
6.1.2 – Presença de ruído .....	71
6.1.3 – Influência dos harmónicos no desempenho da UPS.....	72
6.1.4 – Cava.....	72
6.1.5 – Sobretensão .....	73
6.1.6 – Interrupção de curta duração .....	74
6.1.7 – Corte na tensão da rede de energia elétrica .....	75
6.1.8 – Supressão de uma fase na rede de energia.....	76
6.1.9 – Variação na carga.....	77
6.1.10 – Tensão no <i>link DC</i> .....	78
6.2 – Conclusões .....	78
Capítulo 7 CONCLUSÕES .....	81

7.1 – Conclusões gerais.....	82
7.2 – Trabalhos futuros.....	83
Referências.....	84
ANEXO A.....	87
ANEXO B.....	88
ANEXO C.....	91
ANEXO D.....	98

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentadas as razões que motivaram a realização do projeto de um sistema de alimentação ininterruptível, para alimentação de um sistema de telecomunicações ou de informática. São definidos os objetivos a cumprir, bem como são apresentados os capítulos e conteúdos em que este trabalho encontra-se dividido. No final do capítulo, são descritas as contribuições originais.

## 1.1 – Motivação

A utilização de energia elétrica, por exemplo, para fins de iluminação, aquecimento, transportes, informática e comunicações, é cada vez mais comum no quotidiano das pessoas.

A paragem de determinados equipamentos ou sistemas (por exemplo, computadores ou elevadores e sistemas de segurança ou sistemas associados a hospitais e aeroportos), devido à quebra no normal fornecimento de energia elétrica, pode colocar a vida das pessoas em risco. De forma semelhante, uma empresa que dependa das comunicações para o seu funcionamento, tal como um banco, ou uma empresa de fornecimento de telecomunicações, são seriamente prejudicadas se não estiverem preparadas para a ocorrência de uma falta de eletricidade.

O aumento na utilização de equipamentos eletrónicos, cada vez mais sensíveis à qualidade da energia, acrescentou o problema da fidedignidade da forma de onda da tensão ao da disponibilidade da energia elétrica. Problemas como pequenas flutuações na tensão ou interrupções curtas de energia são responsáveis por estragos em equipamentos e, no caso onde não são registados danos, os equipamentos podem ver a sua vida útil reduzida ou a necessidade de manutenção acrescida [1][2].

O desenvolvimento e aplicação de técnicas de controlo mais complexas e que requeiram maior poder de processamento são hoje em dia possíveis de implementação prática, graças à maior capacidade e rapidez de execução proporcionados pelos microcontroladores e/ou DSPs (*Digital Signal Processors*).

Uma das formas mais comuns para a realização do armazenamento de energia consiste na utilização de baterias. Contudo, o aumento da utilização destas implica uma diminuição na capacidade de retenção de energia, como também pode exigir maiores custos de manutenção.

As razões apresentadas motivaram o desenvolvimento de um sistema de alimentação ininterrupta para alimentar um sistema de telecomunicações ou de informática, de forma a garantir o seu normal funcionamento, mesmo na ocorrência de incidentes na rede de energia elétrica, que seja capaz de maximizar o tempo útil de utilização de baterias.

## 1.2 – Objetivos

As falhas na rede de energia elétrica são sempre possíveis de ocorrer. Alguns equipamentos ou sistemas necessitam de um sistema de suporte pois não devem ser desligados, uma vez que pode constituir uma situação de perigo para as pessoas ou a geração de prejuízos financeiros.

Neste âmbito, os objetivos a concretizar nesta dissertação são:

1. Estudo dos conversores eletrônicos de potência e das topologias dos sistemas de alimentação ininterruptível.
2. Desenvolvimento de um projeto de comando e controlo de um sistema de alimentação ininterruptível com a otimização da qualidade da energia elétrica e durabilidade dos sistemas de armazenamento de energia.
3. Verificação através de simulação, no programa MATLAB/SIMULINK, do sistema desenvolvido.
4. Avaliação e especificação dos limites e robustez de funcionamento do sistema, perante a presença de distúrbios na rede elétrica.

## 1.3 – Organização e conteúdos

Esta dissertação está organizada em 7 capítulos (Introdução, Estado de Arte, Conversor Trifásico de Corrente AC, Conversor DC/AC, AC/DC e AC/AC Trifásico, Automatismos de Comando da UPS, Resultados de Simulação, Conclusões), Referências e Apêndices.

No Capítulo 1, Introdução, foram apresentadas as motivações para a realização deste trabalho. Foram apresentados os objetivos a atingir, é definida a estrutura da tese e indicadas as contribuições originais.

No Capítulo 2, Estado de Arte, é realizada uma abordagem aos problemas de qualidade de energia elétrica que afetam a rede. São revistos os diferentes tipos de UPS existentes e é feita uma comparação entre a implementação dos métodos de controlo por *software* ou *hardware*. No fim deste capítulo são apresentados alguns métodos de controlo usados nos conversores de potência.

No Capítulo 3, Conversor Trifásico de Corrente AC, é apresentada a topologia do conversor trifásico e obtido um modelo do mesmo. É aplicada a transformação de

*Clarke-Concordia* para obtenção do modelo do sistema nas coordenadas  $\alpha\beta 0$  e utilizam-se o controlo por modo de deslizamento e o controlo preditivo para controlar as correntes trifásicas do conversor. No fim do capítulo é comparado o desempenho entre os dois controladores de corrente.

No Capítulo 4, Conversor DC/AC, AC/DC e AC/AC Trifásico, é aplicada a transformada de *Park* de forma a serem obtidas as equações que definem os modelos do conversor DC/AC e AC/DC no sistema de coordenadas  $dq0$ . Para cada um destes dois conversores é realizado o projeto do compensador linear de tensão, para que a tensão à saída de cada um dos conversores possa ser controlada. No conversor AC/AC é apresentada a forma de realizar o dimensionamento dos componentes, sendo apresentado um exemplo prático.

No Capítulo 5, Automatismos de Comando da UPS, é delineado o comportamento do sistema face às várias situações que pode enfrentar, pelo que são definidas as condições e as ordens de comando para cada situação. São ainda implementados os modos de carregamento em corrente e em tensão para as baterias.

No Capítulo 6, Resultados de Simulação, é avaliado o comportamento do sistema perante vários cenários de ocorrência de falhas na rede elétrica, sendo também realizada uma comparação entre os resultados obtidos no controlo por modo de deslizamento e o controlo preditivo.

No Capítulo 7, Conclusões, são apresentadas as conclusões mais relevantes desta dissertação e são sugeridas algumas ideias para a realização de trabalhos futuros.

#### **1.4 – Contribuições originais**

As contribuições originais desta dissertação de mestrado sobre o projeto de um sistema de alimentação ininterruptível, para alimentação de um sistema de telecomunicações ou de informática, são:

1. Utilização de um condensador no *link dc*, associado a técnicas de controlo e de carregamento que permitam aumentar a durabilidade das baterias que armazenam a energia da UPS.



2. Comparação no desempenho, entre a utilização do controlador por modo de deslizamento e o controlador preditivo, para efeitos de otimização da qualidade da energia elétrica de uma UPS.



# Capítulo 2

## ESTADO DE ARTE

Neste capítulo é feita uma abordagem aos problemas de Qualidade de Energia Elétrica que afetam a Rede de Energia Elétrica. É realizada uma revisão do estado de arte dos tipos de UPS existentes, bem como de cada uma das suas partes constituintes. Efetua-se uma comparação entre a utilização de componentes analógicos e o uso de processadores de sinal digitais para implementação dos métodos de controlo. No final do capítulo são apresentadas algumas das técnicas de controlo utilizadas nos conversores de potência.

## **2.1 – Introdução**

Quando ocorre uma falha na rede de energia elétrica (REE), uma UPS deve ser capaz de garantir um fornecimento constante de energia à carga. Uma UPS pode alimentar um computador, ou até um edifício, podendo neste último caso a potência associada a esta chegar à ordem dos megawatts.

## **2.2 – Qualidade de Energia Elétrica**

A energia entregue pela rede pública está sujeita a fenómenos que podem perturbar a qualidade da energia elétrica (QEE). No caso de cargas críticas, as UPS devem estar aptas à correção destas perturbações, de modo a assegurar o funcionamento normal dos equipamentos.

A norma IEEE 1159-2009 [3] caracteriza os distúrbios que afetam a qualidade da energia elétrica. Em seguida será feita uma síntese destas perturbações.

### **2.2.1 – Transitórios**

O transitório reflete a forma de onda da corrente ou tensão, podendo este ser classificado como transitório impulsivo ou transitório oscilatório.

#### **2.2.1.1 – Transitório impulsivo**

O transitório impulsivo distingue-se por uma mudança súbita da amplitude da onda, num período de tempo muito curto. A principal origem deste tipo de transitórios é devida às descargas atmosféricas. A título de exemplo, um transitório impulsivo de tensão pode ter um tempo de subida de  $1,2 \mu\text{s}$  e um tempo de decaimento de  $50 \mu\text{s}$  [3].

#### **2.2.1.2 – Transitório oscilatório**

Os transitórios oscilatórios caracterizam-se pela mudança instantânea da polaridade da forma de onda da tensão ou corrente. Podem ser descritos pela amplitude, duração ou conteúdo espectral. As causas podem ser resultantes de um transitório impulsivo, em equipamentos eletrónicos de potência, pelo carregamento de um banco de condensadores ou arranque de uma máquina elétrica.

### **2.2.2 – Variações de curta duração**

As variações de curta duração podem ser designadas por instantâneas, momentâneas ou temporárias. Distinguem-se pela elevação ou redução da amplitude da tensão, ou mesmo pela interrupção do fornecimento da tensão.

### **2.2.3 – Variações de longa duração**

Quando os limites típicos da amplitude da tensão são ultrapassados num período de tempo superior a 1 minuto é considerado como uma variação de longa duração. Estas variações podem ser: sobretensões (acima do limite típico da tensão), subtensões ou cavas (possui uma amplitude abaixo do valor normal) ou interrupção sustentada (abaixo dos 10% do valor nominal da tensão).

### **2.2.4 – Desequilíbrios de tensão**

Os desequilíbrios de tensão dizem respeito à diferença entre os valores eficazes das tensões, num sistema trifásico. Normalmente, os desequilíbrios das tensões num sistema trifásico é inferior a 3%.

### **2.2.5 – Distorções na forma de onda**

Qualquer desvio da forma de onda sinusoidal ideal é considerada uma distorção. São considerados 5 tipos de distorções, os quais são descritos em separado.

#### **2.2.5.1 – Componente DC**

Consiste num deslocamento *dc* da forma de onda de tensão ou corrente *ac*.

#### **2.2.5.2 – Harmónicos**

Os harmónicos possuem frequências, cujos valores são múltiplos inteiros da frequência fundamental da tensão ou corrente (geralmente 50 ou 60 Hz). A combinação da frequência fundamental com os harmónicos provoca uma forma de onda distorcida.

#### **2.2.5.3 – Inter-harmónicos**

Os inter-harmónicos possuem frequências que não são múltiplos inteiros da frequência fundamental.

#### **2.2.5.4 – Micro-cortes de tensão**

Os micro-cortes de tensão são um fenômeno periódico que causa perturbações na forma de onda da tensão. Os retificadores trifásicos passivos e com tirístores são a principal fonte da ocorrência deste acontecimento.

#### **2.2.5.5 – Ruído**

O ruído são sinais elétricos indesejados, geralmente apresentando uma distribuição espectral menor que 200 kHz. Normalmente são utilizados filtros, transformadores de isolamento ou condicionadores de linha para atenuar os efeitos provocados pelo ruído.

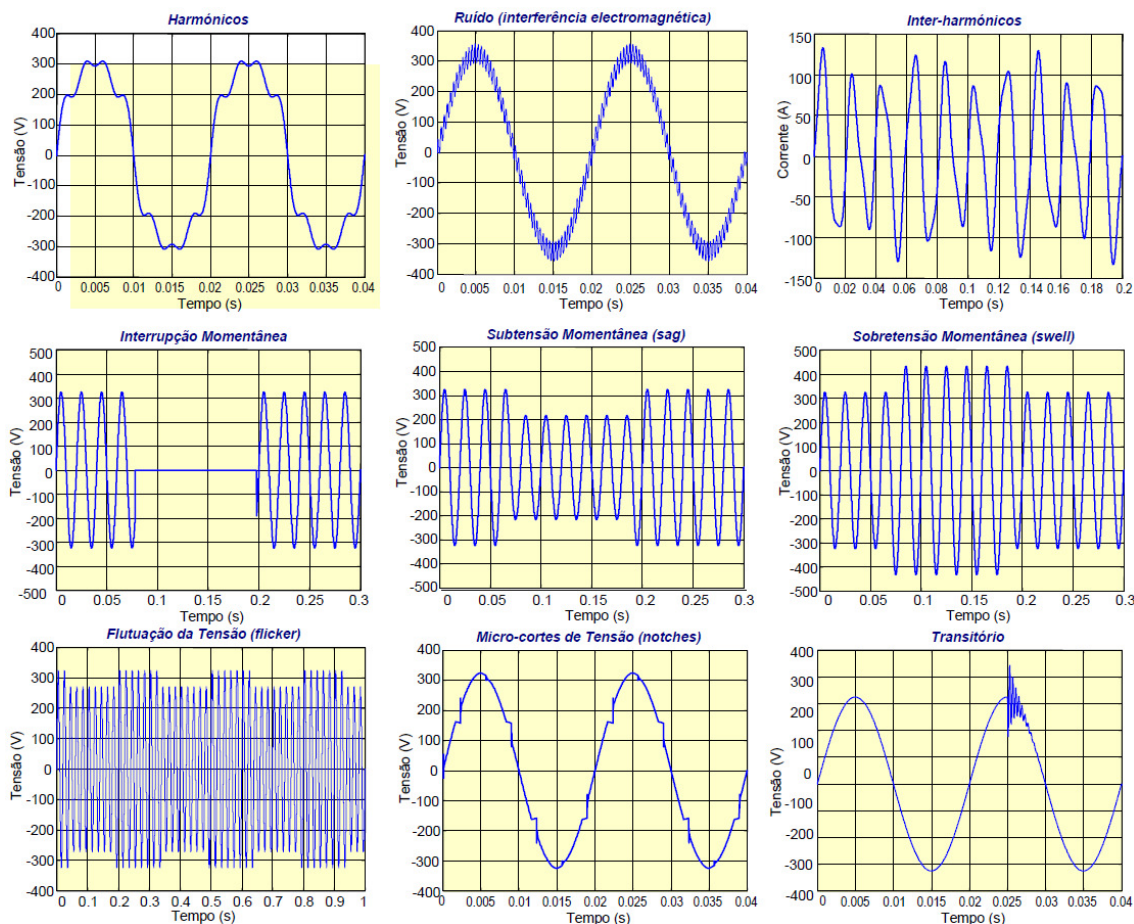
#### **2.2.6 – Flutuações de tensão**

São pequenas variações aleatórias do valor da amplitude da tensão, usualmente os valores estão compreendidos entre 0,95 e 1,05 p.u. (por unidade) do valor da tensão da rede.

#### **2.2.7 – Variações de frequência**

São desvios da frequência fundamental do sistema, produzidas por grandes variações da carga, sendo mais prováveis de serem sentidos em equipamentos alimentados por um gerador isolado.

Na **Figura 2.1** estão representados alguns exemplos de distúrbios que afetam a QEE da REE.



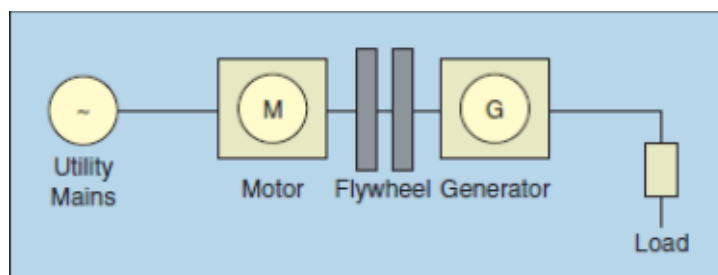
**Figura 2.1** – Fenômenos que afetam a QEE da rede elétrica [4].

## 2.3 – Tipos de UPS

As UPS podem ser classificadas como rotativas, estando estas associadas a componentes eletromecânicos, ou estáticas, as quais utilizam conversores com dispositivos semicondutores de potência. É possível encontrar UPS que utilizam uma combinação das UPS rotativas e estáticas, sendo chamadas UPS híbridas [5]. As UPS estáticas podem subdividir-se em *offline*, *online* e interativa.

### 2.3.1 – UPS rotativa

Este tipo de UPS é o que existe há mais tempo, podendo atingir uma capacidade de fornecimento de potência até vários megawatts. A **Figura 2.2** mostra o diagrama de blocos de uma UPS rotativa.



**Figura 2.2** – Diagrama de blocos de uma UPS rotativa [5].

O conceito do funcionamento do sistema é simples. A rede elétrica alimenta o motor, que por sua vez movimenta o gerador que fornece energia para a carga. Caso a rede elétrica apresente distúrbios, o volante de inércia (massa girante) garante que o fornecimento de energia à carga não é afetado.

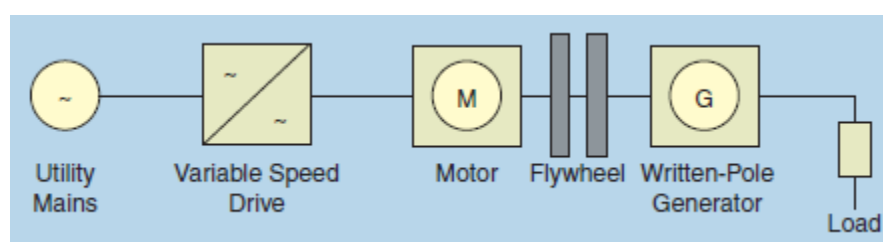
No entanto, apesar da simplicidade e confiabilidade do sistema, este apresenta algumas desvantagens, como por exemplo, as perdas existentes no grupo motor-gerador, o ruído provocado pelo funcionamento do sistema e a necessidade de manutenção.

### 2.3.2 – UPS híbrida

Um exemplo de uma UPS híbrida é a que é mostrada na **Figura 2.3**.

O gerador consegue manter a frequência aos seus terminais constante, desde que a velocidade do rotor do gerador situe-se entre as 3150 e 3600 rpm [5].

É utilizado um controlador de velocidade variável (conversor AC/AC) para manter o volante de inércia a girar a uma velocidade tal, que permita que a velocidade do rotor do gerador continue acima das 3150 rpm quando a rede elétrica falha.



**Figura 2.3** – Diagrama de blocos de uma UPS híbrida [5].

### 2.3.3 – UPS estáticas

As UPS estáticas baseiam-se na utilização de retificadores e inversores de potência, ou seja, dispositivos sem peças móveis. Os dispositivos semicondutores de potência são parte integrante dos retificadores e inversores, desde modo, estes elementos permitiram a redução em peso, volume e ruído das UPS.



Segundo as normas IEC 62040-3 e ENV 500091-3 [5] as UPS estáticas podem ser classificadas como:

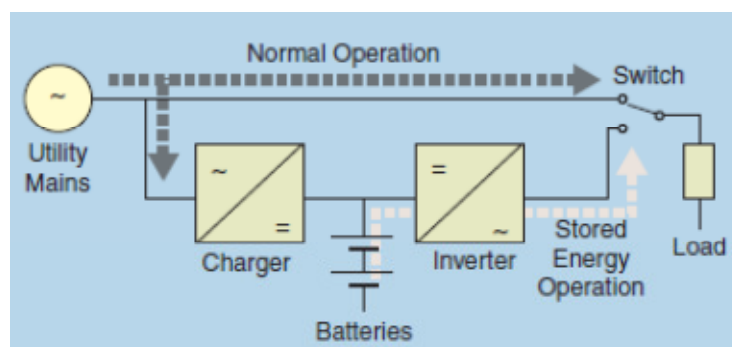
- *offline* (ou espera passiva);
- *online* (ou de dupla conversão);
- interativa.

### 2.3.3.1 – UPS *offline*

É mostrado o diagrama de blocos de uma UPS *offline* na **Figura 2.4**, o qual é constituído por: retificador, banco de baterias, inversor e um comutador.

No modo normal de operação da UPS, a rede elétrica fornece a energia necessária para a carga funcionar e as baterias são mantidas carregadas. Quando existe uma falha da rede ou a rede tem muitas perturbações, o comutador liga o inversor à carga para que as baterias possam fornecer energia.

O tempo de transferência entre o modo normal de funcionamento e o modo *backup* é geralmente inferior a meio período da rede.



**Figura 2.4** – Diagrama de blocos de uma UPS *offline* [5].

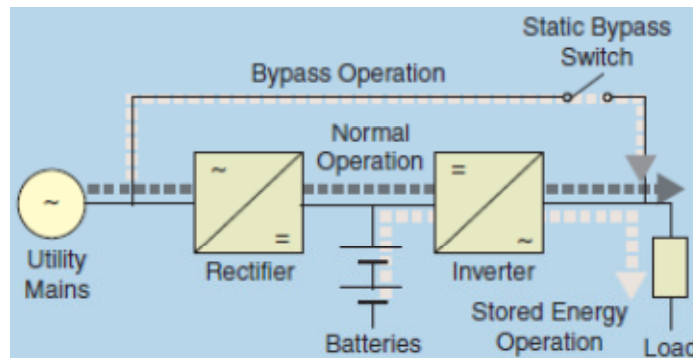
Esta topologia assume um compromisso entre custo e desempenho contra distúrbios da rede. A UPS *offline* possui um desenho simples, um baixo custo e reduzido tamanho [6]. Na realidade ela apenas consegue proteger a carga contra as perturbações da rede se mudar o funcionamento para o modo *backup*.

### 2.3.3.2 – UPS *online*

A topologia de uma UPS *online* está representada na **Figura 2.5**. Nesta topologia, o inversor está continuamente em funcionamento, quer no modo normal de operação, quer no modo *backup*. No modo normal de operação o retificador é responsável por carregar as baterias e por entregar a energia da rede elétrica ao inversor,

que por sua vez alimenta a carga. Quando a rede elétrica falha, o inversor vai buscar a energia armazenada às baterias.

O interruptor estático de desvio é acionado quando existe uma sobrecarga, de forma a garantir o contínuo fornecimento de energia à carga.



**Figura 2.5** – Diagrama de blocos de uma UPS *online* [5].

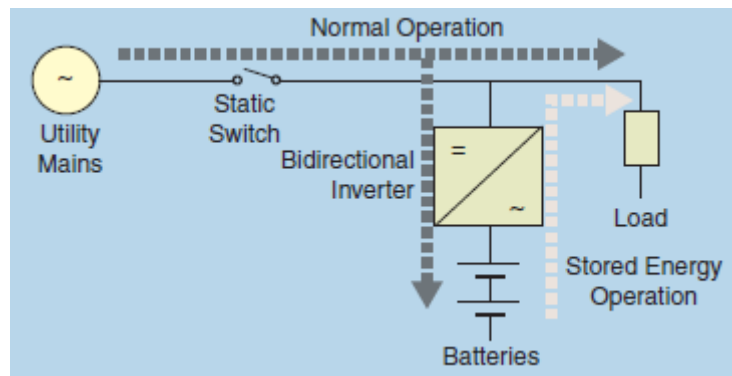
A UPS *online* é em geral a topologia com maior fiabilidade, possuindo muitas vantagens, tais como: proteção contínua da carga contra as perturbações da rede elétrica, tempo de transição entre os modos de operação praticamente nulo, elevada qualidade da forma de onda da tensão de saída em termos de amplitude e frequência [6]. Embora a eficiência deste tipo de UPS possa chegar até aos 94%, a principal desvantagem desta topologia são as perdas decorrentes de energia, associadas à dupla conversão.

### 2.3.3.3 – UPS interativa

O diagrama de blocos de uma UPS interativa está representado na **Figura 2.6**.

No modo normal de operação a carga é alimentada diretamente pela rede elétrica e o conversor bidirecional atua como retificador, mantendo as baterias carregadas.

Em modo *backup* o interruptor estático desliga a carga da rede elétrica e o conversor bidirecional funciona como inversor, alimentando a carga através da energia armazenada nas baterias.



**Figura 2.6** – Diagrama de blocos de uma UPS interativa [5].

Esta topologia apresenta algumas vantagens em relação à UPS *online*, tal como menor custo e maior eficiência, uma vez que apenas tem um conversor. No entanto, apresenta como desvantagem a impossibilidade de realizar a correção da frequência da tensão de saída, na situação em operação normal [6].

Na **Figura 2.7** estão representadas as potências típicas de utilização das diferentes tipologias de UPS. É observável que a UPS *offline* é mais utilizada em situações que requerem menor potência, enquanto a UPS *online* tem uma gama de utilização de potência mais ampla.

	0.5 kVA	1.5 kVA	3 kVA	10 kVA	100 kVA	>1000 kVA
UPS <i>offline</i>						
UPS interativa						
UPS <i>online</i>						

**Figura 2.7** – Gama de potências típicas de uso das topologias das UPS [7].

Quanto às aplicações mais típicas dada a cada tipo de UPS, conforme representado na **Figura 2.8**, é verificável que a UPS *online* é utilizada para uma série mais diversificada de aplicações.

	UPS <i>offline</i>	UPS interativa	UPS <i>online</i>
Computadores pessoais			
Equipamentos de redes de computadores			
Centrais de processamento de dados			
Indústria			
Centrais de Telecomunicações			

**Figura 2.8** – Aplicações típicas de uso das topologias das UPS [7].

Pelas razões atrás apresentadas, nomeadamente pelas vantagens referentes à UPS *online*, e uma vez que as aplicações típicas associadas a esta topologia são as que melhor se enquadram no tema desta tese, a UPS *online* será a topologia alvo de estudo neste trabalho.

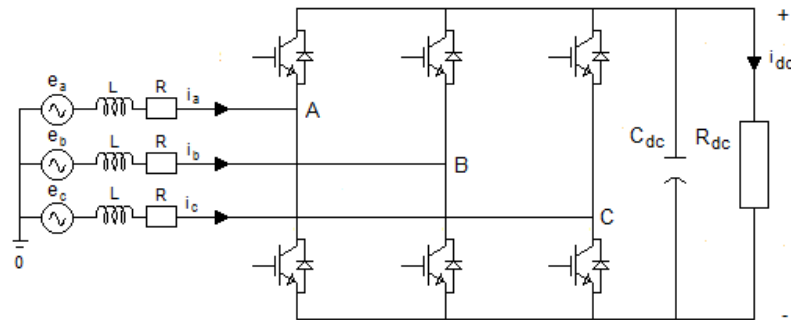
## 2.4 – Retificador

O retificador é responsável pela conversão de uma grandeza alternada em contínua. Os retificadores que utilizam díodos e tirístores provocam uma grande poluição harmónica para a REE, uma vez que as correntes retiradas da rede não possuem uma forma sinusoidal [8].

Os retificadores atuais são obrigados a cumprir normas internacionais (IEC 1000-3-2 e IEEE 519), que limitam o conteúdo harmónico que estes podem injetar na REE. Deste modo, para cumprir as normas é necessário a utilização de retificadores que permitam retirar da REE correntes quase sinusoidais. Tais retificadores são designados de “retificadores de elevado fator de potência”, os quais permitem obter fatores de potência quase unitários [8].

No trabalho da referência [8] foi utilizado um retificador trifásico com elevado fator de potência, com controlo PWM (*Pulse Width Modulation*). É composto por seis interruptores com díodos colocados em antiparalelo, capaz de retirar correntes de entrada sinusoidais e tem a particularidade do fluxo de potência ser bidirecional.

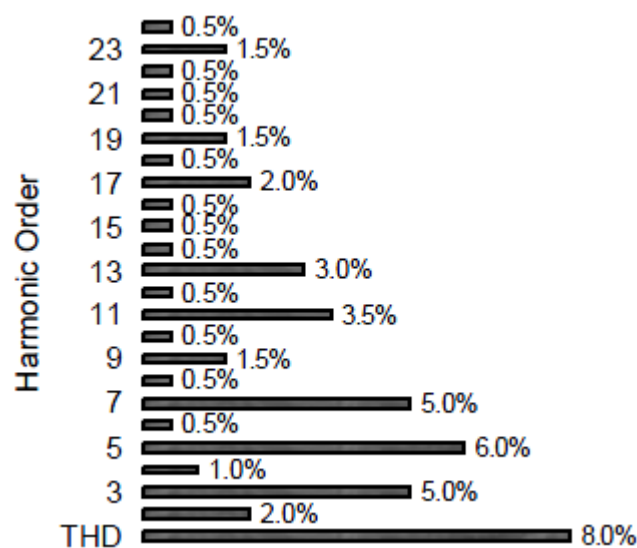
Na **Figura 2.9** representa-se o esquema deste retificador trifásico.



**Figura 2.9** – Retificador trifásico.

## 2.5 – Inversor

No caso de um inversor trifásico, este destina-se a fornecer uma onda trifásica a partir de uma fonte *dc*. Pela norma IEC 62040-3 a onda de tensão entregue deve possuir uma distorção harmónica total (THD – *Total Harmonic Distortion*) inferior a 8% [9]. O valor máximo de 8% para a THD também é definido na norma europeia EN 50160 [10] e na norma portuguesa NP EN 50160 [11]. Na **Figura 2.10** são apresentados os limites dos harmónicos até à ordem 24 (inclusive), definidos na norma EN 50160 para a tensão de alimentação.



**Figura 2.10** – Limitações dos harmónicos na norma EN 50160 [10].

Existe a necessidade da colocação de um filtro constituído por bobinas e/ou condensadores entre a saída do inversor e a carga, de forma a limitar o THD, uma vez que as ondas à saída do inversor são compostas por valores discretos, dada também a natureza discreta dos interruptores que constituem o inversor.

## **2.6 – Baterias**

Uma UPS necessita de um sistema de armazenamento de energia para poder funcionar, sendo as baterias a forma mais utilizada para armazenar energia. As baterias são um elemento fundamental na construção de uma UPS, uma vez que serão estas a suprir as necessidades da carga, por meio do inversor, em caso de distúrbios na REE.

### **2.6.1 – Tipos de baterias**

A norma IEEE 1184 [12], *Guide for Batteries for Uninterruptible Power Supply Systems*, estabelece um guia recomendado para os tipos de baterias adequados para utilização em UPS.

#### **2.6.1.1 – Chumbo-ácido ventilada**

Estas baterias possuem uma resistência interna baixa, podendo fornecer valores elevados de corrente durante um curto espaço de tempo. A tensão de flutuação indicada para as células deste tipo de bateria situa-se entre os 2,15 e os 2,30 V/célula.

#### **2.6.1.2 – Chumbo-ácido regulada por válvula**

As baterias chumbo-ácido reguladas por válvula, quando possuem uma pressão interna excessiva libertam gases pela abertura da válvula. Assim, estas devem ser colocadas em lugares com boa ventilação e afastadas de equipamentos eletrónicos ou fontes de calor.

A tensão de flutuação aplicada a estas células localiza-se entre os 2,20 até 2,35 V/célula.

#### **2.6.1.3 – Níquel-Cádmio ventiladas**

É um tipo de baterias que suporta bem utilizações contínuas ou descargas profundas. Além disto, são resistentes a pressões mecânicas e mais tolerantes a uma gama alargada de temperaturas, relativamente às baterias de Chumbo-ácido, quando em operação.

Para este género de baterias, a tensão de flutuação está dentro dos valores de 1,40 aos 1,47 V/célula.

#### **2.6.1.4 – Níquel-Cádmio seladas**

Estas baterias possuem uma capacidade de armazenamento de energia limitada, pelo que a sua utilização é mais indicada para UPS com potências menores [12].

#### **2.6.2 – Ciclo de vida da bateria**

É necessário levar em conta alguns fatores, de forma a prolongar o ciclo de vida de uma bateria. Uma bateria a operar a uma temperatura entre 20° e 25° consegue ter um ciclo de vida maior. A utilização contínua da bateria, mesmo que por pouco tempo, a imposição de descargas profundas ou a presença de tremor (*ripple*) no carregamento em corrente ou na tensão de flutuação, provocará a diminuição do tempo de vida da bateria. De forma a garantir o máximo ciclo de vida da bateria, é indicado seguir as recomendações sugeridas pelos fabricantes, como por exemplo, o valor de tensão mais apropriado para o carregamento da bateria desse fabricante [12].

#### **2.6.3 – Tecnologias de armazenamento alternativas**

A referência [5] apresenta algumas formas de armazenamento de energia alternativo às baterias, como por exemplo, supercondensadores, ar comprimido ou células de combustível. São apresentados também os esquemas de interligação com o resto do sistema UPS. No entanto, comparativamente às tecnologias de armazenamento alternativas, é mais comum a utilização de baterias devido à sua disponibilidade e por ser uma tecnologia mais assente no mercado.

### **2.7 – DSP**

A utilização de componentes discretos, por exemplo transístores, para efetuar o controlo analógico de uma UPS acarreta várias desvantagens. O controlo analógico implica o uso de um grande número de componentes discretos, aumentando assim os custos com o *hardware*. Para além dos custos, o elevado número de componentes dificulta a localização correta no caso da ocorrência de uma falha.

No caso de uma UPS ser controlada de uma forma analógica, tem consequentemente associada a si um *hardware* específico. Possíveis *upgrades* ou a

implementação de novos tipos de controlo à UPS também ficam impossibilitados sem mudanças no *hardware* [13].

Os DSPs (*Digital Signal Processors*) permitem a implementação eficiente de algoritmos de controlo complicados, uma vez que possuem um grande poder de processamento. Desta forma, o controlo de uma UPS realizado por um DSP facilita a execução de esquemas de controlo mais avançados e robustos, com uma maior flexibilidade e versatilidade nas aplicações [14].

Para além do mais, podem ser executadas melhorias ao sistema ao nível do controlo através da atualização de *software*, sem existir a necessidade de efetuar alterações a nível de *hardware*.

## **2.8 – Técnicas de controlo**

Na literatura, um dos controlos mais estabelecidos e mais comuns de encontrar na indústria é o controlo por PWM. O crescimento da capacidade de processamento dos microcontroladores e DSPs tornou possível a implementação de novos tipos de controlo mais exigentes a nível de *hardware* [15].

O controlo por modo de deslizamento é um tipo de controlo alternativo. Um dos trunfos deste método reside na relativa simplicidade da síntese de controlo [16].

Por forma a prever o comportamento futuro das variáveis, o controlo preditivo utiliza o modelo do sistema. Assim, pode dar a ordem de comando mais adequada consoante um critério de otimização pré-selecionado [15].

O compensador PI (Proporcional Integral) é largamente utilizado e é um dos controladores mais utilizados na indústria, devido à facilidade de implementação e a qualidade de compensação que consegue atingir [17].

### **2.8.1 – Controlo por modo de deslizamento**

Os conversores de potência são estruturas variáveis, uma vez que os semicondutores de potência agem como interruptores para efetuarem a conversão da energia elétrica. O controlo destes sistemas não é efetuado por ações de comando contínuas, isto é, as ordens de comando apenas são realizadas quando existem superfícies de descontinuidade entre estruturas.



A comutação a uma frequência infinita entre estruturas cria uma trajetória que desliza ao longo da superfície de descontinuidade. A esta forma de controlo designa-se por modo de deslizamento [16] [18].

O controlo por método de deslizamento é um método robusto, com controlo não linear e não necessitando de um modelo matemático rígido do sistema, desde que conheça as variações dos parâmetros do mesmo [19].

Em sistemas realimentados, na definição da lei de controlo, é mais simples definir os erros  $e_i$  das variáveis de estado  $x_i$  em relação às suas referências  $x_{ir}$ , como sendo as novas variáveis de estado [16][18]

$$e_i = x_{ir} - x_i. \quad (2.1)$$

A superfície de comutação, tendo em conta uma frequência de comutação finita, é

$$S(e_i, t) = \Delta \rightarrow 0. \quad (2.2)$$

Idealmente, a comutação a uma frequência infinita entre estruturas no controlo por modo de deslizamento, define uma trajetória que desliza ao longo da superfície de descontinuidade, pelo que o erro  $\Delta$  seria nulo.

A lei de comando aplicável aos interruptores pode ser definida da seguinte forma

$$\delta(t) = \begin{cases} 1 & \text{se } S(e_i, t) > 0 \\ -1 & \text{se } S(e_i, t) < 0 \end{cases}. \quad (2.3)$$

Uma vez que os conversores não conseguem comutar a uma frequência infinita, é comum definir uma banda de histerese  $2\varepsilon$  centrada na referência. Agora, a lei de comutação é definida por

$$\delta(t) = \begin{cases} 1 & \text{se } S(e_i, t) > \varepsilon \\ -1 & \text{se } S(e_i, t) < -\varepsilon \end{cases}. \quad (2.4)$$

## 2.8.2 – Controlo preditivo

Dentro do controlo preditivo existe o FS-MPC (*Finite Sates Model Predictive Control*) [15], que leva em consideração a natureza discreta dos interruptores dos conversores de potência. Assim, a escolha da solução ótima passa por verificar todas as combinações possíveis dos estados dos interruptores e seleccionar aquela que minimize a função custo. Para além do mais, se o comprimento do horizonte (número de previsões futuras) for reduzido a 1 ( $N=1$ ), o cálculo da solução ótima é mais fácil.

Na definição do modelo do sistema é tido em consideração a natureza discreta dos interruptores, em que estes apenas podem possuir dois estados: ligado ou desligado.

Tendo em conta que num conversor em ponte os interruptores do mesmo braço não podem estar ligados ao mesmo tempo (curto-circuito no lado contínuo), o número de combinações possíveis dos estados dos interruptores é dado por

$$x^y \quad (2.5)$$

em que  $x$  é o número possível de estados de cada braço do conversor e  $y$  é o número de braços do conversor.

Por exemplo, para um conversor trifásico em ponte de dois níveis este possui  $2^3 = 8$  estados e um conversor trifásico de três níveis terá  $3^3 = 27$  combinações possíveis.

A função de custo de um inversor trifásico de dois níveis, pode ser definida por [13]

$$g = |i_\alpha(k) - i_\alpha(k + 1)| + |i_\beta(k) - i_\beta(k + 1)|, \quad (2.6)$$

onde  $i_\alpha(k)$  e  $i_\beta(k)$  são respetivamente a parte real e imaginária do vetor da corrente de referência e  $i_\alpha(k + 1)$  e  $i_\beta(k + 1)$  correspondem à parte real e imaginária do vetor da corrente prevista, respetivamente.

### 2.8.3 – Controlador PI

As razões para que o compensador PI seja utilizado há várias décadas devem-se à sua simplicidade e eficácia no processo de controlo. Existem dados que demonstram que pelo menos 90% dos controladores industriais atuais utilizam o método de controlo PI [20].

- No trabalho da referência [21] foi utilizada uma combinação entre duas técnicas de controlo para controlar um filtro ativo de potência. É proposta a utilização de duas malhas de controlo: uma malha interna para controlo da corrente, utilizando o controlo por modo de deslizamento, e uma malha externa que emprega o controlo PI de modo a controlar a tensão.

# Capítulo 3

## CONVERTOR TRIFÁSICO DE CORRENTE AC

Neste capítulo é abordado o controlo por modo de deslizamento e o controlo preditivo, por forma a realizar o controlo da corrente *ac*. No início é apresentada a topologia do conversor trifásico e são obtidos os modelos do mesmo no sistema de coordenadas *abc* e  $\alpha\beta 0$ . A partir do modelo do conversor no sistema de coordenadas  $\alpha\beta 0$  são desenvolvidos e apresentados o controlo por modo de deslizamento e o controlo preditivo. No final do capítulo são apresentados alguns resultados, permitindo efetuar uma comparação do desempenho entre os dois controladores desenvolvidos para o controlo das correntes trifásicas.

### 3.1 – Introdução

O conversor é um dos principais elementos de uma UPS, seja atuando como inversor (DC/AC) ou como retificador (AC/DC).

As correntes da REE ou entregues à carga pelo conversor devem ter a forma sinusoidal e com baixo tremor, para cumprir com as normas de qualidade de energia elétrica [9] [10] [11]. É tarefa dos controladores de corrente controlar a mesma, de maneira a ser atingida a melhor forma de onda possível. Por vezes, é mais adequado para os controladores efetuar o controlo das variáveis do sistema, se estas variáveis estiverem indexadas a um outro referencial. No sistema de coordenadas  $abc$ , para um sistema trifásico equilibrado e sem neutro acessível ( $i_a + i_b + i_c = 0$ ), existem duas correntes linearmente dependentes. Aplicando a transformada de *Clarke-Concórdia* às correntes  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$ , estas são indexadas a outro referencial ( $\alpha\beta$ ) onde são representadas pela componente real da corrente,  $i_\alpha$ , e pela componente imaginária,  $i_\beta$ . Este sistema de eixos é ortogonal, pelo que as componentes real e imaginária da corrente são linearmente independentes, simplificando o processo de controlo realizado pelo controlador.

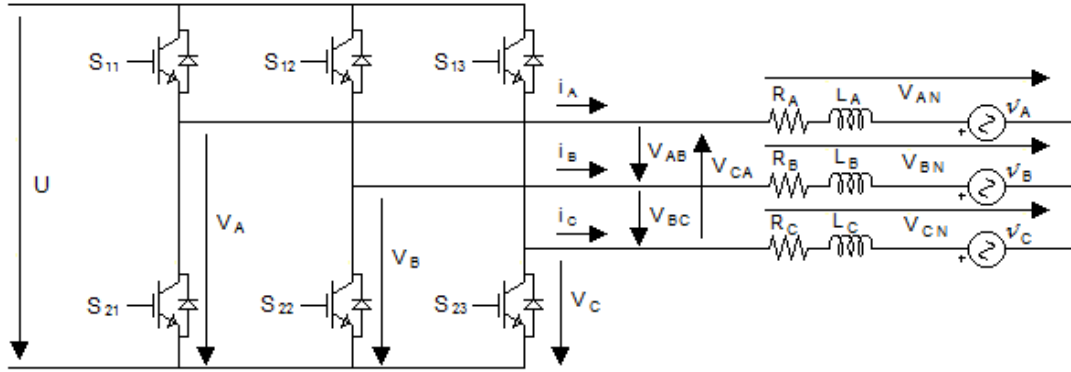
O controlo por modo de deslizamento não necessita de um modelo matemático rígido do sistema, atuando através do conhecimento das variações dos parâmetros, neste caso, das correntes. Para tal, este necessita de utilizar uma malha de realimentação para comparação das correntes com as suas referências, de modo a obter o erro.

No controlo preditivo é utilizado o modelo matemático do sistema para prever a corrente, considerando todos os estados possíveis do conversor. É utilizada uma função que pesa ou pondera os erros e determina qual deverá ser o estado do conversor, de forma a minimizar os erros das correntes.

### 3.2 – Topologia

Na **Figura 3.1** está representado um conversor trifásico, com sentido bidirecional de potência, ou seja, é capaz de transferir energia do lado  $dc$  para o lado  $ac$  e vice-versa, sem a necessidade da alteração da sua topologia. Este é constituído por três braços, sendo cada braço constituído por um par de semicondutores de potência, neste caso IGBT's (*Insulated Gate Bipolar Transistor*).

Como os semicondutores de potência só podem estar num estado discreto (ligados ou desligados), a saída do conversor ( $V_A$ ,  $V_B$  e  $V_C$ ) também é composta por valores discretos, daí a necessidade da colocação de um filtro, neste circuito constituído por uma bobina, entre o conversor e a rede/carga, de modo a atenuar as perturbações na forma de onda *ac*.



**Figura 3.1** – Conversor trifásico.

### 3.3 – Modo de funcionamento

Na **Tabela 3.1** são apresentados os valores das tensões  $V_k$  ( $k=A, B, C$ ) e das tensões compostas ( $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$ ,  $V_{CA}$ ), consoante os estados possíveis dos semicondutores do conversor apresentado na **Figura 3.1**.

Os dois semicondutores de potência que formam um braço, não podem estar ligados ao mesmo tempo, uma vez que resultaria num curto-circuito no lado *dc*. Assim, os sinais de comando dos IGBT's devem ser complementares, isto é,  $S_{1j} = \overline{S_{2j}}$  ( $j=1, 2, 3$ ).

**Tabela 3.1** – Valores das tensões em cada braço e das tensões compostas para os estados possíveis dos semicondutores.

$S_{11}$	$S_{12}$	$S_{13}$	$V_A$	$V_B$	$V_C$	$V_{AB}$	$V_{BC}$	$V_{CA}$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	U	0	-U	U
0	1	0	0	U	0	-U	U	0
0	1	1	0	U	U	-U	0	U
1	0	0	U	0	0	U	0	-U
1	0	1	U	0	U	U	-U	0
1	1	0	U	U	0	0	U	-U
1	1	1	U	U	U	0	0	0

As tensões  $V_k$  ( $k=A, B, C$ ) podem ser definidas por uma função  $\gamma_k$

$$V_k = \gamma_k U \quad (3.1)$$

onde  $\gamma_k$  é uma função dita de existência ou de comutação, dada por

$$\gamma_k = \begin{cases} 1 & \text{se } S_{1j} \text{ ligado e } S_{2j} \text{ desligado} \\ 0 & \text{se } S_{1j} \text{ desligado e } S_{2j} \text{ ligado} \end{cases} \quad (3.2)$$

As tensões compostas  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  e  $V_{CA}$  são definidas por:

$$V_{AB} = V_A - V_B = (\gamma_A - \gamma_B)U = V_{AN} - V_{BN}; \quad (3.3)$$

$$V_{BC} = V_B - V_C = (\gamma_B - \gamma_C)U = V_{BN} - V_{CN}; \quad (3.4)$$

$$V_{CA} = V_C - V_A = (\gamma_C - \gamma_A)U = V_{CN} - V_{AN}. \quad (3.5)$$

Considerando um sistema equilibrado, a relação entre as tensões simples  $V_{kN}$  é

$$V_{AN} + V_{BN} + V_{CN} = 0. \quad (3.6)$$

Através da manipulação de (3.3), (3.4), (3.5) e (3.6) é possível relacionar o valor das tensões simples, com o valor da tensão  $dc$  e dos estados dos semicondutores:

$$V_{AN} = \frac{(2\gamma_A - \gamma_B - \gamma_C)}{3} U; \quad (3.7)$$

$$V_{BN} = \frac{(2\gamma_B - \gamma_C - \gamma_A)}{3} U; \quad (3.8)$$

$$V_{CN} = \frac{(2\gamma_C - \gamma_A - \gamma_B)}{3} U. \quad (3.9)$$

De (3.7), (3.8) e (3.9), verifica-se que o valor mínimo para o degrau das tensões simples é  $\pm \frac{U}{3}$ .

### 3.4 – Modelo da dinâmica do conversor

Nesta secção são apresentadas as equações da dinâmica do conversor, em diferentes sistemas de coordenadas, de modo a ser realizável o controlo das correntes  $i_k$  ( $k=A, B, C$ ).

#### 3.4.1 – Modelo no sistema de coordenadas $abc$

Da análise à **Figura 3.1**, aplicando a lei das malhas, é possível retirar que

$$V_{kN} = L_k \frac{di_k}{dt} + R_k i_k + v_k. \quad (3.10)$$

Colocando (3.10) em ordem de  $\frac{di_k}{dt}$ , tendo em conta (3.7), (3.8) e (3.9), representa-se o modelo do sistema na forma matricial.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_A}{dt} \\ \frac{di_B}{dt} \\ \frac{di_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2\gamma_A - \gamma_B - \gamma_C}{3L_A} \\ \frac{2\gamma_B - \gamma_C - \gamma_A}{3L_B} \\ \frac{2\gamma_C - \gamma_B - \gamma_A}{3L_C} \end{bmatrix} [U] + \begin{bmatrix} -\frac{R_A}{L_A} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_B}{L_B} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_C}{L_C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_A} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_B} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

### 3.4.2 – Modelo no sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$

Num sistema trifásico equilibrado, as correntes  $i_A$ ,  $i_B$  e  $i_C$  são linearmente dependentes ( $i_A + i_B + i_C = 0$ ). No sistema de coordenadas  $\alpha\beta 0$  é possível representar o sistema por um equivalente, através de duas correntes ( $i_\alpha$  e  $i_\beta$ ) uma vez que a componente homopolar é nula.

A relação entre o sistema nas coordenadas  $abc$  e  $\alpha\beta 0$  é dada pela transformada de *Clarke-Concórdia*, definida por [22]

$$[X_{abc}] = [C][X_{\alpha\beta 0}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} [X_{\alpha\beta 0}]. \quad (3.12)$$

Pelo facto da matriz de transformação  $C$  ser ortogonal, usufrui da propriedade

$$[C]^T = [C]^{-1}. \quad (3.13)$$

Considera-se que cada bobina tem um valor do coeficiente de auto-indução igual, com um valor genérico do coeficiente de auto-indução  $L$ .

$$L_A = L_B = L_C = L \quad (3.14)$$

De forma semelhante, é considerado que o valor das resistências de perdas das bobinas é igual entre si, e igual a um valor genérico de resistência de perdas nas bobinas,  $R$ .

$$R_A = R_B = R_C = R \quad (3.15)$$

A representação no sistema de coordenadas  $\alpha\beta$  de (3.11) é

$$\begin{bmatrix} \frac{di_\alpha}{dt} \\ \frac{di_\beta}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_\alpha \\ \gamma_\beta \end{bmatrix} [U] + \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}, \quad (3.16)$$

onde  $\gamma_\alpha$  e  $\gamma_\beta$  são dados por:

$$\gamma_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} \left( \gamma_A - \frac{\gamma_B}{2} - \frac{\gamma_C}{2} \right); \quad (3.17)$$

$$\gamma_\beta = \sqrt{\frac{2}{3}} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \gamma_B - \frac{\sqrt{3}}{2} \gamma_C \right). \quad (3.18)$$

### 3.5 – Controlo das correntes trifásicas

Nesta secção são apresentadas as técnicas de controlo das correntes trifásicas, sendo que o controlo das mesmas é realizado nas coordenadas  $\alpha\beta 0$ , utilizando um sistema de equações linearmente independente.

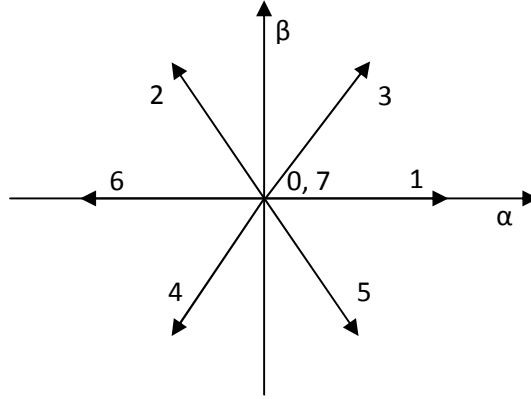
Considerando os oito estados possíveis do conversor trifásico (**Figura 3.1**) é possível relacionar os valores de  $\gamma_\alpha$  e  $\gamma_\beta$  com  $\gamma_k$ , a partir de (3.17) e (3.18). Na **Tabela 3.2** são apresentados os vetores possíveis para controlo do conversor.

**Tabela 3.2** – Vetores de controlo possíveis no conversor em ponte trifásico.

Vetor	$\gamma_A$	$\gamma_B$	$\gamma_C$	$\gamma_\alpha$	$\gamma_\beta$
0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	$\sqrt{\frac{2}{3}}$	0
2	0	1	0	$-\frac{1}{\sqrt{6}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$
3	1	1	0	$\frac{1}{\sqrt{6}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$
4	0	0	1	$-\frac{1}{\sqrt{6}}$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}$
5	1	0	1	$\frac{1}{\sqrt{6}}$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}$
6	0	1	1	$-\sqrt{\frac{2}{3}}$	0
7	1	1	1	0	0



Na **Figura 3.2** representa-se os vetores de controlo no plano  $\alpha\beta$ .



**Figura 3.2** – Vetores de controlo do conversor trifásico no plano  $\alpha\beta$ .

### 3.5.1 – Controlo por modo de deslizamento

O controlo da corrente é realizado em malha fechada, através da comparação da corrente de referência ( $i_{\alpha,\beta Ref}$ ) com a corrente medida ( $i_{\alpha,\beta}$ ). Desta comparação resulta o erro ( $e_{i_{\alpha,\beta}}$ ) definido por

$$e_{i_{\alpha,\beta}} = i_{\alpha,\beta Ref} - i_{\alpha,\beta}. \quad (3.19)$$

Considerando uma banda de histerese  $2\varepsilon$  centrada em  $i_{\alpha,\beta Ref}$ , num determinado instante o erro pode tomar uma das seguinte situações:

$$e_{i_{\alpha,\beta}} > +\varepsilon \Rightarrow i_{\alpha,\beta Ref} > i_{\alpha,\beta} \Rightarrow i_{\alpha,\beta} \uparrow; \quad (3.20)$$

$$+\varepsilon > e_{i_{\alpha,\beta}} > -\varepsilon \Rightarrow i_{\alpha,\beta Ref} \approx i_{\alpha,\beta} \Rightarrow i_{\alpha,\beta} \downarrow\uparrow; \quad (3.21)$$

$$e_{i_{\alpha,\beta}} < -\varepsilon \Rightarrow i_{\alpha,\beta Ref} < i_{\alpha,\beta} \Rightarrow i_{\alpha,\beta} \downarrow. \quad (3.22)$$

Dependendo se o valor de  $i_{\alpha,\beta}$  tem que aumentar, ser nulo ou diminuir, é necessário impor que a sua derivada  $\frac{di_{\alpha,\beta}}{dt}$  (3.16) cresça, mantenha-se ou diminua, através da seleção de um  $\gamma_{\alpha,\beta}$  positivo, nulo ou negativo:

$$i_{\alpha,\beta} \uparrow \Rightarrow \frac{di_{\alpha,\beta}}{dt} > 0 \Rightarrow \gamma_{\alpha,\beta} > 0; \quad (3.23)$$

$$i_{\alpha,\beta} \downarrow\uparrow \Rightarrow \frac{di_{\alpha,\beta}}{dt} \approx 0 \Rightarrow \gamma_{\alpha,\beta} = 0; \quad (3.24)$$

$$i_{\alpha,\beta} \downarrow \Rightarrow \frac{di_{\alpha,\beta}}{dt} < 0 \Rightarrow \gamma_{\alpha,\beta} < 0. \quad (3.25)$$

Na **Tabela 3.3** estão sintetizadas as combinações possíveis para os erros das correntes  $i_{\alpha,\beta}$  ( $e_{i_{\alpha,\beta}}$ ) e os vetores (**Figura 3.2**) que devem ser aplicados em cada caso.

**Tabela 3.3** – Escolha de vetores consoante os valores de  $e_{i_{\alpha,\beta}}$ .

	$e_{i_{\alpha}} > +\epsilon$	$+\epsilon > e_{i_{\alpha}} > -\epsilon$	$e_{i_{\alpha}} < -\epsilon$
$e_{i_{\beta}} > +\epsilon$	3	2 ou 3	2
$+\epsilon > e_{i_{\beta}} > -\epsilon$	1	0 ou 7	6
$e_{i_{\beta}} < -\epsilon$	5	4 ou 5	4

Deste modo, verifica-se a simplicidade do controlo por modo de deslizamento uma vez que a decisão consiste na escolha de um vetor pré-determinado, conforme o valor do erro medido.

### 3.5.2 – Controlo preditivo

No controlo preditivo é realizada a previsão da corrente  $i_{\alpha,\beta}(n+1)$  no próximo instante de amostragem com base no modelo do conversor e do estado da corrente  $i_{\alpha,\beta}(n)$ .

A partir de (3.16) e considerando um intervalo de tempo muito pequeno, tem-se

$$\frac{di_{\alpha,\beta}}{dt} \approx \frac{i_{\alpha,\beta}(n+1) - i_{\alpha,\beta}(n)}{\Delta t} = \frac{U}{L} \gamma_{\alpha,\beta} - \frac{R}{L} i_{\alpha,\beta} - \frac{v_{\alpha,\beta}}{L}. \quad (3.26)$$

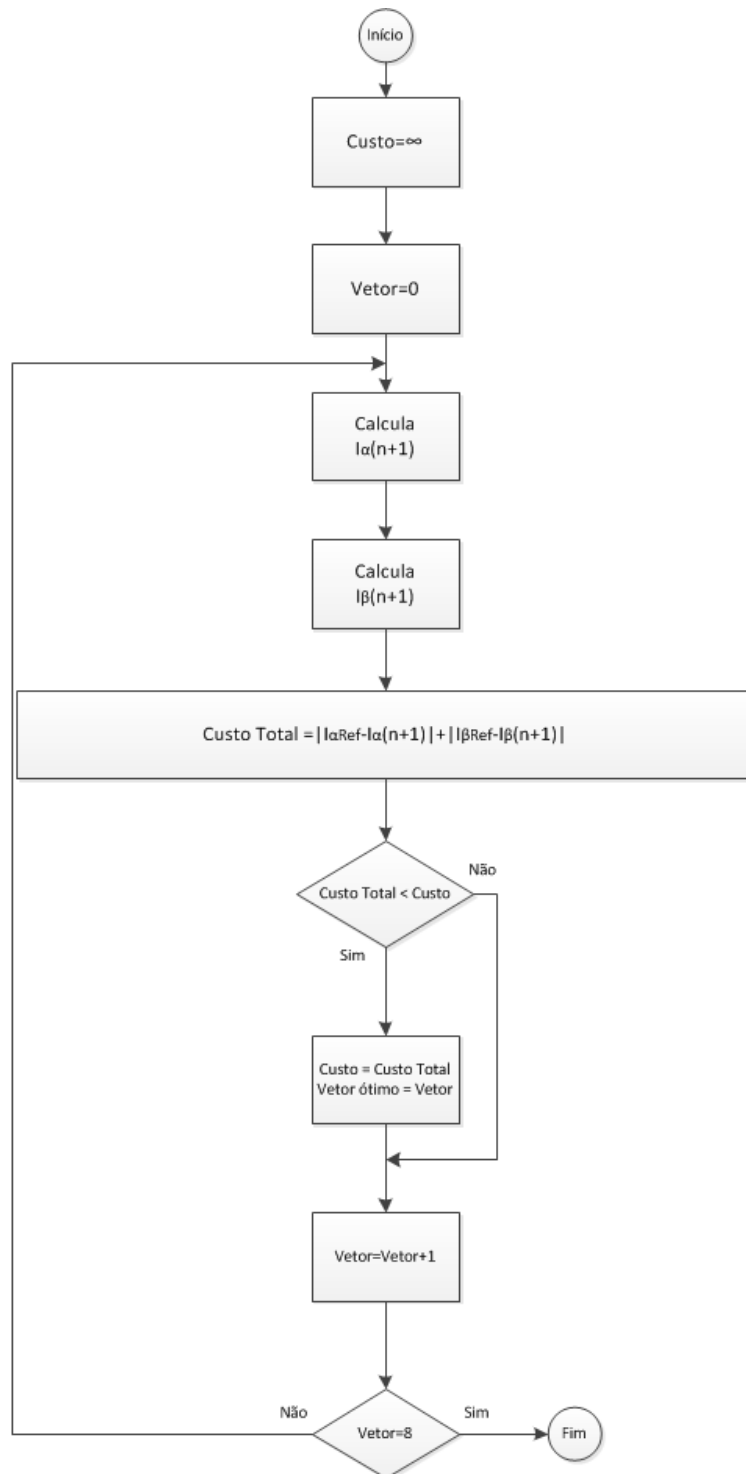
Colocando (3.26) em ordem a  $i_{\alpha,\beta}(n+1)$ , obtém-se

$$i_{\alpha,\beta}(n+1) = i_{\alpha,\beta}(n) + \frac{U}{L} \gamma_{\alpha,\beta} \Delta t - \frac{R}{L} i_{\alpha,\beta} \Delta t - \frac{v_{\alpha,\beta}}{L} \Delta t. \quad (3.27)$$

A função custo, aquela que minimiza o erro, compara todos os vetores possíveis (**Tabela 3.2**) de aplicar ao conversor e verifica qual o melhor (vetor ótimo). Esta função é definida por

$$Custo = |i_{\alpha Ref}(n+1) - i_{\alpha}(n+1)| + |i_{\beta Ref}(n+1) - i_{\beta}(n+1)|. \quad (3.28)$$

O fluxograma que descreve o funcionamento do algoritmo para aplicação do controlo preditivo, está representado na **Figura 3.3**. Foi implementado o algoritmo no ambiente de simulação MATLAB/SIMULINK, e o código encontra-se no **Anexo A**.



**Figura 3.3** – Fluxograma com a descrição do algoritmo para implementação do controle preditivo.

### 3.6 – Resultados de simulação

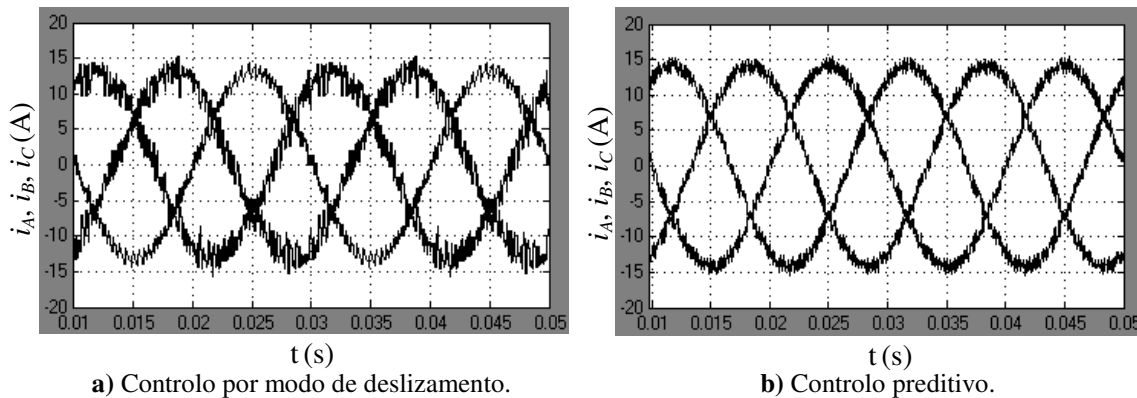
Foi implementado o controle por modo de deslizamento e o controle preditivo no conversor trifásico, desenhado no MATLAB/SIMULINK. Os resultados obtidos (**Figura 3.4** e **Figura 3.5**) servem como base de comparação, de forma a analisar o desempenho de cada um dos controladores de corrente. As figuras dos modelos

desenhados em MATLAB/SIMULINK, os valores dos parâmetros dos controladores e componentes utilizados durante a simulação encontram-se identificados no **Anexo B**.

Na **Figura 3.4 a)** está representado o resultado da simulação das correntes trifásicas em regime estacionário,  $i_{k_{Ref}} = 10 \text{ A (rms)}$  com  $k = A, B, C$ , utilizando o controlo por modo de deslizamento. Nas mesmas condições de simulação, está apresentado o resultado obtido (**Figura 3.4 b)**) utilizando o controlo preditivo.

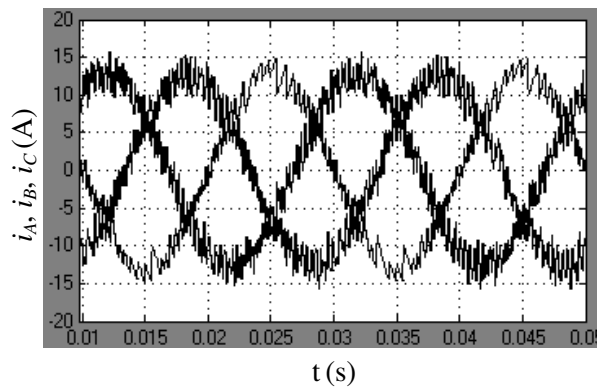
Os resultados de simulação mostram que, quer o controlo por modo de deslizamento (**Figura 3.4 a)**), quer o controlo preditivo (**Figura 3.4 b)**), conseguem impor que as correntes  $i_A, i_B$  e  $i_C$  sigam as correntes de referência  $i_{k_{Ref}} = 10 \text{ A (rms)}$  com  $k = A, B, C$ .

No entanto, é notório que o controlo preditivo demonstra um desempenho superior ao controlo por modo de deslizamento, uma vez que o tremor das correntes controladas de forma preditiva (**Figura 3.4 b)**) é menor que o tremor das correntes controladas por modo de deslizamento (**Figura 3.4 a)**). O valor da taxa de distorção harmónica (THD) da corrente obtida com o controlo por modo de deslizamento foi no máximo de 14,4%, enquanto para o controlo preditivo obteve-se 5,7%.



**Figura 3.4** – Correntes  $i_A, i_B$  e  $i_C$  do conversor trifásico em regime estacionário (vertical – 5A/Div e horizontal – 5 ms/Div).

Aumentando o valor da gama de histerese ( $\epsilon=0,5$ ) para reduzir o número de comutações, no controlo por modo de deslizamento, foi obtido o resultado mostrado na **Figura 3.5**. Foi verificado que o valor do THD aumentou da situação referida anteriormente (14,4%) para 17,1%.



**Figura 3.5** – Correntes  $i_A$ ,  $i_B$  e  $i_C$  do conversor trifásico em regime estacionário utilizando o controle por modo de deslizamento (vertical – 5A/Div e horizontal – 5 ms/Div).

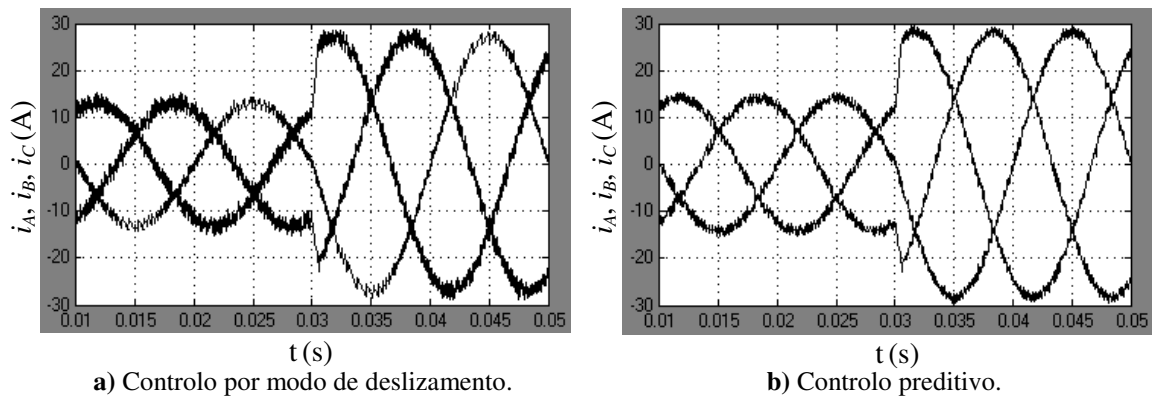
Na **Tabela 3.4** é realizada a título de comparação a relação entre o valor de THD da corrente com o número de comutações ocorridas em média em cada braço, para diferentes valores da gama de histerese e para um tempo de simulação de 0,2 s. Verifica-se através dos resultados que é possível diminuir o THD da corrente com a escolha de um valor para a gama de histerese mais pequeno, embora o custo seja o aumento do número de comutações ocorridas nos braços.

**Tabela 3.4** – Relação entre o número de comutações em cada braço e o THD.

Histerese ( $\epsilon$ )	THD	Nº médio de comutações
0,05	14,4%	807
0,5	17,1%	632

Também para um tempo de simulação de 0,2 s, o número médio de comutações ocorridas utilizando o controlo preditivo foi de 924. Deste modo verifica-se um número médio de comutações mais elevado utilizando o controlo preditivo, em relação ao controlo por modo de deslizamento.

Na **Figura 3.6** encontra-se representado o resultado da simulação em regime dinâmico à variação em degrau das correntes de referência. No instante de tempo 0,03s as correntes de referência mudam o seu valor para o dobro (de  $i_{k_{Ref}} = 10 A (rms)$  para  $i_{k_{Ref}} = 20 A (rms)$ ). Os resultados apresentados mostram que o controlo por modo de deslizamento (**Figura 3.6 a**) e o controlo preditivo (**Figura 3.6 b**) conseguem obter uma resposta com velocidade rápida (cerca de 0,6 ms), à transição brusca das correntes de referência. Comparando a resposta obtida no controlo por modo de deslizamento e no controlo preditivo é verificado que ambos possuem uma resposta semelhante.



**Figura 3.6** – Correntes  $i_A$ ,  $i_B$  e  $i_C$  do conversor trifásico em regime dinâmico (vertical – 5A/Div e horizontal – 5 ms/Div).

### 3.7 – Conclusões

Neste capítulo foi apresentada a topologia e explicado o modo de funcionamento de um conversor trifásico, com sentido bidirecional de transferência de energia. O controlo das correntes  $ac$  foi realizado no sistema de coordenadas  $\alpha\beta 0$ , através da aplicação da transformada de *Clarke-Concórdia*, facilitando o projeto dos controladores de corrente.

O controlo por modo de deslizamento, tal como o controlo preditivo, demonstraram conseguir impor que as correntes seguissem as suas correntes de referência, obtendo-se formas de onda alternadas e quase sinusoidais. Porém, o nível de tremor presente nas correntes controladas pelo modo de deslizamento foi superior ao atingido nas correntes controladas pelo controlo preditivo.

A taxa de distorção harmónica das correntes controladas pelo método de deslizamento é mais pequena, se for utilizado um valor menor para a gama de histerese, à custa do aumento do número de comutações nos braços do conversor.

Quer o controlo por modo de deslizamento, quer o controlo preditivo, na presença de uma transição brusca das correntes de referência, mostraram ter uma resposta com velocidade rápida e semelhante entre ambos.

# Capítulo 4

## CONVERTOR DC/AC, AC/DC E AC/AC TRIFÁSICO

Neste capítulo é realizado o controlo das tensões através da utilização de um compensador linear, onde no conversor DC/AC são controladas as tensões alternadas na carga e no conversor AC/DC é efetuado o controlo da tensão  $dc$  retificada. Para tal, são apresentadas as equações que permitem obter os modelos do conversor DC/AC e AC/DC no sistema de coordenadas  $dq0$ , por forma a facilitar o projeto dos controladores de tensão. No final do capítulo é apresentado o conversor AC/AC, que engloba o conversor DC/AC e o conversor AC/DC, sendo apresentada a forma do dimensionamento dos componentes deste e aplicado a um exemplo prático.

## 4.1 – Introdução

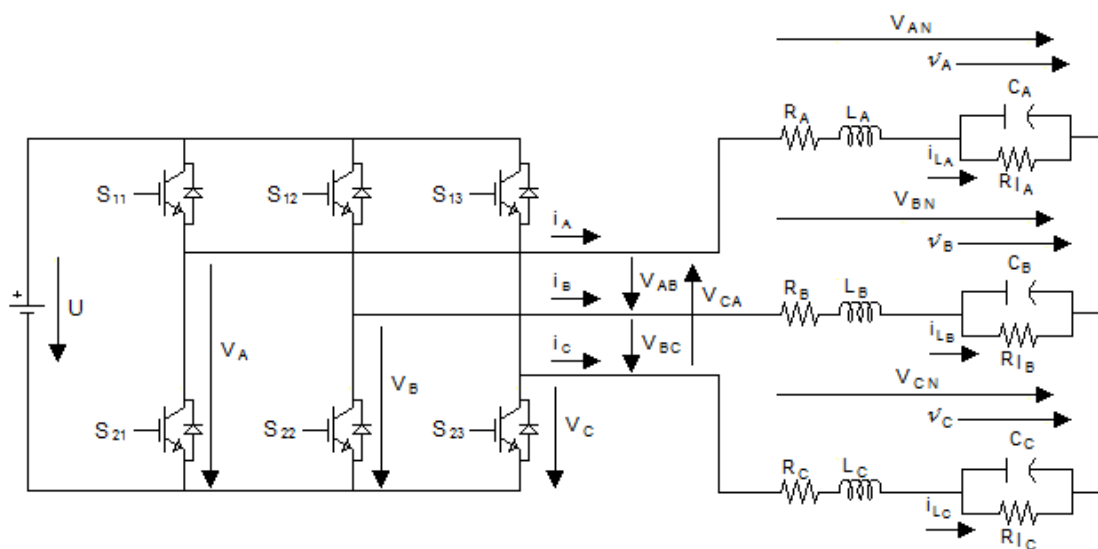
Dependendo se a tensão à saída do conversor trifásico é alternada ou contínua, este pode tomar a designação de conversor DC/AC (ou inversor de tensão AC) ou conversor AC/DC (ou retificador de tensão DC), respetivamente.

Uma das formas de efetuar o controlo de tensão é pela utilização de um compensador linear, sendo que este deverá compensar o valor da tensão à saída do conversor se esta afastar-se do valor da tensão de referência.

Uma UPS de dupla conversão consiste basicamente na junção do conversor DC/AC com o conversor AC/DC e um sistema de armazenamento de energia, faltando depois só os automatismos de controlo da UPS. É comum a utilização de baterias como método de armazenamento de energia, sendo que é importante efetuar o dimensionamento apropriado destas de forma a fornecer energia pelo tempo pré-determinado.

## 4.2 – Inversor de tensão AC

Na **Figura 4.1** está representado o esquema do conversor trifásico a funcionar como inversor. A carga trifásica está ligada em estrela, sem neutro acessível. A presença do filtro LC em cada fase é necessária para a obtenção de uma onda de tensão sinusoidal na carga.



**Figura 4.1** – Esquema do conversor trifásico funcionando como inversor de tensão ac.



#### 4.2.1 – Modelo da dinâmica do inversor

Nesta secção são apresentadas as equações da dinâmica do inversor trifásico.

##### 4.2.1.1 – Modelo no sistema de coordenadas $abc$

Observando a **Figura 4.1** e aplicando a lei de Kirchhoff das correntes nos nós obtém-se

$$i_k = C_k \frac{dv_k}{dt} + i_{l_k}, \quad (4.1)$$

com  $k=A, B, C$ .

Colocando (4.1) na forma matricial e em ordem a  $\frac{dv_k}{dt}$  fica-se com

$$\begin{bmatrix} \frac{dv_A}{dt} \\ \frac{dv_B}{dt} \\ \frac{dv_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_A} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_B} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_A} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_B} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{C_C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{l_A} \\ i_{l_B} \\ i_{l_C} \end{bmatrix}. \quad (4.2)$$

A equação da dinâmica das correntes do inversor de tensão é igual à que fora apresentada em (3.11).

##### 4.2.1.2 – Modelo no sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$

Aplicando a transformada de *Clarke-Concórdia* (3.12) à equação anterior (4.2), tem-se

$$\begin{bmatrix} \frac{dv_\alpha}{dt} \\ \frac{dv_\beta}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{C} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{l_\alpha} \\ i_{l_\beta} \end{bmatrix}. \quad (4.3)$$

A equação da dinâmica da corrente do inversor de tensão no sistema de coordenadas  $\alpha\beta 0$  é idêntica à mostrada em (3.16).

As equações (3.16) e (4.3) representam o modelo do conversor trifásico a funcionar como inversor de tensão, no sistema de coordenadas  $\alpha\beta 0$ . Este modelo é linearmente independente mas é não linear e variante no tempo. De modo a ser obtida a invariância temporal em regime permanente ou estacionário, pode ser aplicada a transformada de *Park* ao modelo do sistema.

#### 4.2.1.3 – Modelo no sistema de coordenadas $dq0$

A relação entre variáveis representadas no sistema de coordenadas  $\alpha\beta0$  e no sistema de coordenadas  $dq0$  é

$$[X_{\alpha\beta0}] = [D][X_{dq0}] = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} [X_{dq0}] \quad (4.4)$$

com

$$\theta = \omega t + \phi \quad (4.5)$$

onde  $\omega$  é o valor da frequência angular das grandezas  $ac$  e  $\phi$  é o valor inicial da fase.

A matriz de transformação  $D$  usufrui da seguinte propriedade [22]

$$[D]^T = [D]^{-1}. \quad (4.6)$$

Aplicando a transformada de *Park* às equações (3.16) e (4.3), obtém-se o modelo do inversor trifásico nas novas coordenadas:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega \\ -\omega & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_d \\ \gamma_q \end{bmatrix} [U] + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix}; \quad (4.7)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{dv_d}{dt} \\ \frac{dv_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{C} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ld} \\ i_{lq} \end{bmatrix}. \quad (4.8)$$

Onde  $\gamma_d$  e  $\gamma_q$  em (4.7) são dados por:

$$\gamma_d = \gamma_\alpha \cos \theta + \gamma_\beta \sin \theta; \quad (4.9)$$

$$\gamma_q = -\gamma_\alpha \sin \theta + \gamma_\beta \cos \theta. \quad (4.10)$$

A representação do modelo no sistema de coordenadas  $dq$  permite tornar o sistema invariante no tempo em regime permanente, tornando mais simples o projeto dos controladores de tensão.

#### 4.2.2 – Controlo das tensões AC através de um compensador linear PI

Dadas as equações da dinâmica das tensões  $ac$  (4.8), um compensador adequado para eliminar erros estáticos pode ser através da utilização de um compensador PI [23]. No caso do conversor trifásico funcionando como inversor, o controlador PI será responsável pelo controlo das tensões na carga. Para tal, é utilizado um sistema de dupla realimentação: uma malha interna para controlo da corrente e uma malha externa, mais lenta, para controlo da tensão. O controlador de tensão é responsável por fornecer as correntes de referência, que serão utilizadas na malha interna, mais rápida, para controlo da corrente. O controlo desta malha interna foi abordado na secção 3.5.

Desta forma, o controlo da tensão  $ac$  não é realizado de uma forma direta, mas sim indiretamente através das correntes. Esta técnica de controlo só é possível se a dinâmica das correntes for muito mais rápida que a dinâmica das tensões  $ac$ . Deste modo, as correntes  $ac$  conseguem seguir as correntes de referência dadas pelo controlador de tensão.

Se as correntes  $ac$  seguirem as correntes de referência, pode-se considerar que:

$$i_d \approx i_{d_{ref}}; \quad (4.11)$$

$$i_q \approx i_{q_{ref}}. \quad (4.12)$$

Observando a equação 4.8, aplicando a transformada de *Laplace* e considerando as aproximações em (4.11) e (4.12), pode-se retirar:

$$v_d = \frac{1}{s} \left( \omega v_q + \frac{i_{d_{ref}}}{C} - \frac{i_{ld}}{C} \right); \quad (4.13)$$

$$v_q = \frac{1}{s} \left( -\omega v_d + \frac{i_{q_{ref}}}{C} - \frac{i_{lq}}{C} \right). \quad (4.14)$$

Recorrendo a uma mudança de variável, é possível efetuar o desacoplamento das tensões  $v_d$  e  $v_q$ :

$$h_{d_{ref}=i_{d_{ref}}} + \omega C v_q; \quad (4.15)$$

$$h_{q_{ref}=i_{q_{ref}}} - \omega C v_d. \quad (4.16)$$

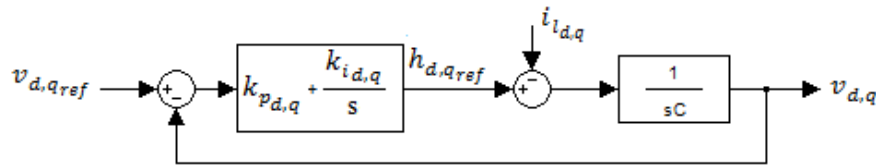
Tendo em consideração (4.15) e (4.16), pode-se reescrever as equações (4.13) e (4.14):

$$v_d = \frac{1}{sC} (h_{dref} - i_{ld}) ; \quad (4.17)$$

$$v_q = \frac{1}{sC} (h_{qref} - i_{lq}) . \quad (4.18)$$

Após o desacoplamento das tensões  $v_d$  e  $v_q$  é realizado o projeto do controlo da tensão, através da aplicação de um compensador linear. O controlo da tensão é efetuado em cadeia fechada, sendo que o compensador a dimensionar deverá ser capaz de manter a estabilidade do sistema.

Uma solução apropriada para garantir erros estáticos nulos, e evitar perturbações na tensão por causa das componentes  $i_{ld,q}$ , passa pela utilização de um compensador PI [22].



**Figura 4.2** – Diagrama de blocos do controlador de tensão *ac*.

As funções de transferência do sistema em cadeia fechada que caracterizam a tensão na carga são

$$v_{d,q} = \frac{1}{C} \frac{sk_{p_{d,q}} + k_{i_{d,q}}}{s^2 + s \frac{k_{p_{d,q}} + k_{i_{d,q}}}{C} + \frac{k_{i_{d,q}}}{C}} v_{d,qref} - \frac{1}{C} \frac{s}{s^2 + s \frac{k_{p_{d,q}} + k_{i_{d,q}}}{C} + \frac{k_{i_{d,q}}}{C}} i_{ld,q} . \quad (4.19)$$

Em regime estacionário, o segundo termo de (4.19) é nulo ( $s=0$ ), ou seja, é o equivalente a dizer que as perturbações da tensão na carga, devido às correntes na mesma, são nulas.

O denominador de (4.19) pode ser equiparado a um polinómio de um sistema de segunda ordem ( $s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2$ ). Desta forma, os ganhos proporcional e integral do compensador podem ser encontrados:

$$k_{p_{d,q}} = 2\xi\omega_n C ; \quad (4.20)$$

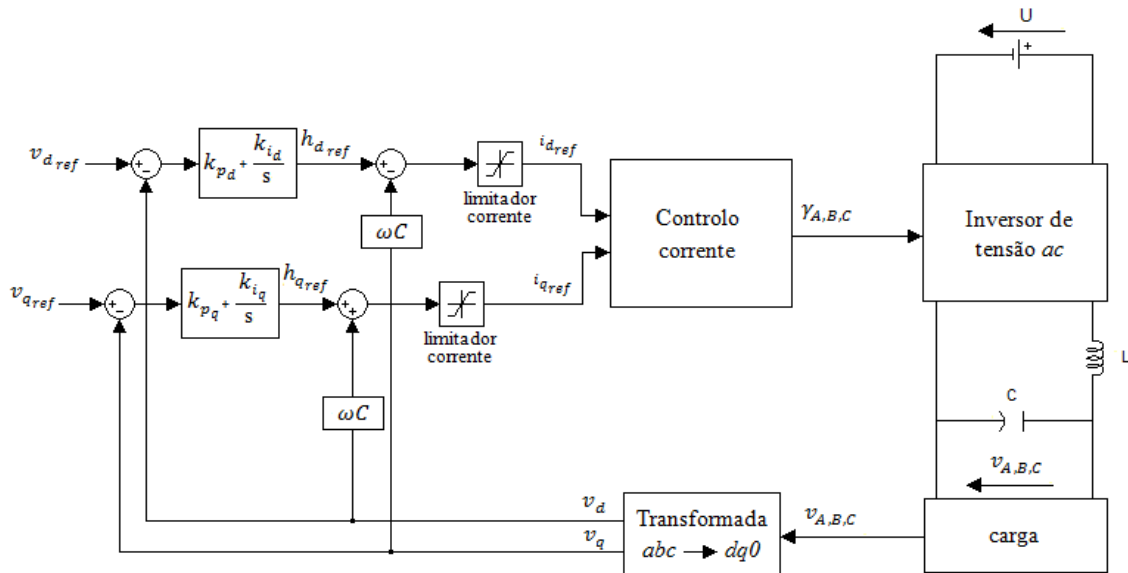
$$k_{i_{d,q}} = \omega_n^2 C . \quad (4.21)$$

De modo a ser obtida uma boa relação entre o tempo de subida e a sobrelevação da resposta ao escalão [22], define-se o valor do fator de amortecimento,  $\xi$ ,

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (4.22)$$

Para que os modelos sejam válidos, é necessário que a frequência natural do sistema ( $\omega_n = 2\pi f_n$ ) seja muito inferior à frequência de comutação dos semicondutores ( $\omega_s = 2\pi f_s$ ) de potência do conversor DC/AC.

Na **Figura 4.3** está representado o diagrama de blocos do controlador das tensões alternadas na carga, onde é utilizado um compensador do tipo PI para o efeito. Este controlo das tensões na carga é feito de uma forma indireta, pois o controlador de tensão produz as correntes de referência ( $i_{dref}$  e  $i_{qref}$ ), sendo o controlador de corrente responsável para que as correntes na carga sigam estas referências, por forma que sejam atingidas as tensões pretendidas na carga. Os limitadores de corrente presentes no diagrama de blocos cumprem o papel de proteção, não deixando que seja ultrapassada a corrente máxima suportada pelos dispositivos semicondutores que compõem o inversor de tensão.

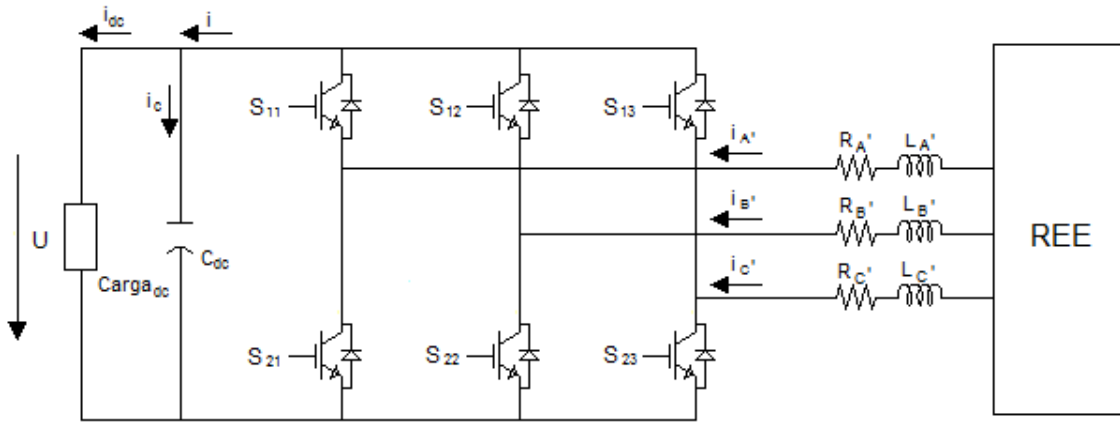


**Figura 4.3** – Diagrama de blocos do controlo das tensões ac com um compensador linear PI.

### 4.3 – Retificador de tensão DC

O esquema do conversor trifásico funcionando como retificador de tensão dc está representado na **Figura 4.4**. Entre a rede de energia elétrica e os braços do

retificador existem bobinas de acoplamento,  $L_k$ , por forma a suavizar as formas de onda da corrente extraída da REE.



**Figura 4.4** – Esquema do conversor trifásico funcionando como retificador de tensão  $dc$ .

#### 4.3.1 – Modelo da dinâmica do retificador

A equação da dinâmica da corrente do retificador é semelhante à do inversor de tensão, tendo sido apresentada em (4.7).

Através da observação da **Figura 4.4**, e da aplicação da lei dos nós, pode-se retirar que

$$i_c = i - i_{dc} \quad (4.23)$$

em que

$$i_c = C_{dc} \frac{dU}{dt}. \quad (4.24)$$

As correntes de cada fase  $i_k$ , com  $k \in \{A, B, C\}$ , e a função de comutação  $\gamma_k$  que define os estados dos semicondutores de potência podem ser relacionados com a corrente  $i$ . Assim, a equação (4.23) pode ser reescrita como [24]

$$\frac{dU}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} \gamma_A i_{A'} + \frac{1}{C_{dc}} \gamma_B i_{B'} + \frac{1}{C_{dc}} \gamma_C i_{C'} - \frac{1}{C_{dc}} i_{dc}. \quad (4.25)$$

Aplicando a transformada de *Clarke-Concordia* [22] e a transformada de *Park* [22] obtém-se (4.25) no sistema de coordenadas  $\alpha\beta 0$  e no sistema de coordenadas  $dq0$ , representadas pelas equações (4.26) e (4.27) respetivamente. Considerando que as correntes no sistema trifásico são equilibradas, a componente homopolar é nula e não é necessário representar na equação da dinâmica da tensão.

$$\frac{dU}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} \gamma_{\alpha} i_{\alpha'} + \frac{1}{C_{dc}} \gamma_{\beta} i_{\beta'} - \frac{1}{C_{dc}} i_{dc} \quad (4.26)$$

$$\frac{dU}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} \gamma_d i_{d'} + \frac{1}{C_{dc}} \gamma_q i_{q'} - \frac{1}{C_{dc}} i_{dc} \quad (4.27)$$

#### 4.3.2 – Controle da tensão DC através de um compensador linear do tipo PI

Do ponto de vista do controle, a topologia utilizada para controlar a tensão  $dc$  à saída do retificador ou a tensão  $ac$  à saída do inversor é semelhante. À semelhança do controlador de tensão do inversor, são utilizadas duas malhas de realimentação para realizar o controle da tensão  $dc$  do retificador, uma interna, mais rápida, para controle das correntes e outra externa, com uma dinâmica mais lenta, para controle da tensão.

Considerando um sistema trifásico equilibrado, as tensões  $v_{A'}$ ,  $v_{B'}$  e  $v_{C'}$  são:

$$v_{A'} = V \cos(\omega t); \quad (4.28)$$

$$v_{B'} = V \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right); \quad (4.29)$$

$$v_{C'} = V \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right). \quad (4.30)$$

Em que  $V$  é o valor da amplitude,  $\omega$  é o valor da frequência angular ( $2\pi f \text{ rad/s}$ ) e  $f$  é a frequência (50 Hz sinusoidal).

No sistema de coordenadas  $dq0$ , as componentes direta ( $v_{d'}$ ) e em quadratura ( $v_{q'}$ ) da tensão do sistema trifásico de tensões (4.28), (4.29) e (4.30) são [24]:

$$v_{d'} = \sqrt{\frac{3}{2}} V; \quad (4.31)$$

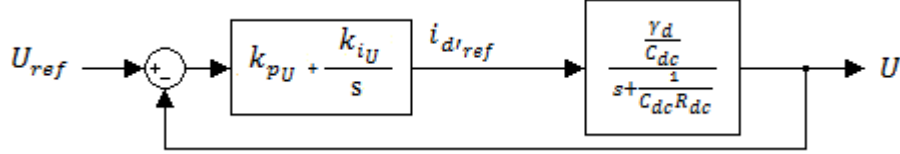
$$v_{q'} = 0. \quad (4.32)$$

Em (4.32) a componente da tensão em quadratura é nula e, obrigatoriamente por associação, a componente da corrente em quadratura também é nula neste sistema de coordenadas, considerando que o retificador tem fator de potência quase unitário, para um sistema trifásico equilibrado.

Considerando a carga  $dc$  da **Figura 4.4** como sendo resistiva ( $R_{dc}$ ) e que em (4.27) as correntes  $i_{d'}$  e  $i_{q'}$  seguem as suas referências ( $i_{d'} \approx i_{d' \text{ ref}}$  e  $i_{q'} \approx i_{q' \text{ ref}} = 0$ ), aplicou-se a transformada de *Laplace* à equação da dinâmica da tensão do retificador (4.27), obtendo-se a função de transferência, em malha aberta, do retificador de tensão

$$U = \frac{\frac{\gamma_d}{C_{dc}}}{s + \frac{1}{C_{dc}R_{dc}}} i_{d'_{ref}}. \quad (4.33)$$

A aplicação de um compensador do tipo Proporcional Integral pode ser utilizada para regular o valor da tensão  $dc$  [23]. Os valores do ganho proporcional ( $k_{pU}$ ) e do ganho integral ( $k_{iU}$ ) podem ser obtidos através da função de transferência do sistema em malha fechada (**Figura 4.5**).



**Figura 4.5** – Diagrama de blocos do controlador de tensão  $dc$ .

A função de transferência do sistema é

$$\frac{U}{U_{ref}} = \frac{\frac{1}{C_{dc}}(sk_{pU} + k_{iU})\gamma_d}{s^2 + s\left(\frac{1}{C_{dc}R_{dc}} + \frac{k_{pU}\gamma_d}{C_{dc}}\right) + \frac{k_{iU}\gamma_d}{C_{dc}}}. \quad (4.34)$$

O denominador da função de transferência (4.34) pode ser comparado a um polinómio de um sistema de segunda ordem. Assim, os ganhos  $k_{pU}$  e  $k_{iU}$  do compensador podem ser definidos através do fator de amortecimento ( $\xi$ ) e da frequência natural ( $\omega_n$ ) do sistema de segunda ordem:

$$k_{pU} = \frac{2\xi\omega_n C_{dc}R_{dc} - 1}{R_{dc}\gamma_d}; \quad (4.35)$$

$$k_{iU} = \frac{\omega_n^2 C_{dc}}{\gamma_d}. \quad (4.36)$$

Na equação da dinâmica da corrente (4.7) do retificador (idêntica à do inversor de tensão) em regime permanente pode-se considerar que  $\frac{di_d}{dt} \approx 0$ . Para além disto, se for desprezada a resistência de perdas das bobinas ( $R \approx 0$ ), que o valor da corrente em quadratura é nulo ( $i_q \approx 0$ ) e que a tensão segue o valor da sua referência ( $U \approx U_{ref}$ ), pode-se retirar que

$$\frac{\gamma_d}{L} U_{ref} = \frac{v_d}{L}. \quad (4.37)$$



Substituindo (4.31) na equação anterior, fica-se

$$\gamma_d = \frac{\sqrt{\frac{3}{2}}V}{U_{ref}}. \quad (4.38)$$

Com base em (4.38), as equações (4.35) e (4.36) ficam:

$$k_{pU} = \frac{2\sqrt{2}U_{ref}\xi\omega_n C_{dc}R_{dc} - \sqrt{2}U_{ref}}{\sqrt{3}VR_{dc}}; \quad (4.39)$$

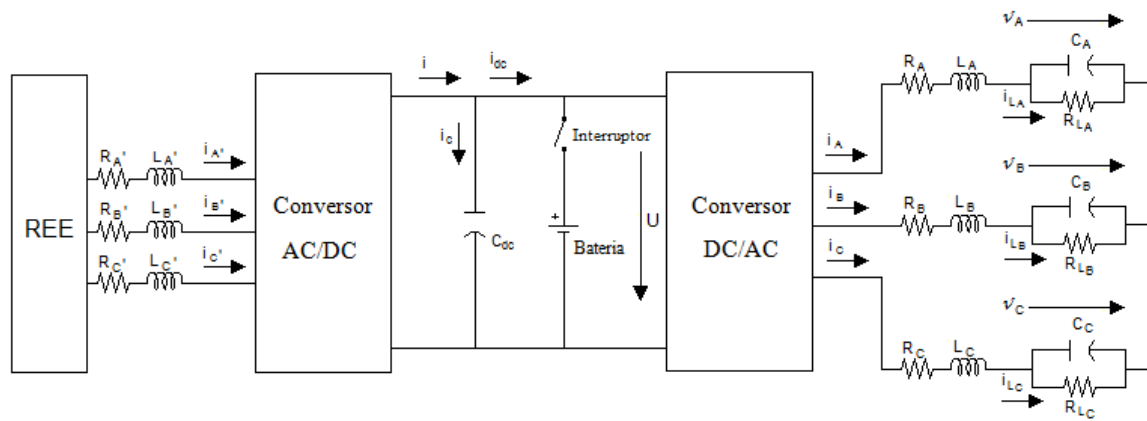
$$k_{iU} = \frac{\sqrt{2}U_{ref}\omega_n^2 C_{dc}}{\sqrt{3}V}. \quad (4.40)$$

As equações (4.39) e (4.40) definem os parâmetros do compensador de tensão do retificador. Estes ganhos dependem do fator de amortecimento e da frequência natural, que deverá ser muito menor que o valor da frequência da rede *ac* ( $2\pi 50$  rad/s).

#### 4.4 – Conversor AC/AC

O conversor AC/AC representado na **Figura 4.6**, combina o inversor de tensão *ac* estudado na secção 4.2, com o retificador de tensão *dc* visto na secção 4.3. Para além desta combinação, é necessário proceder ao dimensionamento dos componentes (banco de baterias e banco de condensadores) no *link dc*, de forma que o sistema possa fornecer energia à carga em caso de falha da REE.

A inovação presente no sistema proposto prende-se com o facto da utilização de um banco de condensadores, que substitui a ação do banco de baterias para o caso de falha na rede, durante o tempo correspondente a alguns ciclos da rede. Na ocorrência de falhas com durações maiores de tempo, e uma vez esgotada a capacidade do banco de condensadores, o banco de baterias entra em funcionamento garantindo as necessidades de consumo da carga. Com isto, é pretendido a criação de um sistema de alimentação ininterrupta que minimize o número de ocorrências em que o banco de baterias entra em funcionamento, maximizando assim a vida útil das baterias e poupando custos com a sua manutenção.



**Figura 4.6** – Esquema do conversor AC/AC.

#### 4.4.1 - Dimensionamento da bobina de entrada

A utilização de uma bobina, entre a REE e o conversor AC/DC, permite suavizar as formas de onda das correntes da rede de energia elétrica. No entanto, existirá sempre associado à corrente um certo *ripple*, que poderá ser maior ou menor consoante o coeficiente de auto-indução da bobina seleccionada e da frequência de comutação dos semicondutores de comutação forçada.

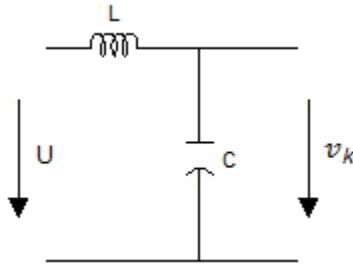
Se for considerado que o período de amostragem é pequeno, o valor da corrente é praticamente constante, podendo ser visto como um conversor CC-CC do tipo elevador, em que o valor médio da tensão de saída é superior à da entrada. Nesta situação, o coeficiente de auto-indução da bobina é dado por [25]

$$L_{kf} = \frac{U}{4\Delta i f_s} \quad (4.41)$$

onde  $U$  é a tensão *dc* (**Figura 4.6**),  $\Delta i$  corresponde ao valor máximo de tremor da corrente e  $f_s$  é a frequência de comutação dos interruptores de potência.

#### 4.4.2 - Dimensionamento do filtro de saída

A forma de onda da tensão à saída do conversor AC/AC deve ser sinusoidal. De modo a filtrar as harmónicas mais elevadas de tensão é utilizado um filtro passa-baixo *LC*.



**Figura 4.7** – Filtro passa-baixo  $LC$ .

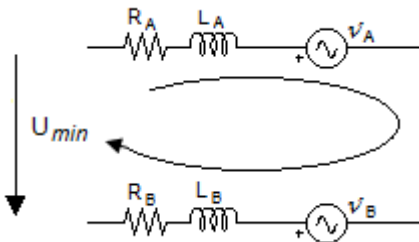
A frequência de corte deste filtro é dada por

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (4.42)$$

O valor da frequência de corte selecionado deve ser, por um lado, muito superior à frequência da tensão  $ac$  e, por outro lado, muito inferior à frequência de comutação dos interruptores eletrônicos de potência.

#### 4.4.3 - Tensão mínima no *link DC*

De forma que o inversor funcione corretamente, garantindo a tensão correta na carga, é necessária uma tensão mínima ( $U_{min}$ ) no *link dc*. Na **Figura 4.8** é tido como exemplo a malha formada entre as fases  $a$  e  $b$  na carga, de forma a definir o valor de  $U_{min}$ .



**Figura 4.8** – Malha para definição do valor mínimo de tensão no *link dc*.

Assim,  $U_{min}$  é definido por

$$U_{min} = i_A \omega L_A + R_A i_A + \sqrt{2}\sqrt{3}v_{ef} + R_B i_B + i_B \omega L_B \quad (4.43)$$

onde  $v_{ef} = v_A = v_B$  e o termo  $\sqrt{2}\sqrt{3}v_{ef}$  corresponde ao valor de pico da tensão composta.

Na prática, é costume dar uma margem de segurança para garantir o bom funcionamento do sistema, normalmente 20% do valor da tensão mínima do *link dc*, para que a tensão  $dc$  consiga fazer crescer a corrente. Desta maneira, o dimensionamento da tensão no *link dc* é dado por

$$U \geq 1,2U_{min}. \quad (4.44)$$

#### 4.4.4 - Dimensionamento do banco de baterias

O banco de baterias é responsável pelo armazenamento da energia, de modo que em caso de falha da rede elétrica terá de ser capaz de suportar a carga máxima pelo tempo especificado, daí a importância do correto dimensionamento da sua capacidade.

Considerando que o sistema é projetado para fornecer à carga uma determinada potência (em VA), a potência de saída do sistema (em watts) é dada por

$$P_{saída}(W) = P_{carga}(VA) \times \text{Fator de Potência}. \quad (4.45)$$

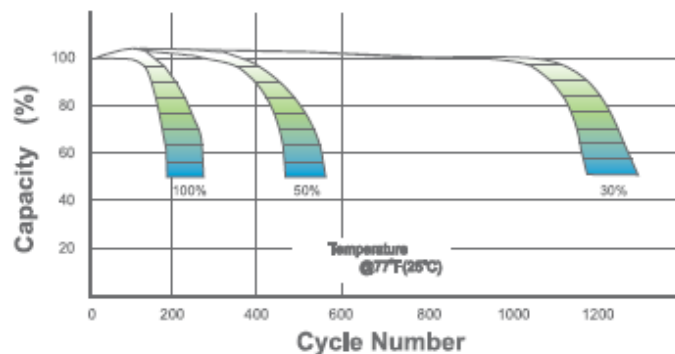
A carga nominal ligada ao banco de baterias é

$$P_{banco\_baterias} = \frac{P_{saída}}{\text{Eficiência do inversor}}. \quad (4.46)$$

Uma vez que a capacidade das baterias diminui com o tempo, é normal incluir no dimensionamento uma margem devido ao fator de envelhecimento das mesmas, pelo que é dada uma margem de 25%. Por outro lado, o desempenho das baterias também decai com a diminuição da temperatura, sendo portanto considerado um  $Fator_T$ ,

$$P_{banco\_baterias} = 1,25 \times Fator_T \times \frac{P_{saída}}{\text{Eficiência do inversor}}. \quad (4.47)$$

Para que a vida útil da bateria seja prolongada, é limitada a profundidade dos ciclos de descarga a um valor de percentagem máximo. Na **Figura 4.9** é possível observar que a capacidade da bateria passa para metade após cerca de 1200 ciclos de descarga, com profundidade de 30%. No entanto, se a profundidade de descarga for de 100%, a capacidade de armazenamento da bateria decai para 50% em cerca de 200 ciclos de utilização.



**Figura 4.9** – Relação entre a diminuição da capacidade da bateria com o número de ciclos para diferentes profundidades de descarga [26].

Tendo em consideração a limitação da profundidade de descarga, de (4.47) tem-se

$$P_{\text{banco\_baterias}} = \frac{1,25 \times \text{Fator}_T \times \frac{P_{\text{saída}}}{\text{Eficiência do inversor}}}{\text{Porcentagem de descarga}}. \quad (4.48)$$

Considerando (4.48) e assumindo a tensão nominal das baterias utilizadas no banco, tem-se o número de baterias que constituem o banco de baterias

$$N_{\text{baterias}} = \frac{U}{V_{\text{bateria\_nom}}}. \quad (4.49)$$

Para carregar as baterias a 100% é necessário considerar no *link dc* uma tensão máxima ( $U_{\text{max}}$ ),

$$U_{\text{max}} = N_{\text{baterias}} \times V_{\text{bateria\_flut}}, \quad (4.50)$$

onde  $V_{\text{bateria\_flut}}$  é a tensão de flutuação recomendada pelo fabricante para uma bateria.

A tensão de descarga de cada bateria é obtida por

$$V_{\text{bateria\_desc}} = \frac{U_{\text{min}}}{N_{\text{baterias}}}. \quad (4.51)$$

O valor de tensão de descarga das células obtido tem de ser superior à tensão de descarga mínima anunciada pelo fabricante. Se não existir no mercado baterias com uma tensão de descarga inferior, a alternativa passa por aumentar o número de baterias utilizadas no banco implicando a subida de  $U_{\text{max}}$ .

A potência que cada bateria tem que armazenar é

$$P_{\text{bateria}} = \frac{P_{\text{banco\_baterias}}}{N_{\text{baterias}}}. \quad (4.52)$$

A energia correspondente armazenada na bateria é dada por

$$E_{\text{bateria}} = P_{\text{bateria}} \times t \quad (4.53)$$

em que  $t$  é o tempo assegurado pela UPS de fornecimento de energia à carga.

A capacidade nominal de cada bateria é obtida por

$$C_{bateria\_nom} = \frac{E_{bateria}}{V_{bateria\_nom}}. \quad (4.54)$$

#### 4.4.5 - Dimensionamento do banco de condensadores

O banco de condensadores  $C_{dc}$  (**Figura 4.6**) garante o fornecimento normal de energia à carga, em caso de falhas de curta duração na REE, durante poucos ciclos da rede.

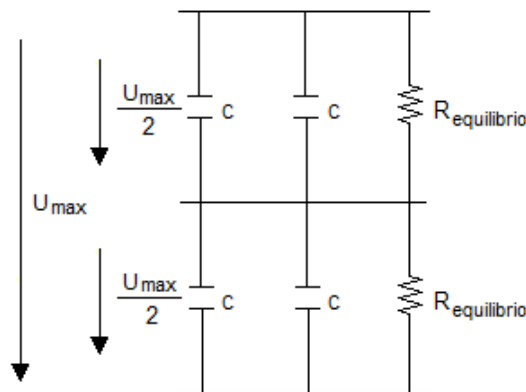
O dimensionamento da capacidade (4.55) do banco de condensadores é realizado em função da tensão no *link dc* ( $\Delta U = U_{max} - U_{min}$ ) e em função do período de tempo ( $\Delta T$ ) de transferência de energia para a carga, para um valor máximo de potência estabelecido.

$$C_{dc} = \frac{\Delta T}{\Delta U} i_{dc} \quad (4.55)$$

Se os condensadores do banco de condensadores forem colocados em série é possível trabalhar com valores de tensão mais elevados, contudo a capacidade decresce com o aumento do número de condensadores utilizados em série. De modo a evitar desequilíbrios de tensão nos condensadores, é comum a ligação de uma resistência em paralelo.

De forma a aumentar a capacidade podem ser colocados condensadores em paralelo, sendo a capacidade total do banco de condensadores obtida pela soma das capacidades individuais dos condensadores.

Na **Figura 4.10** é apresentada uma combinação paralelo-série, onde é combinada a possibilidade do banco de condensadores suportar tensões *dc* mais elevadas, com a maior capacidade de armazenamento de energia.



**Figura 4.10** – Combinação paralelo-série de um banco de condensadores.

#### 4.4.6 - Exemplo prático de dimensionamento dos conversores de uma UPS

Será realizado, a título de exemplo, o dimensionamento dos componentes que formam o conversor AC/AC.

##### 1. Potência da UPS

A potência no lado alternado é dada por

$$P_{ac} = 3v_{ef}i_{ef}. \quad (4.56)$$

Supondo que a potência máxima que a carga pode exigir é 20,7 kVA e que o valor eficaz da tensão são 230V, a corrente nominal ( $i_{ef} = i_{a,b,c}$ ) em cada fase tem o valor de 30 A.

##### 2. Tensão mínima no *link dc*

Considerando as correntes nas fases *a* e *b* iguais a 30 A, as bobinas com valores de indutância iguais ( $L_{A,B} = 15 \text{ mH}$ ) e com resistência de perdas  $R_{A,B} = 0.01 \Omega$ , a tensão eficaz de 230 V e a frequência  $\omega = 2\pi f_{ac}$ , com  $f_{ac} = 50 \text{ Hz}$ , obtém-se o valor da tensão mínima no *link dc* (4.43),

$$U_{min} = 2 \times 30 \times 2\pi \times 50 \times 15e^{-3} + 2 \times 0,01 \times 30 + \sqrt{6} \times 230 \Leftrightarrow U_{min} = 846,7 \text{ V}.$$

Dando uma margem de 20%, tem-se que a tensão no *link dc* é

$$U = 1,2 \times 846,7 \Leftrightarrow U = 1016 \text{ V}.$$

##### 3. Dimensionamento bobina de entrada

Admitindo uma frequência de comutação de 20 kHz, o tremor da corrente de 1 A e a tensão *dc* mínima ( $U_{min}$ ) como 850 V, é obtida o valor do coeficiente de auto-indução da bobina (4.41),

$$L_{k'} = \frac{850}{4 \times 1 \times 20000} \Leftrightarrow L_{k'} = 10,6 \text{ mH}.$$

##### 4. Dimensionamento do filtro de saída

Escolhendo  $L=15\text{mH}$  e  $C=10\mu\text{F}$  obtém-se a frequência de corte do filtro passa-baixo,

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{15e^{-3} \times 10e^{-6}}} \Leftrightarrow f_c = 410,9 \text{ Hz}.$$

## 5. Dimensionamento do banco de baterias

Para o valor de potência da carga escolhido, e considerando que o controlador de corrente força as correntes a seguirem as suas referências, em fase com a tensão *ac* (fator de potência aproximadamente unitário), então

$$P_{saída} = 20700 \times 1 \Leftrightarrow P_{saída} = 20,7 \text{ kW}.$$

Para efeitos de simplificação, se for considerado que o inversor tem uma eficiência próxima de 100%, que a temperatura ambiente não desce de 25°C ( $Fator_T = 1$ ) e que a percentagem da profundidade do ciclo de descarga é no máximo de 30%, a carga nominal ligada ao banco de baterias (4.48) é

$$P_{banco\_baterias} = \frac{1,25 \times 1 \times \frac{20700}{1}}{0,3} \Leftrightarrow P_{banco\_baterias} = 86,25 \text{ kW}.$$

Considerando que o banco de baterias é formado por baterias com tensão nominal de 12V, o número de baterias é

$$N_{baterias} = \frac{1016}{12} \Leftrightarrow N_{baterias} = 84,7 \text{ baterias}.$$

Arredondando o número de baterias para 85, o valor da tensão nominal (*U*) do *link dc* é de 1020V.

Supondo que a tensão de flutuação para carregar cada bateria no modo de tensão são 13V. A tensão máxima no *link dc* é

$$U_{max} = 85 \times 13 \Leftrightarrow U_{max} = 1105V.$$



A tensão de descarga de cada bateria é

$$V_{bateria\_desc} = \frac{846,7}{85} \Leftrightarrow V_{bateria\_desc} = 9,96 \text{ V}.$$

A potência mínima que cada bateria tem que armazenar é

$$P_{bateria} = \frac{86250}{85} \Leftrightarrow P_{bateria} = 1014,7 \text{ W}.$$

Para um tempo de *backup* de energia de 15 minutos, tem-se

$$E_{bateria} = 253,7 \text{ Wh},$$

ou em ampere-hora

$$E_{bateria} = 21,14 \text{ Ah}.$$

## 6. Dimensionamento do banco de condensadores

Através da relação da potência na carga e da tensão nominal no *link dc*, é possível chegar ao valor da corrente correspondente no lado contínuo,

$$i_{dc} = \frac{P_{ac}}{U} \Leftrightarrow i_{dc} = \frac{20700}{1016} \Leftrightarrow i_{dc} = 20,4 \text{ A}.$$

Supondo que o condensador armazena energia suficiente para fornecer à carga durante meio ciclo da rede elétrica (10 ms), a capacidade do condensador terá de ser

$$C_{dc} = \frac{10e^{-3}}{1105 - 846,7} \times 20,4 \Leftrightarrow C_{dc} = 0,79 \text{ mF}.$$

Se for pretendido aumentar o tempo para um ciclo da rede elétrica (20 ms), a capacidade necessária aumenta para 1,58 mF.

Tendo em conta  $U_{max} = 1105\text{V}$  e considerando uma margem de 20%, a tensão do condensador a escolher é de 1326V. Sem grande detrimento na margem de segurança, podem ser utilizados dois condensadores de 630V em série, contudo a capacidade de cada deverá ser o dobro de forma a manter a capacidade no global.

Na **Tabela 4.1** está representada a capacidade total do banco de condensadores necessária, para diferentes tempos de fornecimento de energia à carga por parte dos

condensadores. Só em termos de comparação, um banco de condensadores formado por 10 grupos (em paralelo) de 2 condensadores de 3300 $\mu$ F em série, tem uma capacidade total de 16,5mF. Tendo por base o condensador da Nichicon<sup>1</sup>, de 630V e capacidade de 3300 $\mu$ F, com preço unitário de 166,58€, o custo total do banco de condensadores seria de 3331,6€ e cobriria as necessidades de energia, considerando a carga máxima, para 208,9 ms.

**Tabela 4.1** – Relação entre a capacidade do banco de condensadores e o tempo de fornecimento de energia.

<b>Tempo (ms)</b>	<b>Capacidade (mF)</b>
10	0,79
20	1,58
100	7,9
200	15,8
500	39,5

O Relatório da Qualidade de Serviço fornecido pela Empresa de Eletricidade da Madeira referente ao ano de 2011 [27], expõe que quanto às cavas de tensão em baixa tensão:

- 19% das cavas apresentaram uma duração inferior a 100 milissegundos e um afundamento inferior a 30%;
- 60% das cavas apresentaram uma duração entre 100 e 500 milissegundos e um afundamento inferior a 60%.

A partir destes dados é possível verificar que pelo menos 79% das cavas ocorridas têm uma duração inferior a 500 milissegundos. Numa situação semelhante, a utilização de um banco de condensadores podia evitar que o banco de baterias entrasse em funcionamento grande parte das vezes. Se a capacidade do banco de condensadores for maior pode cobrir uma maior percentagem das falhas da rede, evitando a utilização do banco de baterias por mais vezes e aumentando a vida útil das baterias. Contudo, esta opção estará sempre limitada ao valor do investimento que pode ser realizado na implementação prática do sistema.

<sup>1</sup> Disponível para consulta em:  
<http://pt.mouser.com/ProductDetail/Nichicon/LNX2J332MSEJ/?qs=sGAEpiMZZMtZ1n0r9vR22bfPntvkG064YR1x9xOKLbk%3d>.

## 4.5 - Conclusões

Neste capítulo viu-se que o compensador linear de tensão, utiliza o valor de uma tensão de referência para controlar a tensão à saída do conversor (AC/DC ou DC/AC). Para tal, o compensador gera o valor da corrente de referência que será utilizado no controlo da malha interna da corrente, pelo que o controlo da tensão à saída do conversor é realizado de forma indireta através da corrente.

O conversor AC/AC, combina o conversor DC/AC e o conversor AC/DC, bem como o sistema de armazenamento de energia, representando assim grande parte da UPS. O banco de baterias é o sistema de armazenamento de energia responsável para suprimir as necessidades da carga, em caso da ocorrência de falhas na rede de energia elétrica. Assim, o seu dimensionamento é importante para garantir o fornecimento de energia à carga pelo tempo pré-estabelecido. No entanto, é necessário garantir que a tensão das baterias não desce da tensão mínima de descarga, de modo a evitar que se danifiquem ou que reduza o número de ciclos da bateria. Também é aconselhável que a profundidade de descarga das baterias não seja muito elevado, de maneira a prolongar a vida útil das mesmas.

Aliado ao banco de baterias é proposto um banco de condensadores que em caso do surgimento de falhas na REE, com curta duração, fornece a energia necessária a carga. Deste feito, é expectável que a maioria das falhas não implique a entrada em funcionamento do banco de baterias, pelo que deverá traduzir-se num aumento da vida útil das mesmas. Atualmente um banco de condensadores está limitado ao custo da sua implementação, porém os condensadores têm a vantagem de possuir um elevado número de ciclos de carga/descarga que em associação à menor utilização do banco de baterias em caso de falhas, e da possível poupança de custos com a manutenção das baterias poderá traduzir-se num investimento aconselhável.



# Capítulo 5

## AUTOMATISMOS DE COMANDO DA UPS

Neste capítulo é definido o comportamento da UPS face aos cenários possíveis de ocorrerem, de forma que esta realize de forma automática as ações determinadas. Para tal, foram previstos os vários cenários (estados) da UPS através da definição de condições, bem como os respetivos comandos para cada um. Foram ainda implementados os modos de carregamento em corrente e em tensão das baterias.

## 5.1 – Introdução

No capítulo anterior foi mostrada a constituição do conversor AC/AC, bem como foi realizado o dimensionamento do sistema de armazenamento de energia. Este sistema consiste num banco de condensadores, que prevê a ocorrência de falhas de pequena duração na REE, sendo que para interrupções com durações mais longas o banco de baterias fornece energia à carga. Assim, é necessário implementar o controlo do sistema para que este realize de uma forma automática as operações pretendidas.

Nos automatismos devem estar previstos o comportamento da UPS face às situações possíveis, pelo que devem ser definidos os vários estados, onde são incluídas as condições e as ordens de comando para cada um deles. Nos estados que envolvam o carregamento do banco de baterias, é também preciso definir perante as condições o modo como o carregamento é efetuado, se em corrente ou em tensão.

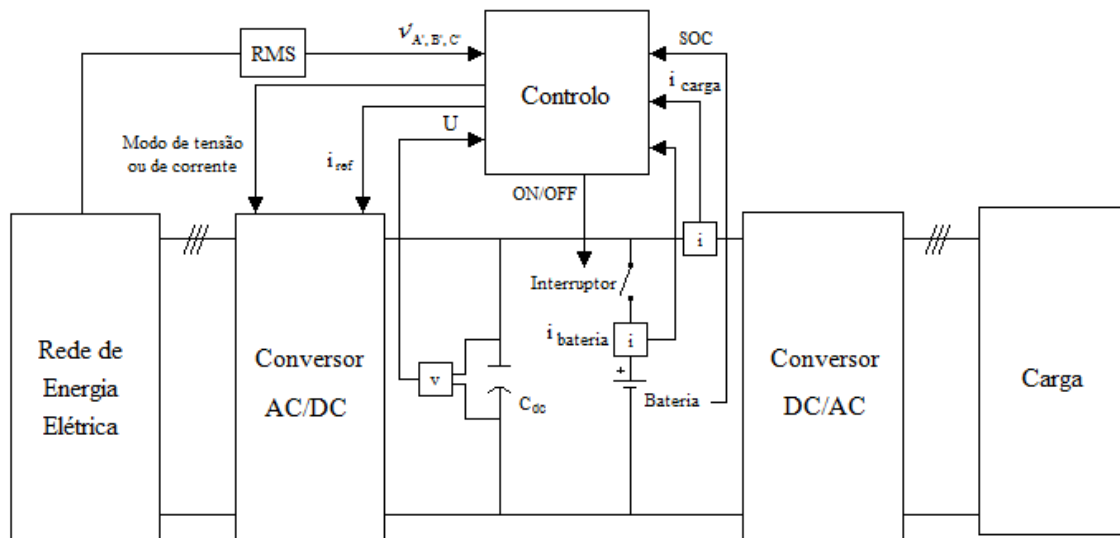
## 5.2 – Controlo

Na realização do controlo do sistema da UPS é necessário o conhecimento do estado dos parâmetros afetos a este. Na **Figura 5.1** são mostrados os parâmetros utilizados para a implementação dos automatismos:

- **Estado da REE:** o conhecimento da ocorrência de uma interrupção, no serviço de fornecimento de energia elétrica, é realizado através da leitura do valor eficaz da tensão da rede. Numa situação normal o valor eficaz da tensão em cada fase é próximo de 230V;
- **Tensão no *link dc*:** a informação da tensão no *link dc* é útil para acionar a entrada em funcionamento do banco de baterias;
- **Carga:** de maneira a ser verificada a existência de uma carga ligada e qual a potência associada a esta, é lido o valor da corrente ( $i_{carga}$ ) por um sensor;
- **Bateria:** é importante que o controlador do sistema saiba se a bateria está ou não carregada e qual a sua percentagem. No ambiente de simulação MATLAB/SIMULINK, o bloco representante da bateria fornece esta indicação através do SOC (*state of charge*). Também é relevante, para efeitos de controlo, o conhecimento do valor da corrente para a bateria.

Através do conhecimento dos parâmetros que influenciam o sistema, podem ser dadas as ordens de comando:

- **Modo tensão/corrente:** dependendo da percentagem a que a bateria está carregada, é efetuado o carregamento em corrente através de um valor de corrente constante, ou é realizado o carregamento em tensão;
- **Corrente de referência ( $i_{ref}$ ):** no modo de carregamento em corrente, o controlador do sistema fornece as correntes de referência a serem utilizadas pelo controlador de corrente do conversor AC/DC;
- **Interruptor:** é dado um sinal ON/OFF a um interruptor quando é necessário que o banco de baterias entre em funcionamento ou esteja fora de serviço.



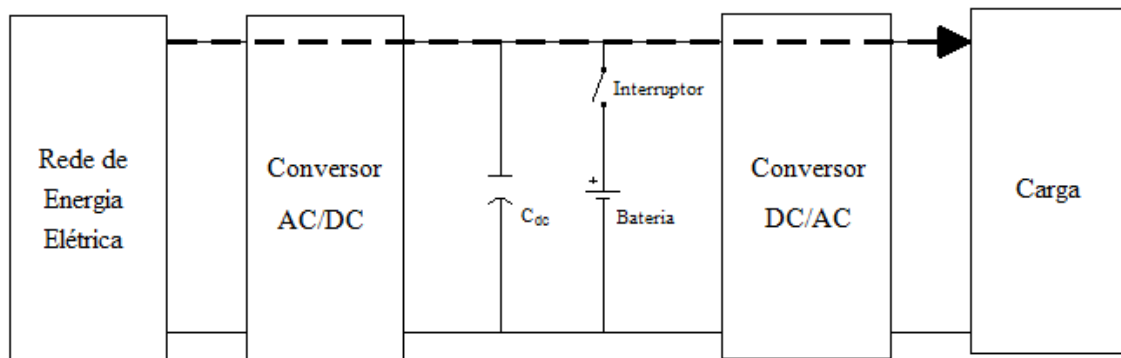
**Figura 5.1** – Variáveis utilizadas na implementação dos automatismos.

### 5.3 – Estados

A definição dos estados é efetuada perante a previsão dos vários cenários possíveis que o sistema da UPS poderá enfrentar. Para cada conjunto de condições que define um estado existem as ordens de comando associadas que também têm de ser delineadas. Os estados considerados para o sistema da UPS são descritos em seguida.

#### ▪ Estado 1

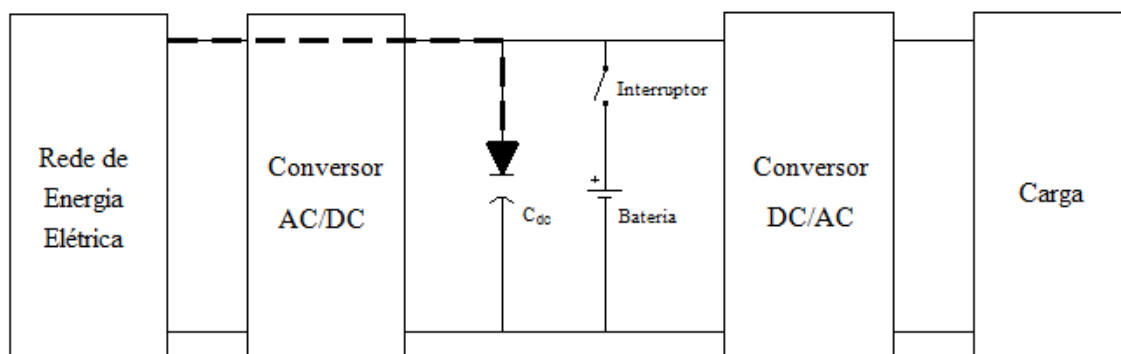
Neste estado é considerado que não existem falhas na rede elétrica, que existe uma carga ligada e as baterias encontram-se totalmente carregadas. Para este caso, o interruptor encontra-se em aberto e é mantida uma tensão constante no *link dc*. Na **Figura 5.2** é mostrado o sentido de transferência de potência, que é da REE para o *dc link* e deste para a carga.



**Figura 5.2** – Diagrama de blocos referente ao estado 1.

- Estado 2

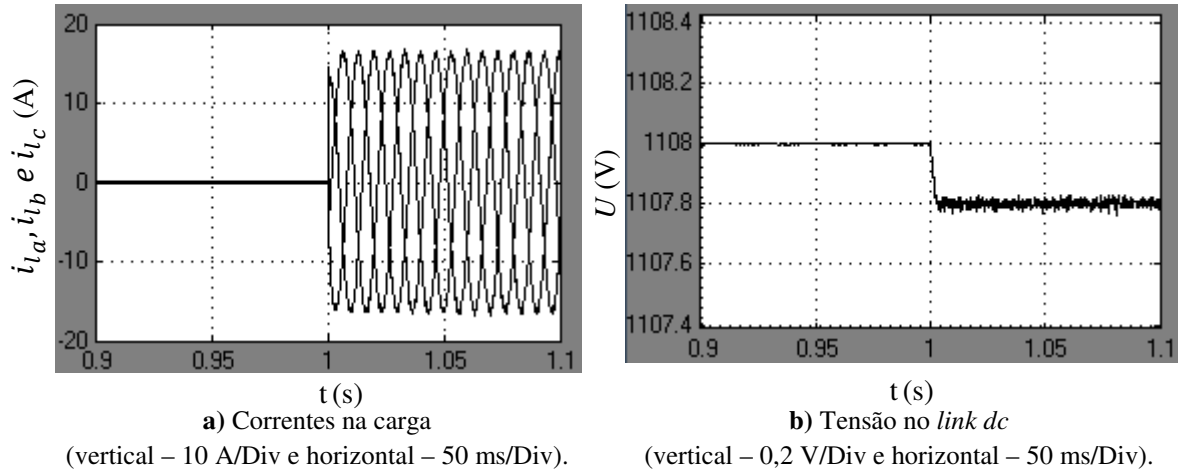
Neste estado, em relação ao anterior, é considerado que não existe uma carga a alimentar pelo sistema. Nesse sentido, é mantido um valor de tensão constante no *link dc* (**Figura 5.3**).



**Figura 5.3** – Diagrama de blocos referente ao estado 2.

Na **Figura 5.4 a)** está representada a ligação de uma carga no instante de tempo de 1 s, quando antes não existia nenhuma carga ligada. Verifica-se na **Figura 5.4 b)** que a transição entre a ausência e ligação de uma carga afeta pouco a tensão no *link dc*, tendo a tensão decaído 0,2 V.





**Figura 5.4** – Transição entre o estado 2 e o estado 1.

▪ Estado 3

Se não existirem falhas na rede com uma carga ligada, sendo que a bateria encontra-se num estado descarregado, existe a necessidade de fornecer energia à carga como também carregar a bateria. Na **Figura 5.5** está a representação do fluxo de energia nas condições indicadas, sendo que o interruptor está fechado de modo a carregar as baterias.

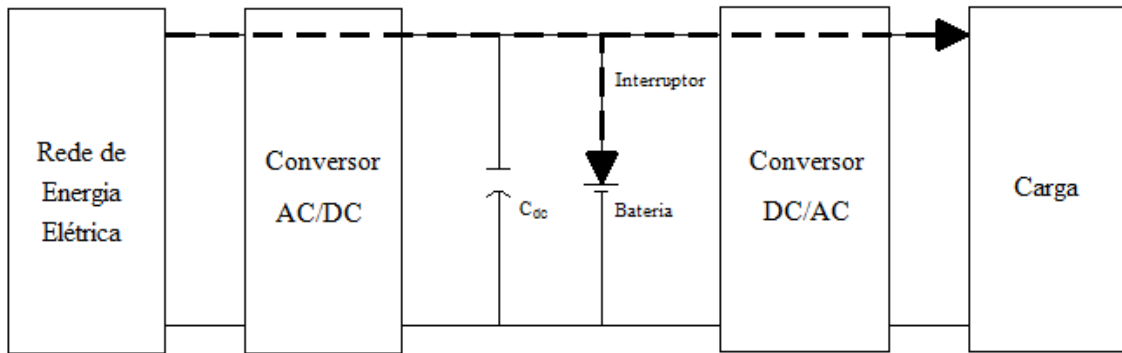
Supondo que não existem perdas de energia, a potência fornecida pela rede é a potência recebida no *link dc*.

$$P_{rede} = P_{link_{dc}}. \quad (5.1)$$

A equação (5.1) é equivalente a

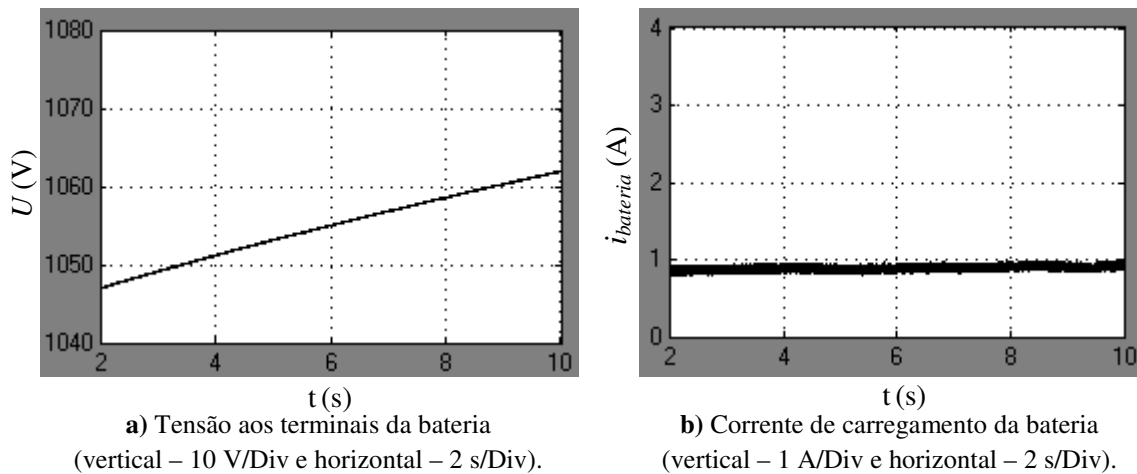
$$3v_{ef}i_{ref} = U(i_{carga} + 0,1Capacidade_{bat}). \quad (5.2)$$

Esta equação (5.2) é utilizada para calcular o valor da corrente de referência ( $i_{ref}$ ) dinamicamente para valores de potência de carga variáveis, ou na situação do carregamento da bateria em que a tensão vai aumentando, mantendo sempre um valor constante da corrente de carregamento da bateria. Para realizar o carregamento da bateria, considera-se como valor típico de corrente, 10% do valor da sua capacidade.



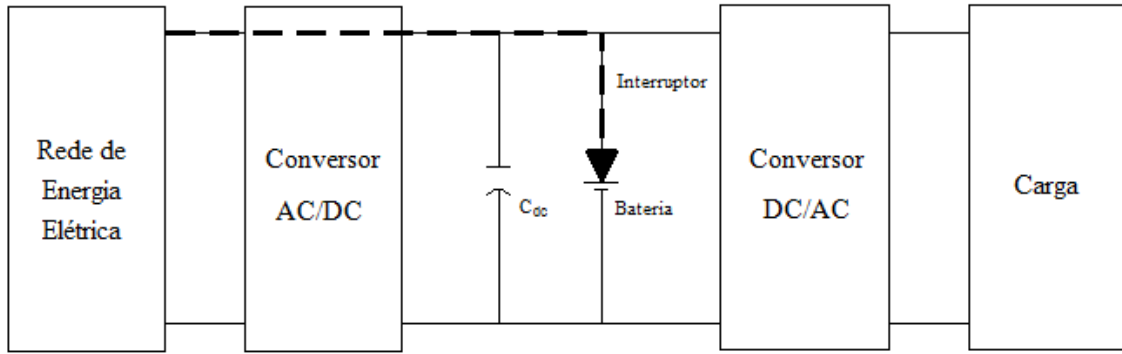
**Figura 5.5** – Diagrama de blocos referente ao estado 3.

Na **Figura 5.6 a)** está representada o aumento da tensão aos terminais da bateria, através do carregamento no modo de corrente, com um valor para a corrente aproximadamente constante (1 A) - **Figura 5.6 b)**.



**Figura 5.6** – Carregamento da bateria no modo de corrente.

Os estados 4 e 5 foram definidos para quando é necessário carregar as baterias. A diferença entre ambos reside na percentagem de energia armazenada na bateria, sendo que se a percentagem estiver entre os 70% e os 95% é realizado o carregamento da bateria em modo de corrente, se a percentagem for superior a 95% o carregamento é feito em tensão.



**Figura 5.7** – Diagrama de blocos referente ao estado 4 e 5.

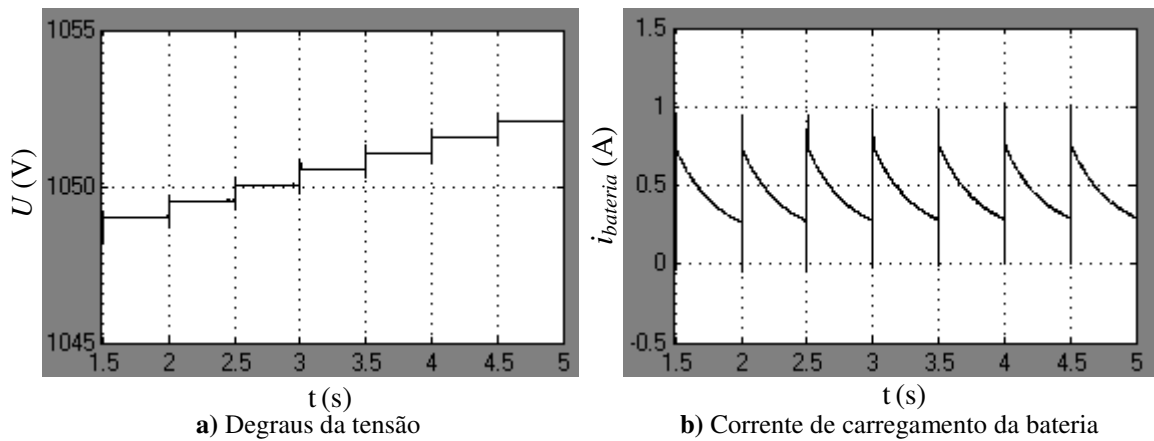
- Estado 4

No modo de carregamento da bateria em corrente é necessário que seja conhecida a corrente de referência, para carregar a bateria com uma corrente constante. A equação para o cálculo da corrente de referência é semelhante a (5.2), não sendo no entanto considerada a corrente consumida pela carga.

$$i_{ref} = \frac{U \times 0,1 \text{Capacidade}_{bat}}{3v_{ef}}. \quad (5.3)$$

- Estado 5

No estado 5 é dado o comando para ser efetuado o carregamento em tensão da bateria. Uma vez que a diferença de tensão correspondente entre a diferença de percentagem do estado parcial e total de carregamento da bateria ainda pode ser grande, e que a resistência interna da bateria é pequena, origina correntes elevadas de carregamento para a bateria. Desta forma, foi desenvolvido o controlo do carregamento em tensão por degraus, ou seja, a tensão passa para um patamar de tensão seguinte mais elevado sempre que o valor da corrente de carregamento da bateria encontra-se limitado a uma gama de valores de corrente mais baixas. No entanto, uma vez que a ação do compensador de tensão é mais lenta que o controlador de corrente, a dinâmica do controlo não pode ser muito rápida. Assim, é possível realizar de uma forma controlada o carregamento em tensão sem que a corrente seja demasiado elevada. Na **Figura 5.8 a)** está representada o aumento da tensão aos terminais da bateria, conforme os limites da corrente de carregamento estejam dentro dos limites definidos – **Figura 5.8 b)**. Os “picos” de corrente na corrente de carregamento da bateria - **Figura 5.8 b)** devem-se à sobre-elevação da tensão (**Figura 5.8 a)**) causada pela resposta do compensador quando tenta impor que a tensão siga a tensão de referência.



(vertical – 5 V/Div e horizontal – 0,5 s/Div).

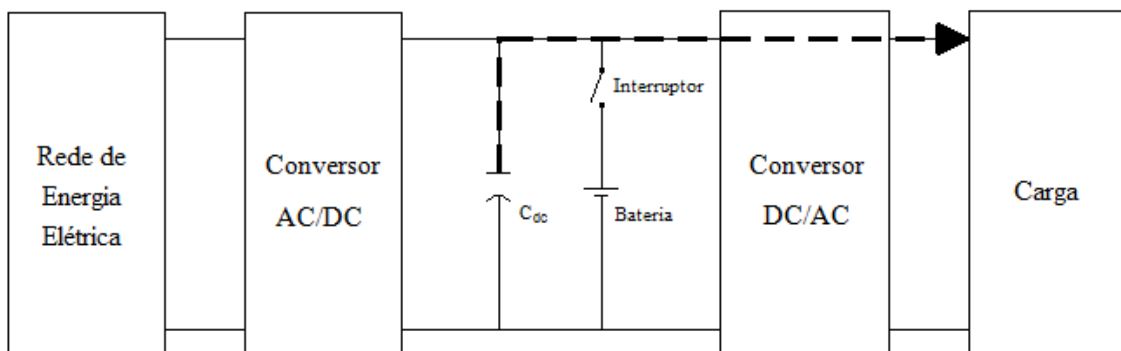
(vertical – 0,5A/Div e horizontal – 0,5 s/Div).

**Figura 5.8** – Carregamento da bateria em modo de tensão através da limitação da corrente.

Neste estado também foi considerada a perda de energia armazenada, ocorrida na bateria, quando não está a ser utilizada. Deste modo, a bateria tem alguma margem de perda de energia sem ter que estar constantemente a carregar até aos 100% da sua capacidade.

#### ▪ Estado 6

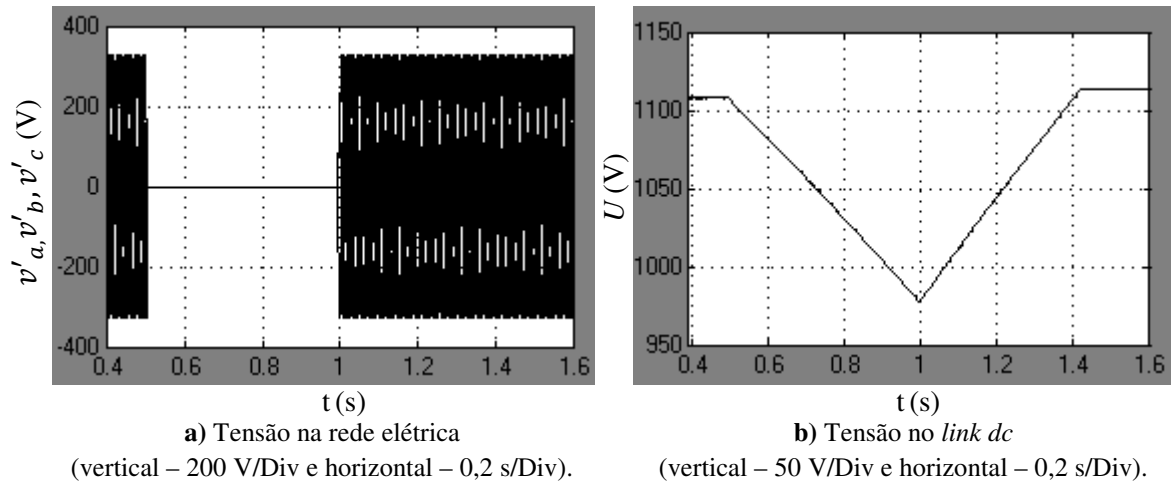
Quando existe uma falha no serviço de fornecimento por parte da rede e é necessário prover energia à carga, o banco de condensadores transfere a energia que possui armazenada - **Figura 5.9**. A permanência deste estado depende da duração da interrupção e da capacidade de armazenamento de energia do banco de condensadores. Se a duração da interrupção for curta, o banco de condensadores suprime as necessidades energéticas da carga. Contudo, se a interrupção prolongar-se no tempo é necessário que o banco de baterias entre em funcionamento (estado 7).



**Figura 5.9** – Diagrama de blocos referente ao estado 6.

Na **Figura 5.10 a)** está representada uma interrupção com a duração de 0,5 s na rede de energia elétrica. Na **Figura 5.10 b)** a tensão no *link dc* diminuiu sempre no

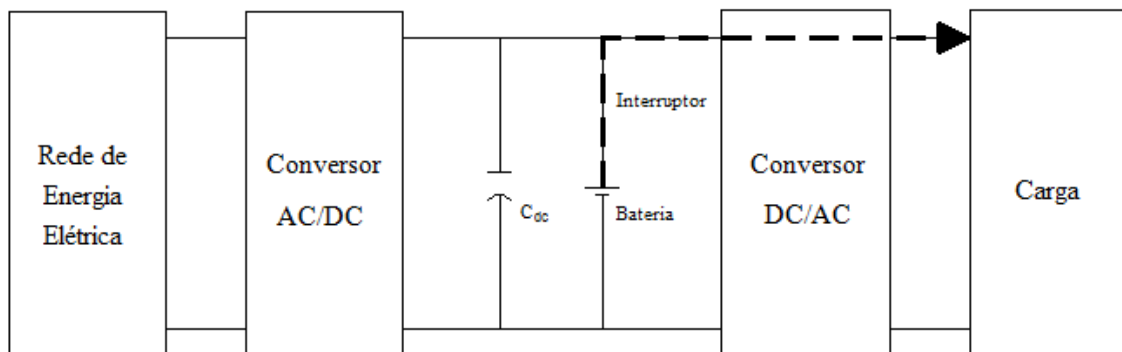
intervalo de tempo compreendido entre os 0,5 e 1 s, correspondente ao tempo da interrupção e no qual o condensador forneceu energia à carga. Após o instante de tempo de 1 s, a tensão na rede elétrica é reposta e o condensador é carregado.



**Figura 5.10** – Interrupção na rede de energia elétrica.

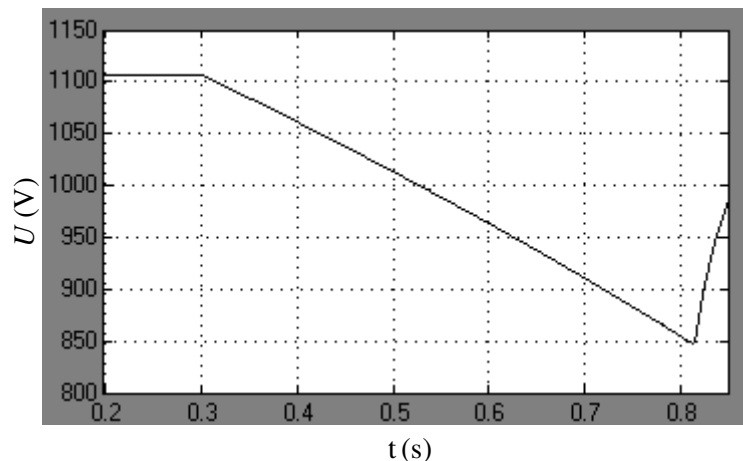
#### ▪ Estado 7

O estado 7 é referido à entrada em serviço do banco de baterias. A condição para tal consiste na leitura do valor da tensão no *link dc* e, se este descer do valor mínimo (visto em 4.43), é realizada a ordem para fechar o interruptor que liga às baterias.



**Figura 5.11** – Diagrama de blocos referente ao estado 7.

Na **Figura 5.12** está representado o valor da tensão no *link dc*. Antes do instante de tempo de 0,3 segundos a rede elétrica funciona normalmente (estado 1), até a ocorrência da interrupção do serviço. A partir desse momento o sistema muda para o estado 6, sendo o condensador DC dimensionado para suprir as necessidades da carga durante cerca de meio segundo. Como a interrupção da energia elétrica continua, é necessário que o banco de baterias entre em funcionamento (estado 7) para assegurar o fornecimento de energia à carga.



**Figura 5.12** – Tensão no *link dc* entre transição de estados  
(vertical – 50 V/Div e horizontal – 0,1 s/Div).

#### ▪ Estado 8

Se a situação no estado 7 for prolongada para além do tempo calculado para o fornecimento de energia à carga por parte das baterias, vai ser atingido o ponto de profundidade de descarga dimensionado, neste caso 70% da capacidade do banco de baterias, para o qual é dado o comando para a abertura do interruptor, cortando o fornecimento de energia para a carga, ou é dado ordem para entrar em funcionamento um grupo gerador.

Para além destes estados, são definidos outros dois estados onde não acontecem troca de energia: quando não existe disponibilidade de fornecimento de energia pela rede e não há uma carga a ser alimentada, sendo que as baterias podem estar ou não carregadas.

## 5.4 – Conclusões

No sistema têm de estar previstas as condições e respetivas ações dos estados, para que o mesmo seja autónomo e saiba lidar com as situações.

De forma a aumentar a vida útil das baterias, foram implementadas várias técnicas, que estão definidas nos automatismos:

- Foi limitada a profundidade do ciclo de descarga a 70%, de modo a evitar ciclos de descarga completos para minimizar o esforço realizado pelas baterias.
- A utilização de um banco de condensadores evita a utilização das baterias para interrupções de curta duração, evitando que estas entrem em funcionamento mais vezes.

- O carregamento adequado das baterias também é importante. Quando a bateria encontra-se próximo de estar carregada é efetuado o carregamento em modo de tensão, de modo que a bateria acabe de carregar mais lentamente mas com correntes baixas. De outra maneira, é realizado o carregamento em modo de corrente, injetando um valor de corrente constante.





# Capítulo 6

## RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Neste capítulo é avaliada a robustez e especificados os limites de funcionamento do sistema desenvolvido, utilizando o *software* MATLAB/SIMULINK. Os resultados obtidos no simulador, perante vários cenários de simulação, são usados para efetuar a comparação entre os dois métodos utilizados de controlo da corrente: o controlo por modo de deslizamento e o controlo preditivo.

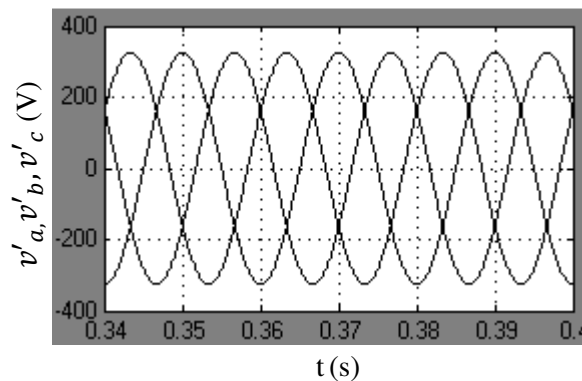
No **Anexo C** encontra-se o modelo do sistema de alimentação ininterrupta de energia e as tabelas com os valores dos parâmetros utilizados na simulação, enquanto no **Anexo D** pode ser encontrado o programa de controlo do sistema.

## 6.1 – Testes ao sistema

Em seguida serão mostrados os testes realizados ao sistema e os resultados obtidos.

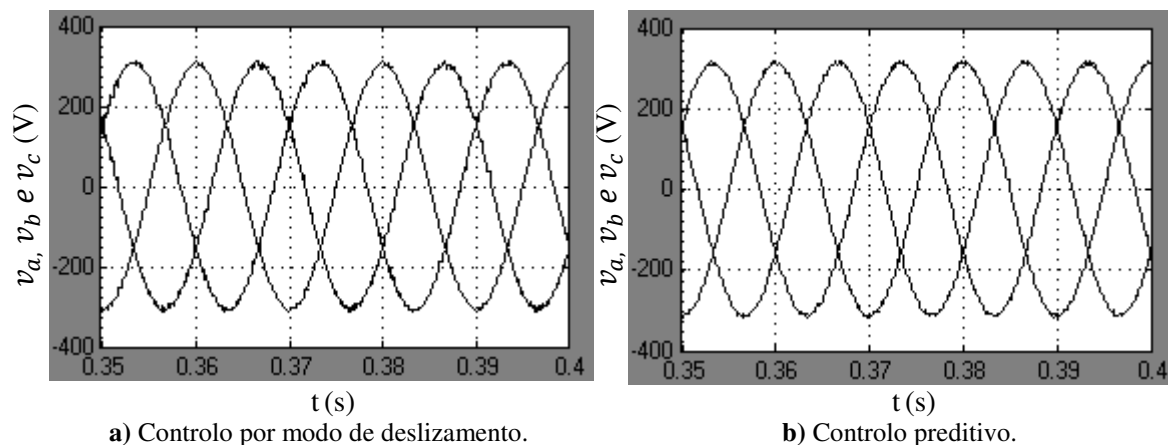
### 6.1.1 – Funcionamento em regime permanente

Na situação ideal, as formas de onda da tensão da rede elétrica de energia não apresentam quaisquer perturbações – **Figura 6.1**.



**Figura 6.1** – Formas de onda da tensão da rede elétrica sem perturbações (vertical – 200 V/Div e horizontal – 10 ms/Div).

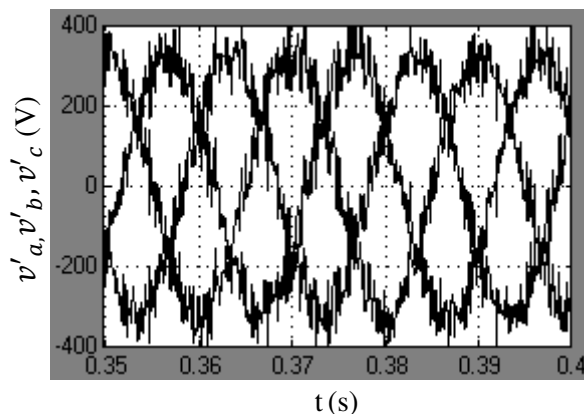
Nas **Figuras 6.2 a) e b)** estão representadas as formas de onda da tensão na carga, utilizando os dois tipos de controlo da corrente implementados. Verifica-se que os resultados da forma de onda são melhores utilizando o controlo preditivo, onde a THD obtida foi de 1,4% contra os 2,2% obtidos com o controlo por modo de deslizamento.



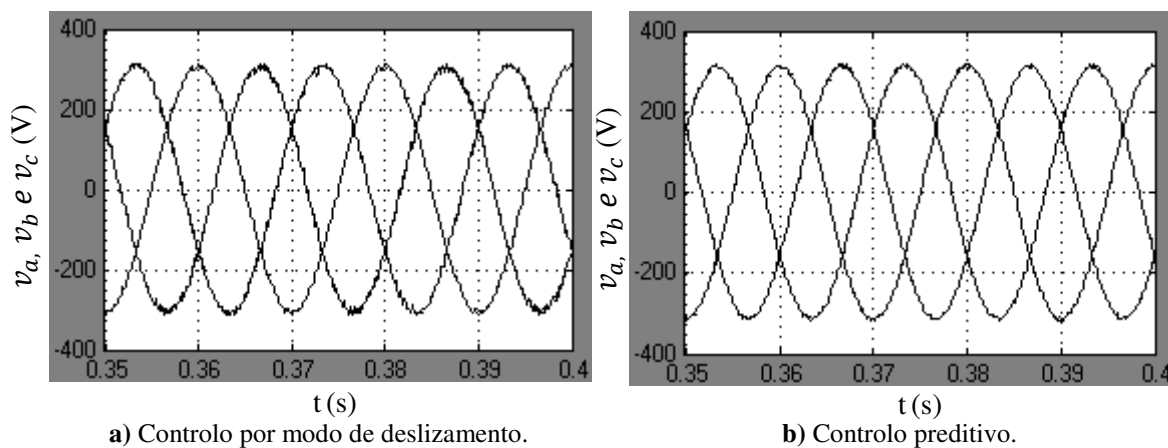
**Figura 6.2** – Formas de onda da tensão na carga  
(vertical – 200 V/Div e horizontal – 10 ms/Div).

### 6.1.2 – Presença de ruído

A presença de ruído na tensão da REE, sendo no caso representado na **Figura 6.3** com um valor de THD de 17%, não suscitou qualquer perturbação na tensão na carga, **Figuras 6.4 a) e b)**, uma vez que a taxa de distorção harmónica manteve-se nos 1,4% para o controlo preditivo e nos 2,2% para o controlo por modo de deslizamento.



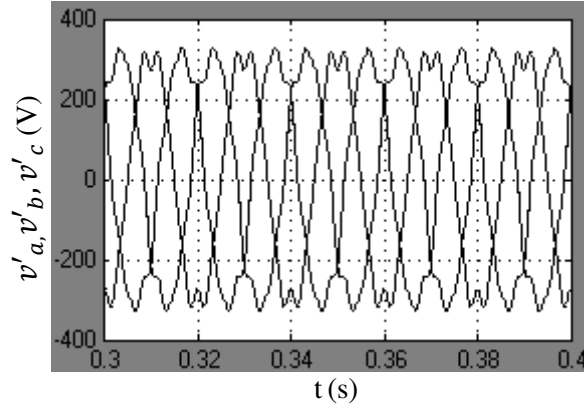
**Figura 6.3** – Ruído na tensão da rede elétrica  
(vertical – 200 V/Div e horizontal – 10 ms/Div).



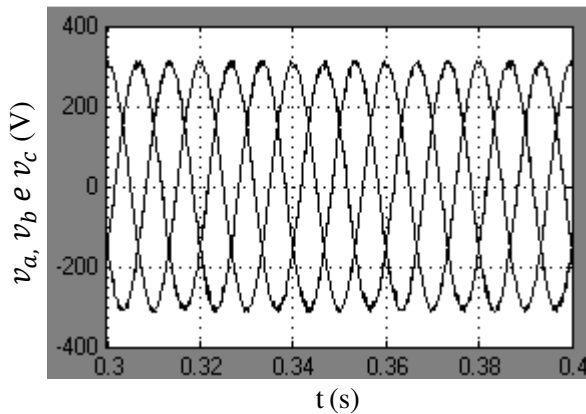
**Figura 6.4** – Formas de onda da tensão na carga  
(vertical – 200 V/Div e horizontal – 10 ms/Div).

### 6.1.3 – Harmónicos

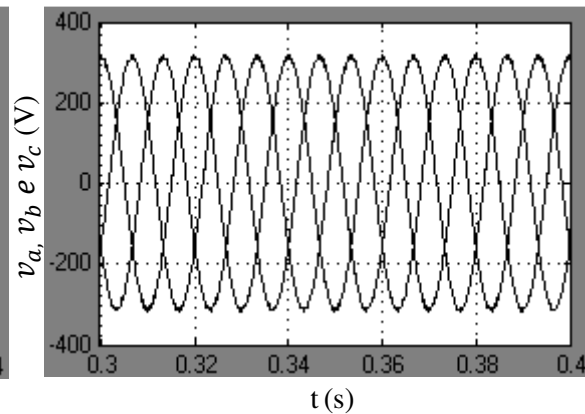
Na **Figura 6.5** foi considerada a presença de harmónicos, sendo que não foi notada alterações na tensão da carga – **Figuras 6.6 a) e b)**.



**Figura 6.5** – Presença de harmónicos  
(vertical – 200 V/Div e horizontal – 20 ms/Div).



**a)** Controlo por modo de deslizamento.

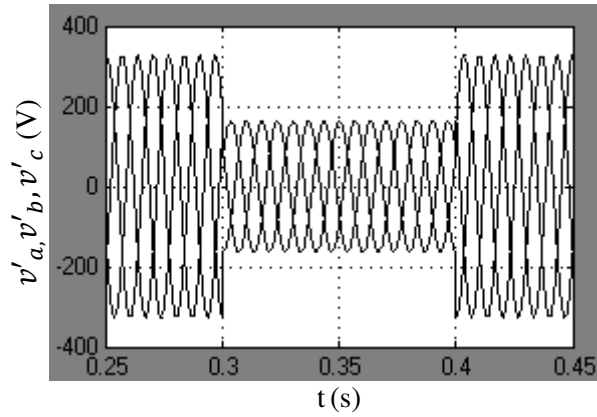


**b)** Controlo preditivo.

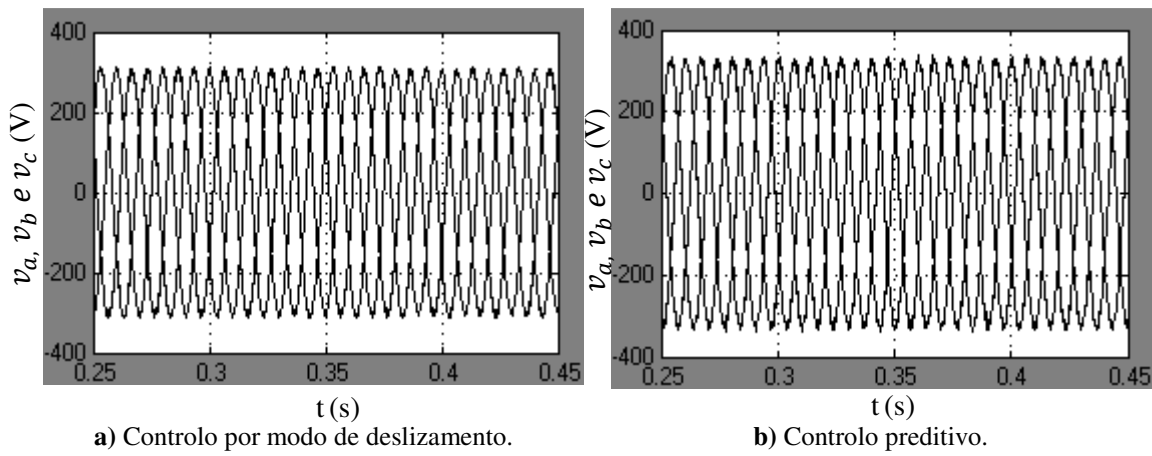
**Figura 6.6** – Formas de onda da tensão na carga  
(vertical – 200 V/Div e horizontal – 20 ms/Div).

### 6.1.4 – Cava

Considerando a cava de tensão representada na **Figura 6.7**, com uma duração de 0,1 segundo e profundidade de 50%, verificou-se que a tensão de saída do sistema não era afetada – **Figuras 6.8 a) e b)**. Contudo, para a situação de carga máxima o condensador no *link dc* teve que ajudar a fornecer energia à carga.



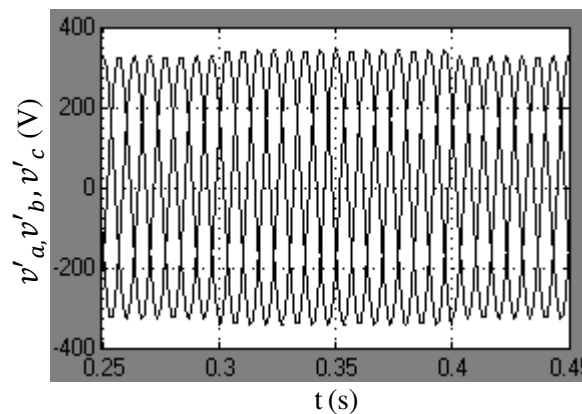
**Figura 6.7** – Cava de tensão  
(vertical – 200 V/Div e horizontal – 50 ms/Div).



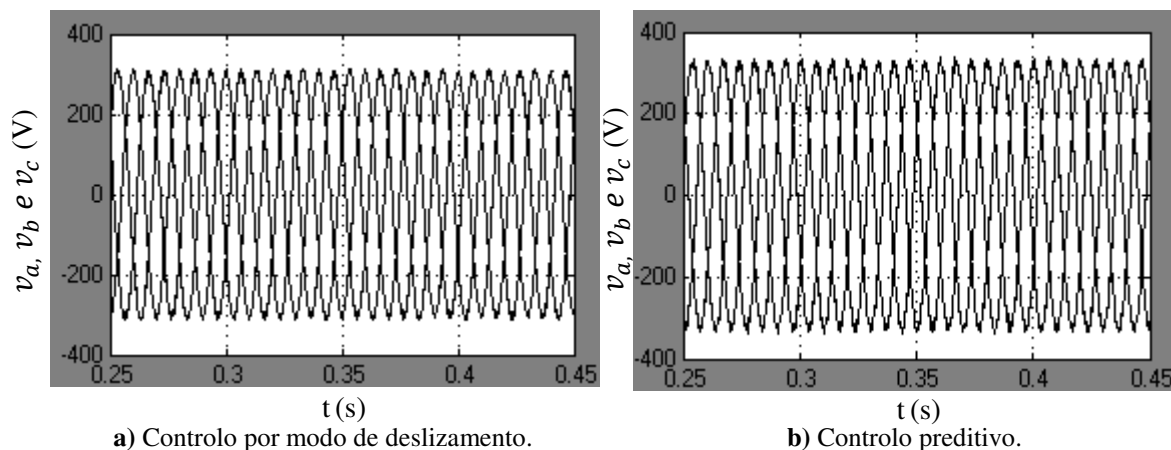
**Figura 6.8** – Formas de onda da tensão na carga  
(vertical – 200 V/Div e horizontal – 50 ms/Div).

### 6.1.5 – Sobretensão

Na **Figura 6.9** encontra-se representada uma sobretensão, tendo a duração de 0,1 segundos e amplitude de 5% relativamente à tensão, numa situação normal. Nas **Figuras 6.10 a) e b)** apresentam-se as formas de onda da tensão na carga perante este cenário, onde se constata que a forma de onda da tensão não é afetada pela sobretensão.



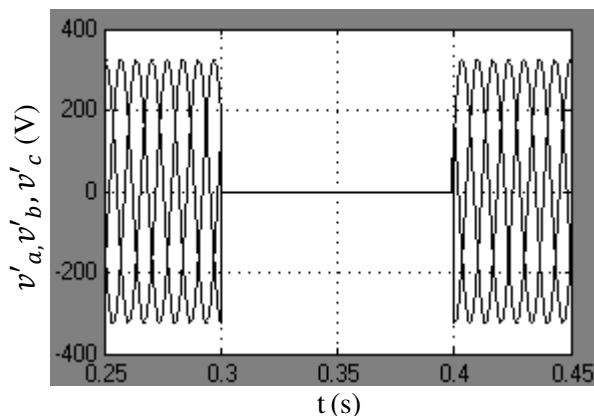
**Figura 6.9** – Sobretensão  
(vertical – 200 V/Div e horizontal – 50 ms/Div).



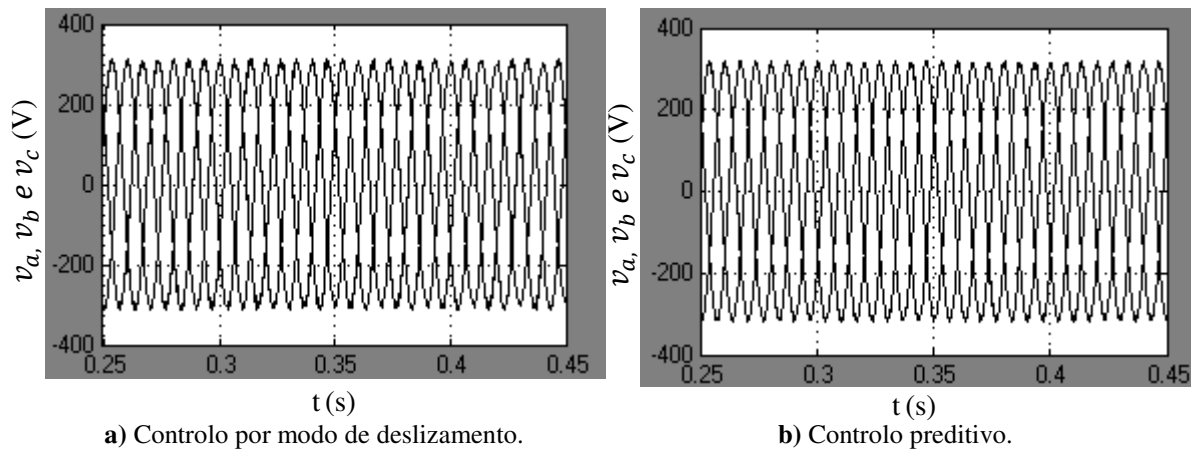
**Figura 6.10** – Formas de onda da tensão na carga  
(vertical – 200 V/Div e horizontal – 50 ms/Div).

### 6.1.6 – Interrupção de curta duração

Na **Figura 6.11** é considerada uma interrupção de curta duração (0,1 s) da tensão da rede elétrica. Nas **Figuras 6.12 a) e b)**, que representam a tensão na carga, não existe a presença de alterações na forma de onda graças ao fornecimento de energia por parte do condensador DC. Este conseguiu colmatar a interrupção e evitar que as baterias necessitassem de entrar em ação.



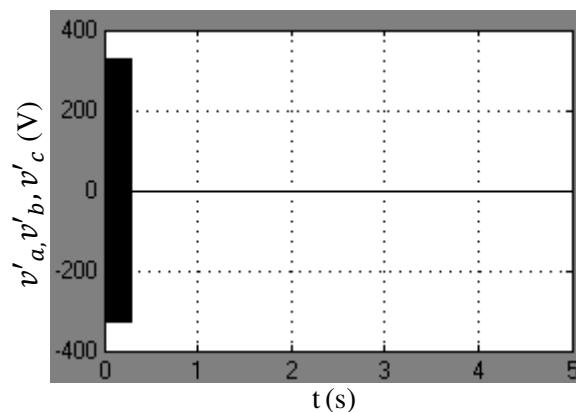
**Figura 6.11** – Formas de onda da tensão da rede elétrica sem perturbações  
(vertical – 200 V/Div e horizontal – 50 ms/Div).



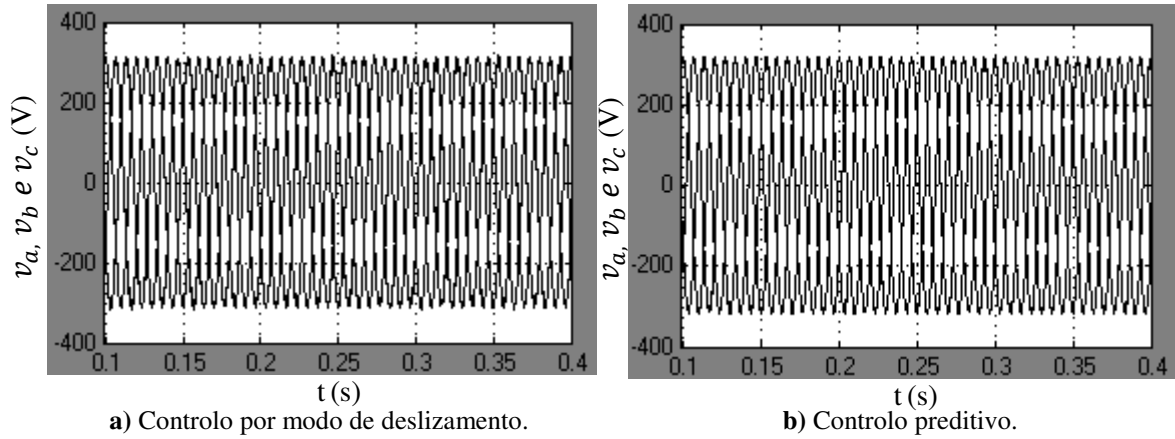
**Figura 6.12** – Formas de onda da tensão na carga  
(vertical – 200 V/Div e horizontal – 50 ms/Div).

### 6.1.7 – Corte na tensão da rede de energia elétrica

No caso do acontecimento do corte de energia da rede elétrica, cuja simulação está representada na **Figura 6.13**, a bateria tem que fornecer energia à carga após o condensador suprimir as necessidades desta, durante os primeiros instantes da interrupção. Mesmo nesta circunstância exigente, as formas de onda das tensões na carga não são afetadas – **Figuras 6.14 a) e b)**.



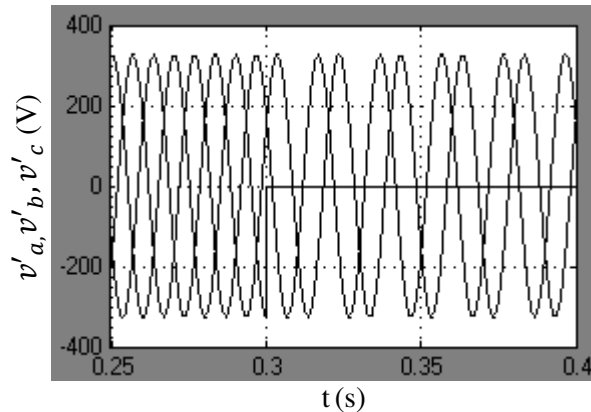
**Figura 6.13** – Corte da energia da REE  
(vertical – 200 V/Div e horizontal – 1 s/Div).



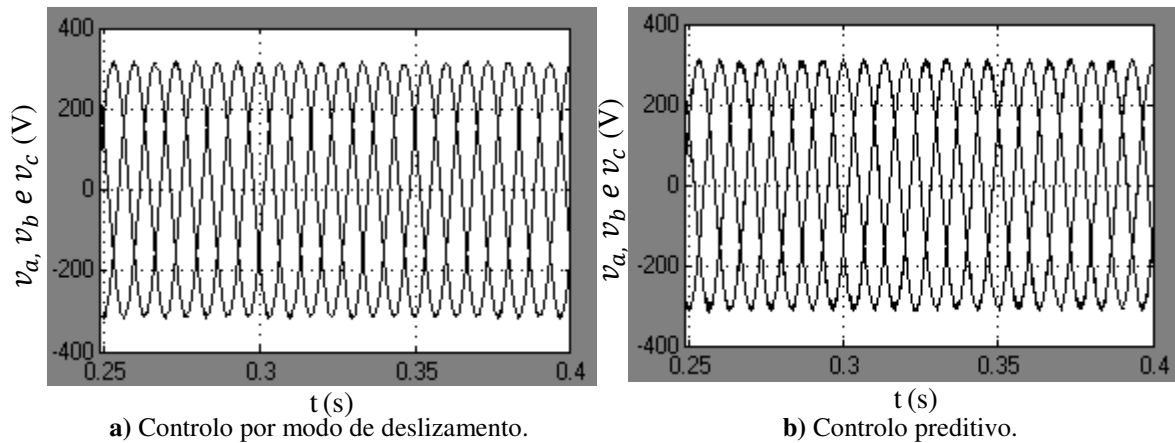
**Figura 6.14** – Formas de onda da tensão na carga  
(vertical – 200 V/Div e horizontal – 50 ms/Div).

### 6.1.8 – Supressão de uma fase na rede de energia

No caso de uma das fases estar em baixo, **Figura 6.15**, para satisfazer as necessidades da carga (considerando a máxima) por um longo período de tempo, e mantendo as formas de onda da tensão – **Figuras 6.16 a) e b)**, implica a entrada em funcionamento das baterias.



**Figura 6.15** – Supressão de uma fase na rede  
(vertical – 200 V/Div e horizontal – 50 ms/Div).

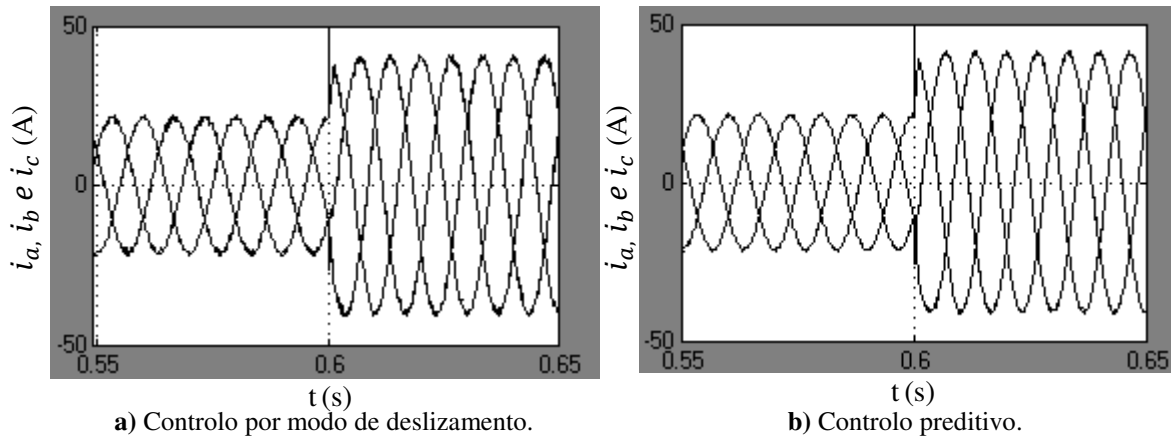


**Figura 6.16** – Formas de onda da tensão na carga  
(vertical – 200 V/Div e horizontal – 50 ms/Div).



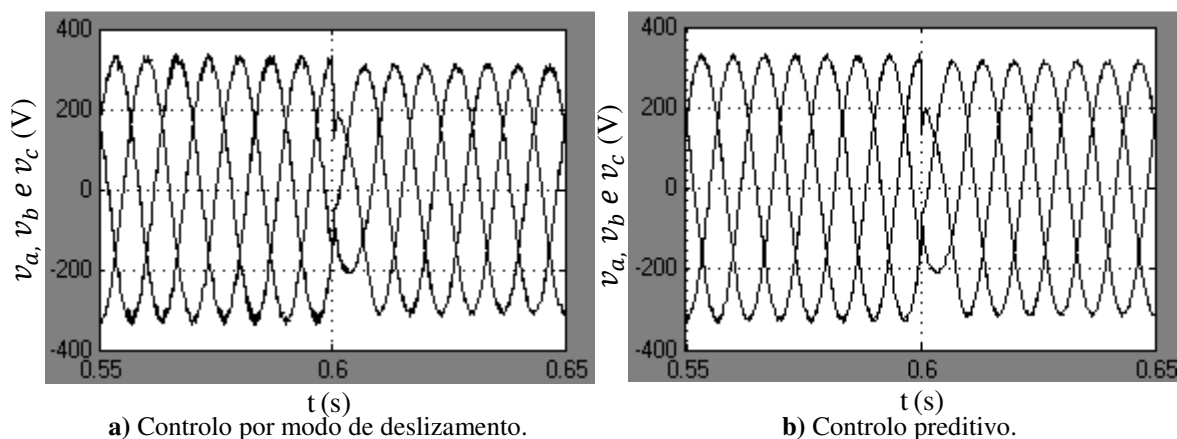
### 6.1.9 – Variação na carga

Nas **Figuras 6.17 a) e b)** estão representadas as formas de onda da corrente na carga, considerando que antes do instante de tempo de 0,6 segundos o sistema fornece metade da potência máxima à carga, e que depois desse instante passa a fornecer a potência máxima (20,7kVA). Verifica-se que em ambos os casos a transição é semelhante e quase instantânea.



**Figura 6.17** – Formas de onda da corrente na carga  
(vertical – 50 A/Div e horizontal – 50 ms/Div).

Quanto à tensão na carga, verifica-se que a resposta é parecida para os dois tipos de controlo utilizados – **Figuras 6.18 a) e b)**. Após o instante de tempo da ligação súbita de metade da potência máxima da carga, a tensão recupera rapidamente e estabiliza nos valores normais.

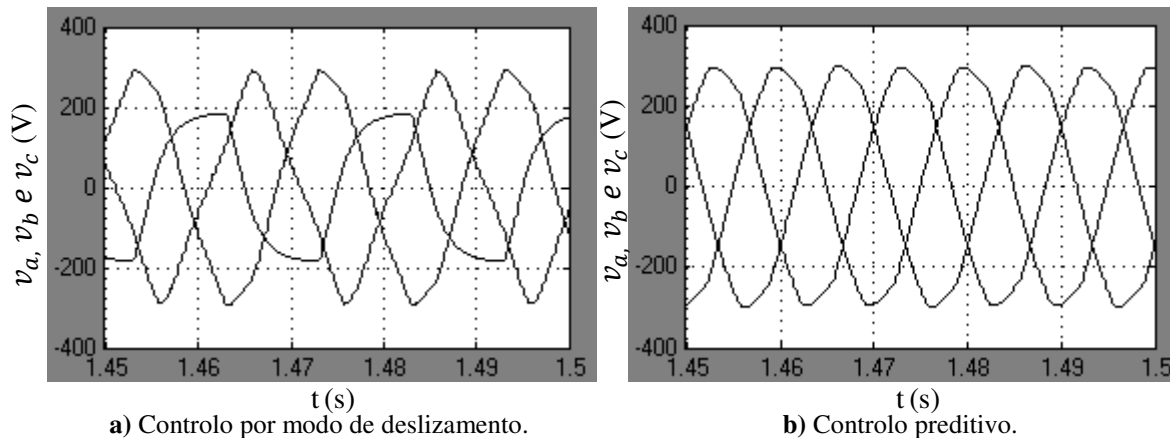


**Figura 6.18** – Formas de onda da tensão na carga  
(vertical – 50 A/Div e horizontal – 50 ms/Div).

### 6.1.10 – Tensão mínima *link DC*

Considerando que em (4.43) o valor médio da tensão na bobina é zero e assumindo que a resistência da bobina é muito pequena, podendo ser desprezada, obtém-se um valor mínimo da tensão no *link DC* ainda mais baixo. De modo a avaliar o desempenho do controlo por modo de deslizamento e do controlo preditivo se fosse levado em conta as considerações apresentadas, apresentam-se nas **Figuras 6.19 a) e b)** as formas de onda da tensão na carga para uma tensão no *link dc* de 563V.

Se por um lado verifica-se que as formas de onda da tensão na carga, utilizando o controlo por modo de deslizamento, **Figura 6.19 a)**, apresentam grandes níveis de distorção, obtendo-se 16,5% de THD, é verificado por outro lado que a utilização do controlo preditivo proporciona formas de onda com baixa distorção (THD de 2,4%) como é visível na **Figura 6.19 b)**. As razões deste melhoramento devem-se às características do controlo preditivo. A utilização do modelo do sistema em conjunto com o conhecimento do valor das variáveis de interesse permite prever qual a combinação aplicada aos estados dos interruptores que minimiza a função custo, conseguindo deste modo realizar um controlo mais preciso.



**Figura 6.19** – Formas de onda da tensão na carga  
(vertical – 200 V/Div e horizontal – 10 ms/Div).

## 6.2 – Conclusões

A UPS de dupla conversão não deixa transparecer as perturbações ocorridas na rede elétrica na carga. Para falhas que ocorram durante um pequeno período de tempo, o condensador permite a supressão das necessidades energéticas da carga, pelo que as

baterias entram em funcionamento em situações de distúrbios prolongados no tempo na rede de energia.

Comparando o controlo por modo de deslizamento com o controlo preditivo, verificou-se que a distorção das formas de onda da tensão na carga é menor quando é utilizado o controlo preditivo. Uma forma de reduzir os custos do sistema é utilizando componentes que não necessitem de trabalhar com tensões tão elevadas no *link dc*. Deste modo, o controlo preditivo possui uma vantagem em relação ao controlo por modo de deslizamento, uma vez que a taxa de distorção harmónica na tensão da carga para o controlo preditivo é pequena. O facto do controlo por modo de deslizamento obter elevados níveis de distorção na tensão da carga, prende-se com a razão de este ser mais simples e lidar com o erro enquanto o controlo preditivo utiliza o modelo do sistema e tem conhecimento do valor das variáveis em jogo, podendo realizar um controlo mais preciso como evidenciado pelos resultados obtidos. A desvantagem do controlo preditivo é a exigência do poder de processamento requerido.



# Capítulo 7

## CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões gerais desta dissertação, destacando as conclusões mais importantes que foram vistas em cada capítulo. Deste modo, são enquadradas com os objetivos pretendidos a atingir sendo que no final do capítulo, são apresentadas algumas sugestões para realização de trabalhos futuros.

## 7.1 – Conclusões gerais

Na rede de energia elétrica podem acontecer fenómenos suscetíveis de comprometerem a qualidade da energia fornecida, podendo desta forma afetar equipamentos ou sistemas sensíveis com consequências negativas.

A utilização da UPS *online* ou de dupla conversão permite a proteção contra perturbações da rede elétrica de uma forma contínua e sem reflexões na carga do tempo de transição entre o estado normal e o de *backup*.

O fornecimento de energia a cargas sensíveis implica que a qualidade da forma de onda da tensão entregue seja elevada, apresentando uma taxa de distorção harmónica baixa.

A utilização de baterias como sistema de armazenamento da UPS exige alguns cuidados especiais, se for pretendido que a vida útil destas seja o mais prolongado possível. Fatores como a limitação da profundidade do ciclo de descarga, o correto carregamento da bateria e o evitar da utilização constante da bateria, mesmo que por pouco tempo, podem estender a durabilidade das mesmas.

Neste trabalho foi pretendido aliar técnicas de controlo para otimizar a qualidade da energia elétrica, com técnicas que permitissem o aumento da durabilidade do sistema de armazenamento de energia. Para a implementação do controlador de corrente e de tensão foi necessário efetuar uma mudança de referencial, através da aplicação da transformada de *Clarke-Concórdia* no caso das correntes e da transformada de *Park* para as tensões. A aplicação de um compensador linear para geração das correntes de referência, utilizadas na malha interna de controlo da corrente, para controlar a tensão de saída provou funcionar corretamente. O controlo das correntes, através do controlo preditivo mostrou um desempenho melhor em relação ao controlo por método de deslizamento, uma vez que o tremor das correntes obtidas foi menor para o 1º caso. O condensador no *link dc* demonstrou que em caso de falha na rede elétrica, com um período de curta duração, evita a entrada em funcionamento do banco de baterias.

Ainda na comparação entre os dois tipos de controlo utilizados, o por modo de deslizamento e o preditivo, foi constatado que para a utilização de uma tensão abaixo do valor de tensão mínimo no *link dc*, o controlo preditivo continuava a demonstrar um

bom desempenho enquanto o controlo por modo de deslizamento mostrou um desempenho muito longe do controlo preditivo. Esta situação abona a favor do controlo preditivo no contexto deste trabalho, uma vez que pode levar a reduções no valor da tensão do *link dc*, diminuindo os custos do sistema e sem afetar de uma forma muito notória a qualidade da energia.

Perante os resultados obtidos na simulação realizada no MATLAB/SIMULINK, pode-se afirmar que o sistema desenvolvido proporciona a continuidade do serviço em caso de falha da rede, melhorando a qualidade da energia à saída e capaz de proporcionar o aumento da duração do sistema de armazenamento de energia.

## **7.2 – Trabalhos futuros**

Ao longo da elaboração deste trabalho existiram ideias ou apareceram outras novas, que podem ser objeto de estudo de trabalhos futuros. Algumas delas são:

- Construção de um protótipo laboratorial do sistema desenvolvido;
- Realização de um estudo prático em baterias comerciais para efetivar o aumento da vida útil do sistema de armazenamento devido à solução apresentada;
- Análise económica e relação do custo/benefício traduzido pela utilização do banco de condensadores em detrimento do aumento da vida útil das baterias;
- Possível melhoramento dos automatismos ou da implementação de novas funcionalidades.

## Referências

- [1] J. P. Trovão, P. Pereirinha, H. Jorge, “Analysis of Harmonic Distortion in Building Electrical Installation with Computer Devices”, in *Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'07)*, Sevilla, 2007.
- [2] O. Gul, “An Assessment of Power Quality and Electricity Consumer’s Rights in Restructured Electricity Market in Turkey,” *Electrical Power Quality and Utilisation Journal*, vol. XIV, no. 2, pp. 29-34, 2008.
- [3] IEEE Standard 1159-2009, “Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality”, IEEE, New York, June, 2009.
- [4] J. L. Afonso and J. S. Martins, “Qualidade da Energia Eléctrica,” *Mag. o Electricista*, no. 9, pp 66-71, 2004.
- [5] J. M. Guerrero, L. G. de Vicuña and J. Uceda, “Uninterruptable Power Supply Systems Provide Protection,” *IEEE Industrial Electronics Magazine*, pp. 28-38, Spring 2007.
- [6] K. Dai, P. Liu, J. Xiong and J. Chen, “Study on Dual-DSP-Controlled Three-Phase Series-Parallel Compensated Line-Interactive UPS System (Delta-Conversion UPS),” in *International Electric Machines and Drives Conference*, 2003, pp. 436-442.
- [7] F. D. Gonçalves, “Resposta de Sistemas Ininterruptos de Energia Frente a Fenômenos de Qualidade da Energia,” Master’s dissertation, Dept. Elect. Eng., Brasília Univ., Brasília, BSB, 2008.
- [8] Z. Zhongjiu, L. Guofeng and W. Ninghui, “Research on Control Strategy of Three-phase High Power Factor PWM Rectifier,” *International Journal of Digital Content Technology and its Applications*, vol. 5, no. 8, pp. 365-373, Aug., 2011.
- [9] F. Botterón, H. Pinheiro, “A Three-Phase PWM Inverter For Double Conversion UPS That Complies With the Standard IEC 62040-3,” in *Power Electronics Specialists Conference*, 2005, pp. 2898 – 2904.
- [10] B. Kingham. Quality of Supply Standards: Is EN 50160 the answer? [Online]. Disponível:[https://www.oasis-open.org/committees/download.php/37248/Power Quality White Paper from Schneider.pdf](https://www.oasis-open.org/committees/download.php/37248/Power%20Quality%20White%20Paper%20from%20Schneider.pdf).
- [11] P. Miranda, “Simulação do Impacto da Microgeração Fotovoltaica Distribuída na Rede Eléctrica de Baixa Tensão,” Dissertação para obtenção do grau de mestre em



engenharia electrotécnica e de computadores, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2010.

[12] IEEE Standard 1184-2006, “Guide for Batteries for Uninterruptible Power Supply Systems,” IEEE, New York, Sept., 2006.

[13] A. von Jouanne, P. Enjeti and D. Lucas, “DSP Control of High Power UPS Systems Feeding Nonlinear Loads,” in *Proceedings of the American Control Conference*, Seattle, WA, 1996, pp. 495-499.

[14] C. H. Lai and Y. Y. Tzou, “DSP-Embedded UPS Controller for High-Performance Single-Phase On-Line UPS Systems,” in *28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society*, 2002, pp. 268-273.

[15] P. Cortés, M. P. Kazmierkowski, R. M. Kennel, D. E. Quevedo and J. Rodríguez, “Predictive Control in Power Electronics and Drives”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 12, pp. 4312-4324, Dec., 2008.

[16] R. R. Errabelli, Y. Y. Kolhatkar and S. P. Das, “Experimental Investigation of Sliding Mode Control of Inverter for Custom Power Applications,” in *Power Engineering Society General Meeting*, 2006, pp. 1-8.

[17] K. M. Høvik, “Control of Offshore Passive Platform System Voltage and Frequency through Control of Onshore Back-to-Back Voltage Source Converters,” Master of Science in Energy and Environment, Norwegian University of Science and Technology, 2011.

[18] J. F. Silva, “Controlo Não Linear de Conversores Electrónicos de Potência,” in *Electrónica Industrial*, 1st ed. Porto, Fundação Calouste Gulbenkian, 1998, pp. 832 - 845.

[19] J. C. Olivier, J. C. Le Claire and L. Loron, “A Powerful Switching Frequency Limitation in Sliding Mode Control,” in *Power Electronics and Motion Control Conference*, 2006, pp. 919-924.

[20] E. D. Bolat and H. M. Ertunç, “Control of Single Phase UPS Inverter Using Fuzzy Gain Scheduling of PI Controller” in *7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, 2011, pp. 381-385.

[21] V. M. Cárdenas, C. Nuñez and N. Vázquez, “Analysis and Evaluation of Control Techniques for Active Power Filters: Sliding Mode Control and Proportional-Integral Control,” in *14th Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 1999, pp 649-654.

- [22] D. Barros, “Conversores Multinível: Comando e Controlo por Computador,” Dissertação para obtenção do grau de mestre em engenharia electrotécnica e de computadores, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2002.
- [23] K. Ogata, “Transient and Steady-State Response Analyses,” in *Modern control engineering*, 4th ed. London, Prentice-Hall, 2002.
- [24] D. Barros, “Conversão Electrónica Multinível: Optimização para Aplicações em Qualidade de Energia Eléctrica,” Dissertação para obtenção do grau de doutor em engenharia electrotécnica e de computadores, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2008.
- [25] J. F. Silva, “Conversão comutada na alimentação de sistemas com alimentação crítica de energia,” in *Sistemas de Energia em Telecomunicações: Texto de apoio*, 2009, pp. 33 - 45.
- [26] UPG. (2012). Sealed Lead-Acid Battery. [Online]. Disponível: <http://www.apeximg.com/spec/45821.pdf>.
- [27] Empresa de Eletricidade da Madeira. (2012). Qualidade de Serviço. [Online]. Disponível: <http://www.eem.pt/images/stories/documents/RQS2011.pdf>.

## ANEXO A

```
function [gA, gB, gC] = fcn(iaref, ibref, ialpha, ibeta, Valpha,
Vbeta, R, L, ts, U)

%tabela vetores
V=[0 0 0; 0 0 1; 0 1 0; 0 1 1; 1 0 0; 1 0 1; 1 1 0; 1 1 1];
Vab=[0 0;-0.40824829 -0.707106781;-0.40824829 0.707106781;-0.816496581
0;0.816496581 0;0.40824829 -0.707106781;0.40824829 0.707106781;0 0];

%n vetores existentes
tamanho=size(Vab);
fim=tamanho(1,1);

%atribuicao do custo inicial
custo=1000000e23;

i=1;
j=1;

while (i<fim+1)

%corrente ialpha para o vetor atual
Ialpha=ialpha-R/L*ts*ialpha-ts*Valpha/L+ts*(U/L)*(Vab(i,1));

%corrente ibeta para o vetor atual
Ibeta=ibeta-R/L*ts*ibeta-ts*Vbeta/L+ts*(U/L)*(Vab(i,2));

%funcao custo
custoT=(iaref-Ialpha)^2+(ibref-Ibeta)^2;

if custoT<custo
    custo=custoT;
    j=i;
    Voptimo=V(j,:);
end

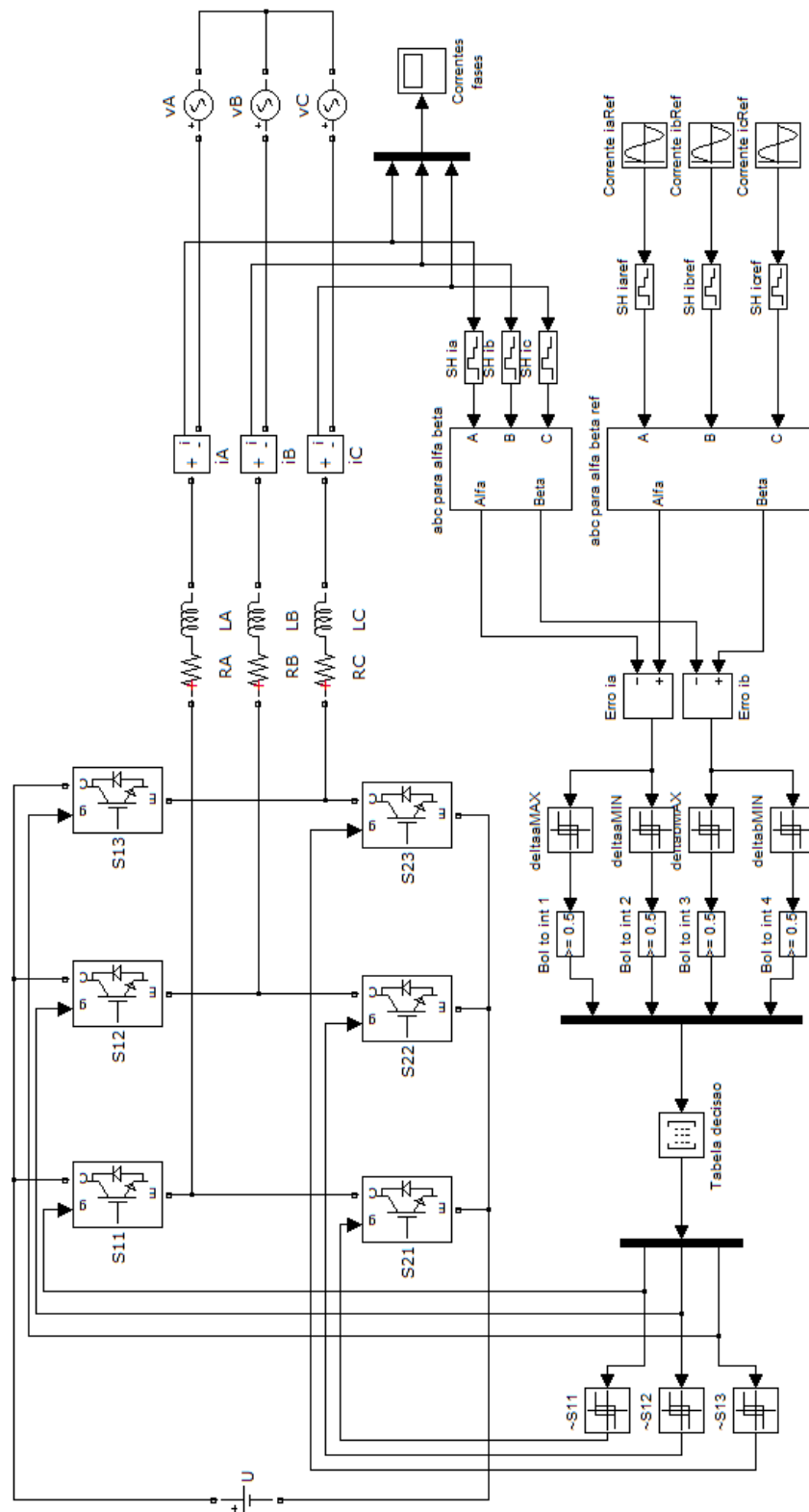
i=i+1;

end

%escolha dos gamas para o vector com menor custo
Voptimo=V(j,:);
gA=Voptimo(1,1);
gB=Voptimo(1,2);
gC=Voptimo(1,3);

end
```

## ANEXO B



**Figura B.1** – Modelo do conversor trifásico no MATLAB/SIMULINK utilizando controle por modo de deslizamento.

**Tabela B.1** – Valores dos parâmetros do conversor trifásico, utilizando o controle por modo de deslizamento.

Parâmetro	Valor	Descrição
$R_A=R_B=R_C$	10 mΩ	Resistências de perdas das bobinas
$L_A=L_B=L_C$	15 mH	Coefficiente de auto-indução das bobinas
$v_A=v_B=v_C$	230 V	Valor eficaz da tensão nas cargas
$U$	1200 V	Valor da tensão de alimentação $dc$
$f_{ac}$	50 Hz	Frequência das grandezas alternadas e sinusoidais
$f_s$	20 kHz	Frequência de amostragem
$t_s$	50 μs	Tempo de amostragem
$i_{aRef}=i_{bRef}=i_{cRef}$	10 A	Valor eficaz das correntes de referência
$\varepsilon$	0,05	Valor do erro admissível para as correntes

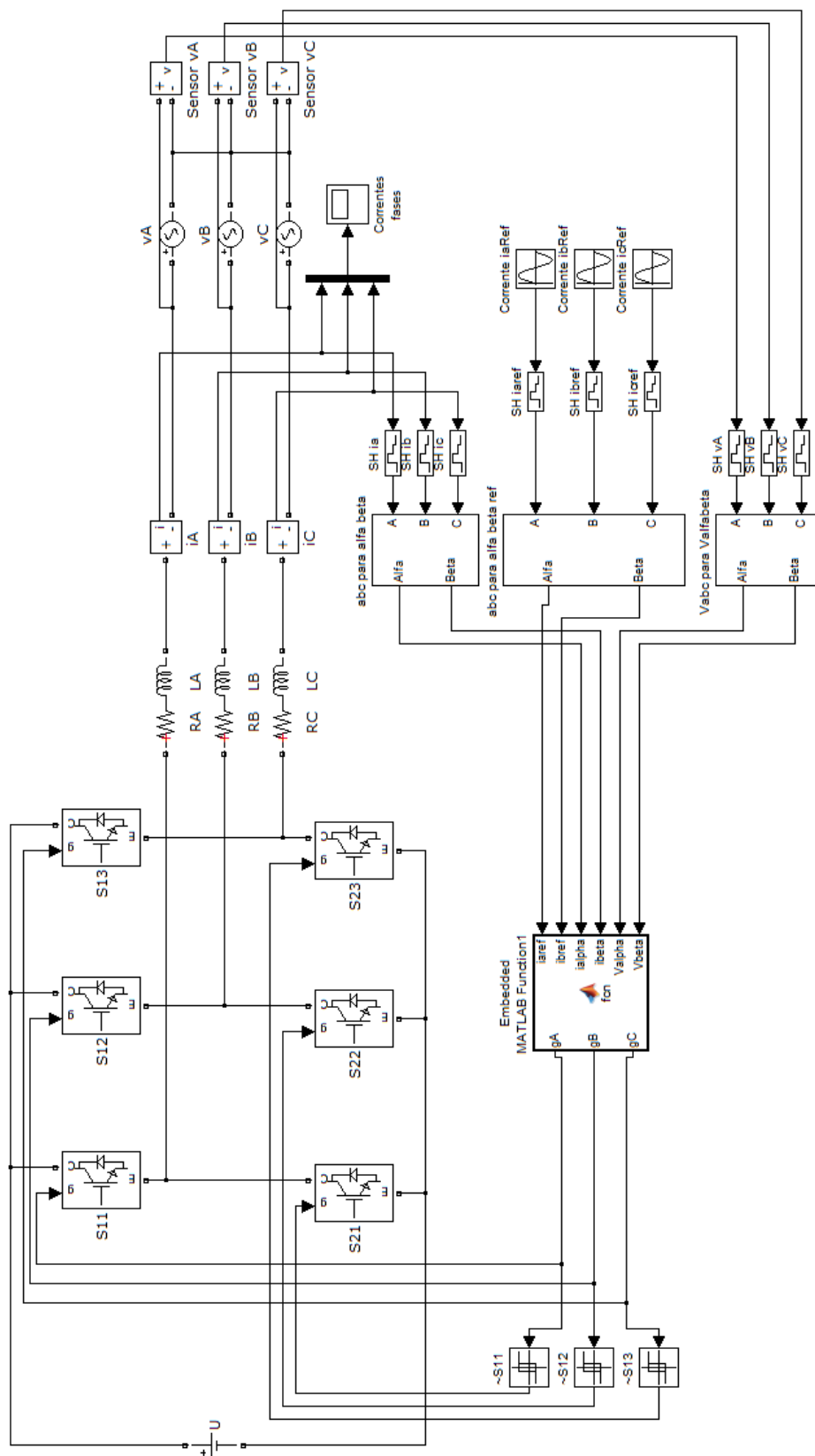
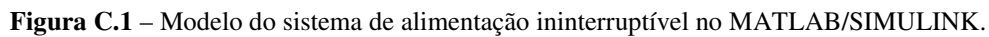
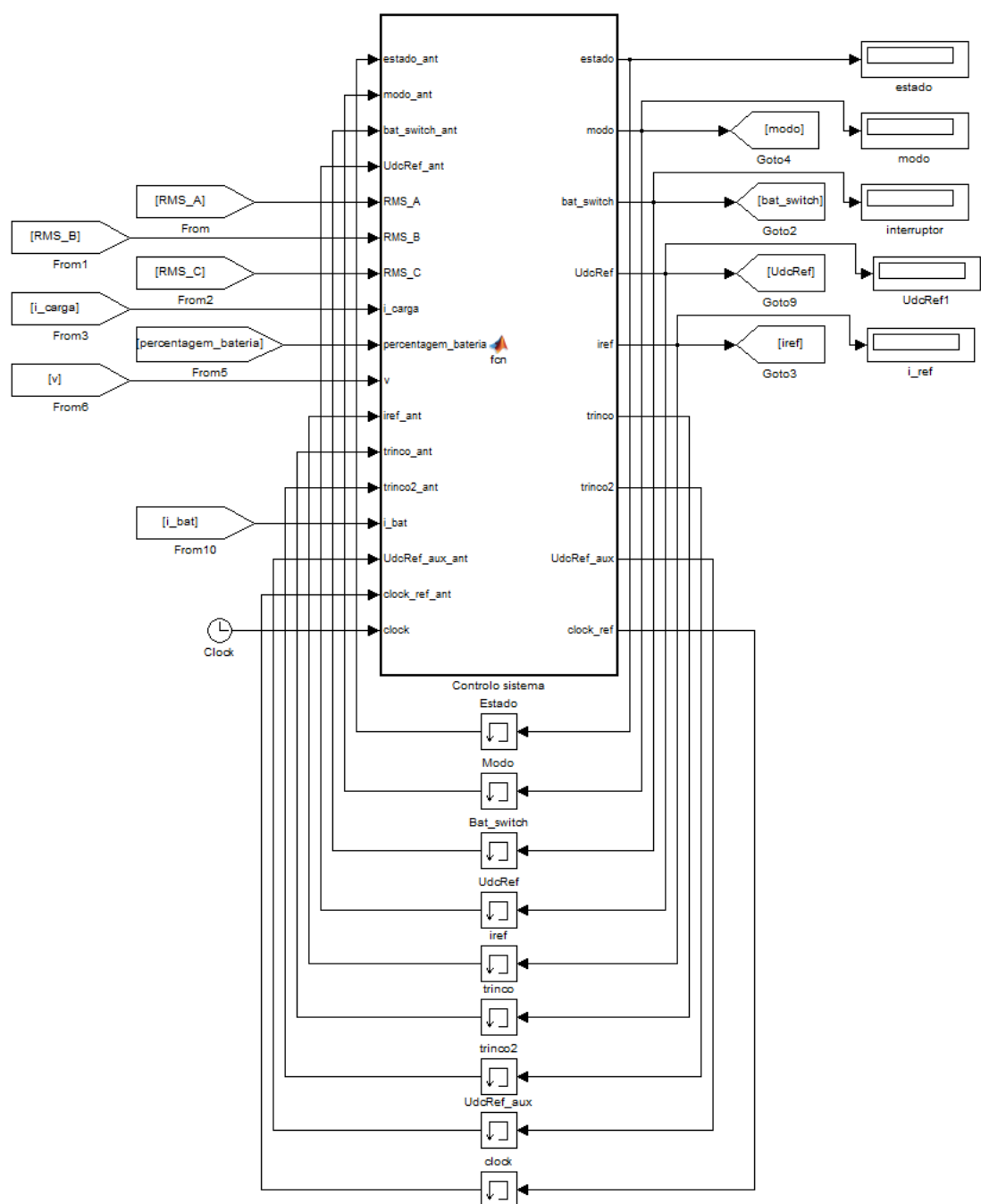


Figura B.2 – Modelo do conversor trifásico no MATLAB/SIMULINK utilizando controlo preditivo.

## ANEXO C





**Figura C.2** – Controlo do sistema de alimentação ininterruptível utilizando uma função *Embedded MATLAB Function* do MATLAB/SIMULINK.



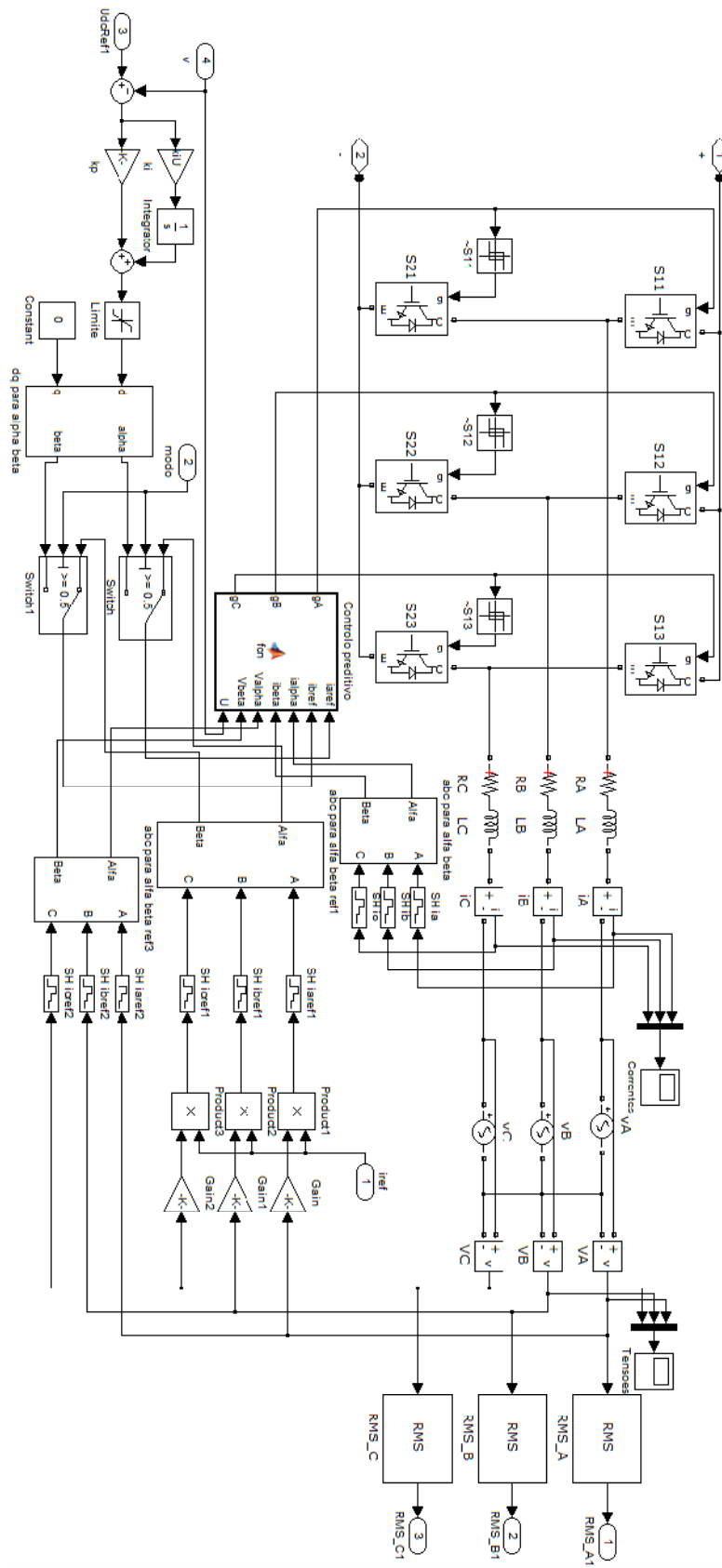


Figura C.3 – Modelo do retificador de tensão utilizando o controlo preditivo.

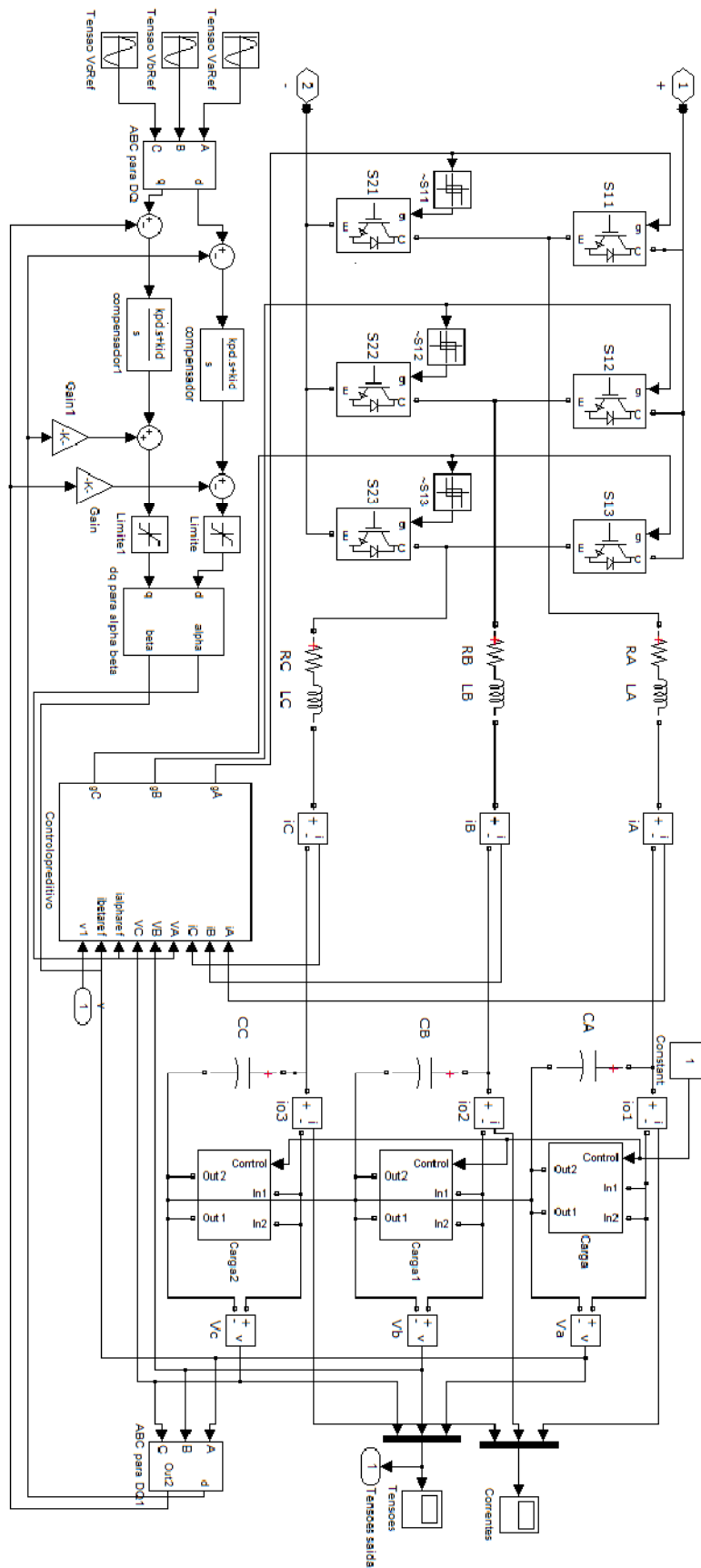
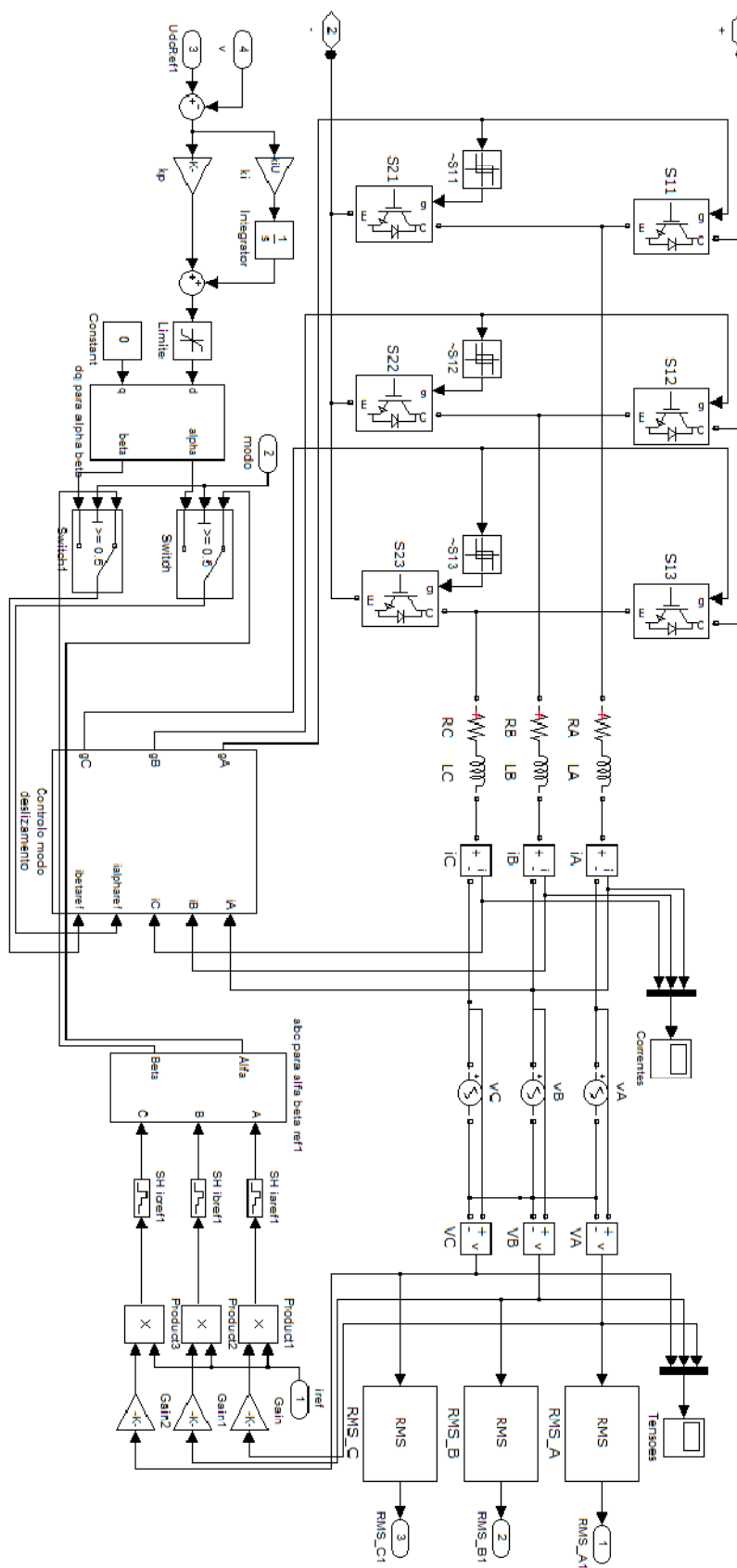


Figura C.4 – Modelo do inversor de tensão utilizando o controlo preditivo.



**Figura C.5** – Modelo do retificador de tensão utilizando o controlo por modo de deslizamento.

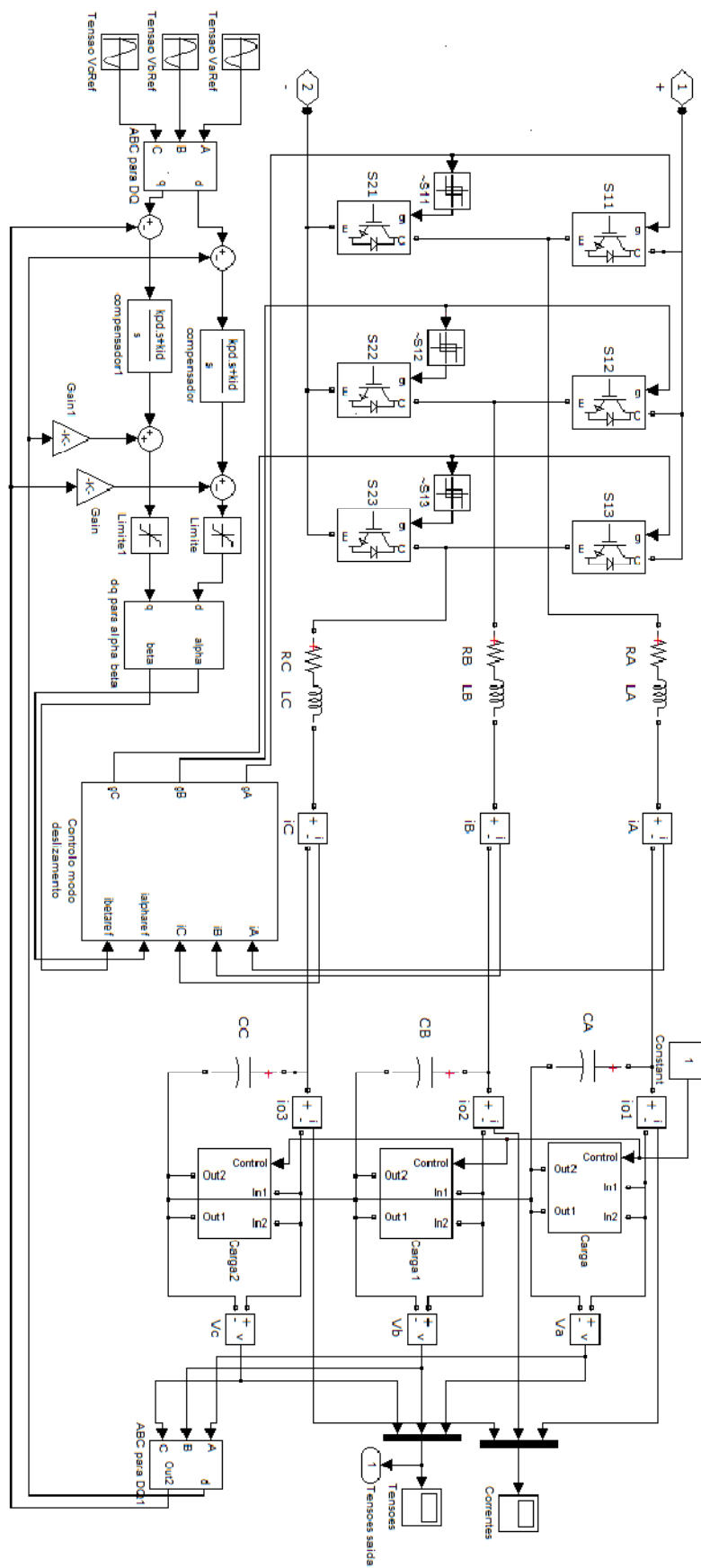


Figura C.6 – Modelo do inversor de tensão utilizando o controlo por modo de deslizamento.

**Tabela C.1** – Valores dos parâmetros do sistema de alimentação ininterruptível.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Descrição</b>
$R_A=R_B=R_C=C$	10 mΩ	Resistências de perdas das bobinas
$L_A=L_B=L_C=L$	15 mH	Coefficiente de auto-indução das bobinas
$v_A=v_B=v_C=v$	230 V	Valor eficaz da tensão nas cargas
$f_{ac}$	50 Hz	Frequência das grandezas alternadas e sinusoidais
$f_s$	20 kHz	Frequência de amostragem
$t_s$	50 μs	Tempo de amostragem
$C_{dc}$	39,5 mF	Capacidade do condensador do <i>link dc</i>
$k_i U$	10	Ganho integral do compensador do retificador
$k_p U$	100	Ganho proporcional do compensador do retificador
$\varepsilon$	0,05	Valor do erro admissível para as correntes
$R_l$	7,66 Ω	Resistência de carga
$C_A=C_B=C_C=C$	10 μF	Capacidade do condensador de filtragem
$\omega$	$2\pi 50$ rad/s	Frequência angular das grandezas alternadas sinusoidais
$k_{i_{d,q}}$	98,696	Ganho integral do compensador do inversor
$k_{p_{d,q}}$	0,044	Ganho proporcional do compensador do inversor

# ANEXO D

```
function [estado, modo, bat_switch, UdcRef, iref, trinco, trinco2,
UdcRef_aux, clock_ref] = fcn(estado_ant, modo_ant, bat_switch_ant,
UdcRef_ant, RMS_A, RMS_B, RMS_C, i_carga, percentagem_bateria, v,
iref_ant, trinco_ant, trinco2_ant, i_bat, UdcRef_aux_ant,
clock_ref_ant, clock)

estado=estado_ant;
modo=modo_ant;
bat_switch=bat_switch_ant;
UdcRef=UdcRef_ant;
iref=iref_ant;
trinco=trinco_ant;
UdcRef_aux=UdcRef_aux_ant;
clock_ref=clock_ref_ant;
trinco2=trinco2_ant;

if (RMS_A>=230 && RMS_B>=230 && RMS_C>=230 && i_carga>0.1 &&
percentagem_bateria>98 && trinco2==0)%com rede -- bateria carregada --
com carga
    estado=1;
else
    if (RMS_A>=230 && RMS_B>=230 && RMS_C>=230 && i_carga<0.1 &&
percentagem_bateria>98 && trinco2==0)%com rede -- bateria carregada --
sem carga
        estado=2;
    else
        if (RMS_A>=230 && RMS_B>=230 && RMS_C>=230 && i_carga>0.1 &&
percentagem_bateria<95)%com rede -- bateria descarregada -- com carga
            estado=3;
        else
            if (RMS_A>=230 && RMS_B>=230 && RMS_C>=230 && i_carga<0.1
&& percentagem_bateria<95)%com rede -- bateria descarregada -- sem
carga
                estado=4;
            else
                if (RMS_A>=230 && RMS_B>=230 && RMS_C>=230 &&
percentagem_bateria>95 || RMS_A>=230 && RMS_B>=230 && RMS_C>=230 &&
percentagem_bateria<98 && trinco2==1)%com rede -- bateria descarregada
-- sem carga
                    estado=5;
                else
                    if (RMS_A<(230) || RMS_B<(230) || RMS_C<(230)) &&
i_carga>0.1 && v>846.7 && trinco==0%sem rede -- condensador carregado
-- com carga
                        estado=6;
                    else
                        if (RMS_A<(230) || RMS_B<(230) || RMS_C<(230))
&& i_carga>0.1 && v<846.7%sem rede -- condensador descarregado -- com
carga
                            estado=7;
                        else
                            if (RMS_A<(230) || RMS_B<(230) ||
RMS_C<(230)) && i_carga>0.1 && percentagem_bateria<70%sem rede --
bateria descarregada -- com carga
                                estado=8;
                            else
                                if (RMS_A<(230) || RMS_B<(230) ||
RMS_C<(230)) && i_carga<0.1 && percentagem_bateria>98 &&
trinco2==0%==100%sem rede -- bateria carregada --sem carga
```

```

                                estado=9;
                                else
                                    if (RMS_A<(230) || RMS_B<(230) ||
RMS_C<(230)) && i_carga<0.1 && percentagem_bateria<70%sem rede --
bateria descarregada -- sem carga
                                        estado=10;
                                    end
                                end
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end

switch estado
case 1
    modo=0;
    bat_switch=0;
    UdcRef=1108;
    trinco=0;

    if percentagem_bateria<98
        trinco2=1;
    end

case 2
    modo=0;
    bat_switch=0;
    UdcRef=1108;
    trinco=0;

case 3
    modo=1;
    bat_switch=1;
    iref=((i_carga+1)*v)/(RMS_A+RMS_B+RMS_C)*sqrt(2);
    trinco=0;

case 4
    modo=1;
    bat_switch=1;
    iref=((1)*v)/(3*230)*sqrt(2);
    trinco=0;

case 5
    modo=0;
    bat_switch=1;
    UdcRef_aux;
    trinco2=1;

while (percentagem_bateria~=100)

    UdcRef=UdcRef_aux;

    if UdcRef>1108
        UdcRef=1108;
    end

    if i_bat<1 && clock>clock_ref
        UdcRef_aux=UdcRef_aux+0.5;
        UdcRef=UdcRef_aux;

```

```

        clock_ref=clock_ref+0.5;
    end

    if i_bat>1 && clock>clock_ref
        UdcRef_aux=UdcRef_aux;
        UdcRef=UdcRef_aux;
        clock_ref=clock_ref+0.5;
    end

    if i_bat<0
        UdcRef_aux=v+0.5;
        UdcRef=UdcRef_aux;
    end

    if percentagem_bateria==100
        trinco2=0;
    end

    break;
end

trinco=0;

case 6
    modo=0;
    bat_switch=0;
    UdcRef=1108;
case 7
    bat_switch=1;
    trinco=1;

    if percentagem_bateria<70
        bat_switch=0;
    end

case 8
    modo=0;
    bat_switch=0;
    UdcRef=1108;
    trinco=0;
case 9
    modo=0;
    bat_switch=0;
    UdcRef=1108;
    trinco=0;
case 10
    modo=0;
    bat_switch=0;
    UdcRef=1108;
    trinco=0;

end

```