



# **Impacto dos transformadores inteligentes na rede elétrica de distribuição**

**Francisco da Graça Gonçalves**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Eletrotécnica e de Computadores**

Orientadores: Prof. Sónia Maria Nunes dos Santos Paulo Ferreira Pinto  
Prof. José Fernando Alves da Silva

## **Júri**

Presidente: Prof. Célia Maria Santos Cardoso de Jesus  
Orientador: Prof. Sónia Maria Nunes dos Santos Paulo Ferreira Pinto  
Vogais: Prof. Paulo José Duarte Landeiro Gamboa

**Novembro 2021**



# Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.



# Agradecimentos

Gostaria de demonstrar o meu profundo agradecimento a todas as pessoas que me acompanharam ao longo deste percurso.

À Prof. Sónia Pinto, por toda a orientação e constante apoio prestado na elaboração desta dissertação.

Agradeço aos meus pais, Fernando e Aida, por serem os meus pilares, por todo o apoio, bem como pelos valores que me têm transmitido.

À minha irmã, Inês, e ao meu cunhado, Fábio, deixo também uma palavra de agradecimento por me terem ajudado desde pequeno, pois sem eles nunca teria entrado nesta grande instituição, nem alcançado o último patamar deste ciclo de estudos.

À minha companheira e confidente, Beatriz, obrigado por todas as opiniões e palavras de conforto. Sem ela nada disto teria sido possível, pois estive sempre ao meu lado nos bons e nos maus momentos, fazendo-me querer sempre mais.

Foram cinco anos de árduo trabalho que culminam na elaboração desta dissertação, nos quais cresci e me tornei numa pessoa mais capacitada para a nova fase que agora se segue.

**A todos, o meu sincero obrigado!**

Este projeto foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) com a referência PTDC/EEI-EEE/32550/2017 - Smart Transformer for Sustainable Grids.



# Resumo

Atualmente, devido à crescente importância dos recursos de energia renovável, impõem-se muitos desafios técnicos e operacionais na rede de distribuição. Além disso, a atual rede de distribuição pode também apresentar alguns problemas, tais como: (i) o fluxo de potência desequilibrado, (ii) a sobrecarga da rede, (iii) a presença de harmônicas de tensão e (iv) a instabilidade da frequência e da tensão. Por conseguinte, são vários os equipamentos de eletrônica de potência que tentam mitigar ou solucionar estes problemas.

Nesta dissertação é apresentado o Transformador Inteligente, tecnologia baseada em conversores eletrônicos de potência, e que, não só é capaz de gerir os fluxos de energia, como também tem a capacidade de gerir os fluxos de comunicação. O Transformador Inteligente foi implementado com uma arquitetura de 3 estágios de conversão, com um transformador de alta frequência em cada uma das três fases e ainda com recurso a filtros e controladores de corrente e tensão.

Para a implementação e simulação do Transformador Inteligente na rede elétrica de distribuição, foi usado o programa de simulação *Simulink* do *Matlab*, onde foram realizados vários cenários de simulação de modo a testar a tecnologia em estudo.

As principais conclusões do estudo revelam que o Transformador Inteligente é capaz de operar adequadamente na rede elétrica de distribuição. De facto, esta dissertação comprova que não só é capaz de suportar perturbações na rede de média tensão, como também pode ser utilizado em várias áreas geográficas uma vez que pode ser aplicado a redes de baixa tensão com diferentes frequências de operação.

## Palavras-chave

Transformador Inteligente, Eletrônica de Potência, Fluxos de Energia, Fluxos de Comunicação, Rede Elétrica de Distribuição





# Abstract

Nowadays, due to the growing importance of renewable energy resources, many technical and operational challenges are imposed on the distribution grid. In addition, the current distribution grid may also present some problems, such as: (i) unbalanced power flow, (ii) network overload, (iii) presence of voltage harmonics and (iv) frequency and voltage instability. Therefore, there are several power electronics equipment that try to mitigate or solve these problems.

This dissertation presents the Smart Transformer, a technology based on power electronics converters, which is not only capable of managing power flows, but also has the ability to manage communication flows. The Smart Transformer was implemented with a 3-stage conversion architecture, with a high-frequency transformer in each of the three phases and also with the use of filters and current and voltage controllers.

For the implementation and simulation of the Smart Transformer in the electrical distribution grid, the simulation program used was Simulink of Matlab, where several simulation scenarios were carried out in order to test the technology under study.

The main conclusions of the study reveal that the Smart Transformer is capable of operating properly in the electrical distribution grid. In fact, this dissertation proves that it is not only able to withstand disturbances in the medium voltage grid, but it can also be used in several geographical areas since it can be applied to low voltage grids with different operating frequencies.

# Keywords

Smart Transformer, Power Electronics, Power Flow, Communication Flow, Electrical Distribution Grid



# Conteúdo

1. Introdução.....	1
1.1. Motivação e definição do problema.....	2
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Estrutura da Dissertação.....	3
2. Revisão do Estado da Arte.....	5
2.1. A origem do Transformador Inteligente.....	6
2.2. Fluxos de um Transformador Inteligente.....	7
2.3. Arquitetura do Transformador Inteligente.....	7
2.3.1. Grau de modularidade da arquitetura 3.....	8
2.4. Estrutura de controlo.....	9
2.4.1. Parte A - Serviços da rede.....	10
2.4.2. Parte B - Infraestrutura de comunicação.....	12
2.5. Conversores para os estágios de energia.....	13
2.5.1. Conversor de média tensão AC/DC.....	13
2.5.2. Conversor DC/DC.....	14
2.5.3. Conversor de baixa tensão DC/AC.....	15
3. Metodologia.....	17
3.1. Transformador Inteligente.....	18
3.2. Técnicas de modulação.....	21
3.3. Dimensionamento dos filtros.....	21
3.3.1. Filtros AC.....	22
3.3.2. Filtros DC.....	23
3.4. Dimensionamento dos controladores.....	24
3.4.1. Controlador de corrente AC.....	25
3.4.2. Controlador de tensão DC.....	27
3.4.3. Controlador de tensão AC.....	29
3.4.4. Controlador de corrente DC.....	30
3.5. Rede.....	31
4. Resultados e Discussão.....	33

4.1. Cenário 1: Condições e funcionamento normal .....	34
4.2. Cenário 2: Presença de cavas na rede de média tensão.....	39
4.3. Cenário 3: Presença de sobretensões na rede de média tensão .....	44
4.4. Cenário 4: Variação da frequência da rede de baixa tensão .....	49
4.5. Cenário 5: Desacoplamento da potência reativa entre cada terminal.....	52
5. Conclusões e Trabalho Futuro .....	57
5.1. Conclusões .....	58
5.2. Perspetivas de Trabalho Futuro .....	59
Bibliografia .....	61
Anexos.....	63
Anexo 1: Gráficos auxiliares para o cenário 4 .....	63
Anexo 2: Gráficos auxiliares para o cenário 5 .....	65

# Lista de figuras

Figura 2.1: Requisitos para o SST em sistemas de tração e de distribuição [10] .....	6
Figura 2.2: O papel de um Transformador Inteligente na rede de distribuição [10].....	7
Figura 2.3: Diagrama de blocos de um conversor de três estágios [15].....	8
Figura 2.4: Controlo e serviços auxiliares do Transformador Inteligente [10].....	10
Figura 2.5: Infraestruturas de comunicação: Private, Wide Area and Core Network [10] .....	13
Figura 2.6: Topologias do conversor de media tensão [10].....	14
Figura 2.7: Topologias do conversor DC/DC [10] .....	15
Figura 2.8: Topologias do conversor de baixa tensão [10] .....	16
Figura 3.1: Esquema do Transformador Inteligente proposto.....	18
Figura 3.2: Conversor H-bridge e a respetiva tabela com as possíveis combinações de disparo para os semicondutores .....	19
Figura 3.3: Bloco do conversor H-bridge do programa de simulação Simulink .....	19
Figura 3.4: Configuração do conversor DC/DC com a topologia DAB .....	20
Figura 3.5: Potência transferida do conversor DC/DC em função do desfasamento [18] .....	20
Figura 3.6: Localização dos filtros AC e DC no Transformador Inteligente .....	22
Figura 3.7: Conversor DC/AC e o seu respetivo filtro AC na ligação à rede .....	25
Figura 3.8: Diagrama de blocos simplificado do controlador de corrente AC .....	26
Figura 3.9: Conversor DC/AC e o seu filtro DC e AC .....	27
Figura 3.10: Diagrama de blocos simplificado do controlador de tensão DC .....	28
Figura 3.11: Conversor DC/DC e o filtro DC do lado de baixa tensão.....	30
Figura 3.12: Diagrama de blocos simplificado do controlador de corrente DC.....	30
Figura 4.1: a) Tensão AC da rede MT; b) Corrente AC da rede MT (cenário1) .....	35
Figura 4.2: Tensão nos condensadores dos filtros DC do lado MT (cenário1).....	36
Figura 4.3: Tensão nos condensadores dos filtros DC do lado BT (cenário1) .....	36
Figura 4.4: Corrente DC à saída do andar de conversão DC/DC (cenário1) .....	37
Figura 4.5: a) Tensão AC da rede BT; b) Corrente AC da rede BT (cenário1).....	38
Figura 4.6: Potência trifásica fornecida pelo ST à carga (cenário1) .....	39
Figura 4.7: a) Tensão AC da rede MT; b) Corrente AC da rede MT (cenário2) .....	41
Figura 4.8: Tensão nos condensadores dos filtros DC do lado MT (cenário2).....	42

Figura 4.9: Tensão nos condensadores dos filtros DC do lado BT (cenário2) .....	42
Figura 4.10: Corrente DC à saída do andar de conversão DC/DC (cenário2) .....	43
Figura 4.11: a) Tensão AC da rede BT; b) Corrente AC da rede BT (cenário2).....	44
Figura 4.12: a) Tensão AC da rede MT; b) Corrente AC da rede MT (cenário3) .....	46
Figura 4.13: Tensão nos condensadores dos filtros DC do lado MT (cenário3).....	47
Figura 4.14: Tensão nos condensadores dos filtros DC do lado BT (cenário3) .....	47
Figura 4.15: Corrente DC à saída do andar de conversão DC/DC (cenário3) .....	48
Figura 4.16: a) Tensão AC da rede BT; b) Corrente AC da rede BT (cenário3).....	49
Figura 4.17: a) Tensão AC da rede MT; b) Corrente AC da rede MT (cenário4) .....	51
Figura 4.18: a) Tensão AC da rede BT; b) Corrente AC da rede BT (cenário4).....	52
Figura 4.19: a) Tensão AC da rede MT; b) Corrente AC da rede MT (cenário5) .....	54
Figura 4.20: a) Tensão AC da rede BT; b) Corrente AC da rede BT (cenário5).....	55

# Lista de tabelas

Tabela 2.1: Comparação do Transformador Inteligente com transformadores tradicionais .....	12
Tabela 3.1: Valor do parâmetro $L_T$ .....	21
Tabela 3.2: Valores do filtro de entrada (lado MT).....	23
Tabela 3.3: Valores do filtro de saída (lado BT).....	23
Tabela 3.4: Valores do parâmetro $C_{DC}$ para o lado MT e BT .....	24
Tabela 3.5: Principais parâmetros do controlador de corrente AC para o lado MT .....	27
Tabela 3.6: Principais parâmetros do controlador de corrente AC para o lado BT .....	27
Tabela 3.7: Ganhos do controlador de tensão DC para o lado MT .....	29
Tabela 3.8: Ganhos do controlador de tensão DC para o lado BT .....	29
Tabela 3.9: Principais parâmetros do controlador de tensão AC para o lado BT .....	29
Tabela 3.10: Ganhos do controlador de corrente DC para o lado BT .....	31
Tabela 4.1: Principais parâmetros da simulação do cenário 1 .....	34
Tabela 4.2: Principais parâmetros da simulação do cenário 2 .....	40
Tabela 4.3: Características da cava de tensão .....	40
Tabela 4.4: Principais parâmetros da simulação do cenário 3 .....	45
Tabela 4.5: Características da sobretensão.....	45
Tabela 4.6: Principais parâmetros da simulação do cenário 4 .....	50
Tabela 4.7: Principais parâmetros da simulação do cenário 5 .....	53





# Acrónimos

AC	Alternating Current / Corrente Alternada
BT	Low Voltage / Baixa Tensão
CHB	Cascaded H-Bridge
DAB	Dual-Active-Bridge
DC	Direct Current / Corrente Contínua
EV	Electric Vehicles / Veículos Elétricos
FACTS	Flexible AC Transmission Systems / Sistema de Transmissão Flexível AC
HB	Half-Bridge
HV	High Voltage / Alta Tensão
HVDC	High Voltage Direct Current / Transmissão em Corrente Direta
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistors / Transístores Bipolares de Porta Isolada
MAB	Multiple Active Bridge
MMC	Modular Multilevel Converter / Conversor de Multinível Modular
MT	Medium Voltage / Média Tensão
NPC	Neutral Point Clamp
PI	Proportional Integral / Integral Proporcional
PV	Photovoltaic / Fotovoltaico
PWM	Pulse Width Modulation / Modulação por Largura de Pulso
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
SR	Series-Resonant
SST	Solid-State Transformer / Transformador de Estado Sólido
ST	Smart Transformer / Transformador Inteligente



# 1

## Introdução

Neste capítulo será realizada a introdução da tese, definindo e explicando o problema que se pretende solucionar. De seguida serão apresentados os diferentes objetivos que compõem a tese e, por fim, a estrutura da mesma.

### Conteúdo

---

**1.1. Motivação e definição do problema**

**1.2. Objetivos**

**1.3. Estrutura da dissertação**

## 1.1. Motivação e definição do problema

Atualmente, devido ao impacto das energias renováveis na sociedade, o consumidor final ligado na rede de energia elétrica deixou de ser apenas um simples consumidor de energia elétrica e passou também a ser, em alguns casos, um produtor de energia, [1]. Devido à crescente importância dos recursos de energia renovável, da fraca oferta de estações de carga para veículos elétricos (EV) e da limitação do fluxo de informação entre as fontes e os centros de controlo ser unidirecional, impõem-se muitos desafios técnicos e operacionais nas redes de distribuição, criando muitas limitações para as novas tecnologias operarem corretamente.

Para além dos desafios mencionados, a atual rede de distribuição de energia elétrica também pode apresentar alguns problemas, tais como: (i) o fluxo de potência desequilibrado, (ii) a sobrecarga da rede, (iii) a presença de harmónicas de tensão, (iv) a instabilidade da frequência e (v) a instabilidade da tensão.

Tendo em conta os desafios técnicos e operacionais da rede de distribuição supramencionados, a eletrónica de potência assume um papel deveras importante, pois permite criar uma ligação entre as cargas e as fontes na rede de distribuição. Adicionalmente, são os equipamentos de eletrónica de potência que, ao serem colocados na rede, tentam mitigar ou solucionar estes problemas, tornando assim a rede mais controlável [2].

Algumas soluções de eletrónica de potência implementadas no mercado são, a título de exemplo [3]:

- *High Voltage Direct Current* (HVDC) – permite uma maior estabilidade da corrente direta (DC) nas redes de transmissão de energia;
- *Flexible AC Transmission Systems* (FACTS) – permite controlar o trânsito de energia entre redes de corrente alternada (AC) distintas;
- Filtro ativo de potência – permite uma filtragem das harmónicas presentes na rede;
- Disjuntor eletrónico – permite a proteção dos equipamentos que constituem a rede, na ocorrência de falhas ou defeitos, com tempos de atuação muito menores que os disjuntores mecânicos tradicionais.

Estes sistemas eletrónicos de potência tornam assim possível o controlo do fluxo de energia elétrica numa ampla gama de condições e permitem ainda melhorar a Qualidade de Energia Elétrica (QEE). Os mesmos ainda tornam possível a implementação do conceito amplamente discutido de redes inteligentes, onde as tecnologias de informação e comunicação são aplicadas ao planeamento e operação das redes de distribuição [4], tendo estas tecnologias um papel muito importante para a correta operação deste tipo de redes.

Adicionalmente aos equipamentos supramencionados, existe ainda o Transformador Inteligente, *Smart Transformer* (ST), que é também baseado em conversores eletrónicos de potência, mas que ainda não se encontra no mercado por estar em fase de estudo. De destacar que este equipamento será o alvo de análise desta tese.

O ST tem a capacidade de gerir não só os fluxos de energia, como também os fluxos de comunicação, podendo assim resolver os desafios do atual sistema da rede de distribuição. Contudo, o ST terá de competir em termos de baixo preço, alta eficiência e alta viabilidade para conseguir entrar no mercado.

Não obstante, a aplicabilidade de um ST poderá ficar comprometida com as variações de temperatura dos semicondutores, fruto dos perfis de energia altamente dinâmicos e contingências frequentes, tais como falhas e rápidas variações da corrente, que caracterizam a atual rede de distribuição [5]. Por forma a ultrapassar esta limitação, utiliza-se a arquitetura modular no ST para (i) possibilitar a implementação de um controlo térmico ativo, a fim de controlar a variação de temperatura de cada semiconductor, e (ii) encaminhar internamente os fluxos de energia, de modo a que o transformador não deixe de estar operacional caso algum dos semicondutores avarie devido a alguma falha, como por exemplo, por um aumento súbito da temperatura [6].

Algumas vantagens do ST são a possibilidade de ter disponível várias conexões DC e a capacidade de mitigar harmónicas ao mesmo tempo, tornando possível alimentar diferentes cargas DC e AC com diferentes frequências [7]. De salientar que estas e outras vantagens do ST serão apresentadas no decorrer da dissertação.

Importa salientar que as centrais elétricas convencionais e renováveis podem ser geridas eficientemente com o uso de ST, permitindo que as cargas inteligentes possam ser comandadas a ligar num momento específico tendo conta o custo de energia, maximizando o equilíbrio procura-resposta [8].

Em suma, as vantagens que o ST oferece faz com que seja um componente importante na rede de distribuição. Por esta razão, o ST foi escolhido como alvo de análise desta tese pois prevê-se que esta tecnologia seja a chave para o desenvolvimento da rede de distribuição, potenciando a introdução de novas tecnologias, como por exemplo, as redes inteligentes.

## **1.2. Objetivos**

Com esta dissertação pretende-se estudar os efeitos do ST na rede de distribuição de modo a que seja possível colmatar as falhas que foram apresentadas na secção 1.1. Assim, os objetivos principais desta tese são:

- Desenvolver um modelo simplificado do ST;
- Projetar controladores para o ST;
- Simular a rede de distribuição AC com o ST.

## **1.3. Estrutura da dissertação**

A presente tese é composta por cinco capítulos sendo o conteúdo de cada um apresentado de seguida.

No primeiro capítulo é apresentado o enquadramento da dissertação, onde são descritas algumas das razões que motivaram a escolha do ST para ser utilizado na rede de distribuição AC, e especificado os objetivos e a estrutura de toda a dissertação.

No segundo capítulo é feita uma análise do estado da arte do ST, onde se começou por explicar a sua origem histórica. De seguida, é realizada a análise teórica do ST, nomeadamente (i) a arquitetura, (ii) a estrutura de controlo e serviços da rede, (iii) a comparação do ST com os transformadores tradicionais e (iv) as infraestruturas de comunicação. Por fim, é realizada uma análise das possíveis topologias de conversores usadas para cada estágio de conversão do ST.

No terceiro capítulo é apresentado o sistema de ST proposto para ser aplicado na rede de distribuição, onde são abordadas as metodologias escolhidas para o programa de simulação. Para tal, é apresentado (i) o esquema simplificado do ST, (ii) as técnicas de modulação, (iii) o dimensionamento dos filtros, (iv) o dimensionamento dos controladores e, por fim, (v) a rede MT e BT.

No quarto capítulo são apresentados os resultados da simulação de todo o sistema e a sua discussão. Assim, foram vários os cenários de funcionamento simulados para o ST na rede de distribuição, dentro dos quais (i) o funcionamento do ST em condições normais de operação de ambas as redes, (ii) a presença de cavas e sobre tensões na rede de média tensão (MT), (iii) a variação da frequência da rede de baixa tensão (BT), e (iv) o desacoplamento da potência reativa entre cada terminal do ST.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões e sugeridas algumas melhorias a efetuar em futuras dissertações sobre estas matérias.

# 2

## Revisão do Estado da Arte

Neste capítulo serão abordados os principais conceitos necessários para o desenvolvimento da tese. Em primeiro, será explicada a origem do ST. De seguida, será realizada a análise teórica do ST, nomeadamente (i) a arquitetura, (ii) a estrutura de controlo e serviços da rede de distribuição que o ST consegue proporcionar, (iii) a comparação do ST com os transformadores tradicionais, (iv) as infraestruturas de comunicação e (v) as possíveis topologias de conversores usadas para cada estágio de conversão do ST.

### Conteúdo

---

- 2.1. A origem do Transformador Inteligente**
- 2.2. Fluxos de um Transformador Inteligente**
- 2.3. Arquitetura do Transformador Inteligente**
- 2.4. Estrutura de controlo**
- 2.5. Conversores para os estágios de energia**

## 2.1. A origem do Transformador Inteligente

Em 1968, McMurray criou o *Solid-State Transformer* (SST) [9], que era baseado em semicondutores eletrónicos de potência.

A verdadeira aplicação do SST surgiu apenas na década de 90, para aplicação em sistemas de tração, como os comboios, de modo a garantir que os transformadores fossem menos volumosos e menos pesados. De facto, o SST proporcionava uma redução do volume e do peso em cerca de 20% a 50% e um aumento da eficiência em cerca de 93% a 96%. Contudo, este transformador nunca chegou a ser produzido industrialmente porque o ganho marginal em termos de volume e peso foi reduzido com o aumento da frequência de operação da rede de distribuição de 16,6 Hz para 50 Hz [10].

Sem prejuízo dos benefícios supramencionados, os principais problemas encontrados na aplicação do SST no sistema de tração são o facto dos ganhos no hardware serem apenas em termos de volume e peso, conforme se verifica na Figura 2.1, e a adição limitada de outras funcionalidades [10].

Contudo, os ganhos do uso do SST nos sistemas de distribuição são muito maiores do que os ganhos no sistema de tração, pois é facilitador de funcionalidades inteligentes. Na realidade, o SST pode substituir o transformador de baixa frequência, permitindo a conexão entre a rede MT e a rede BT, bem como oferecer conectividade DC e serviços de rede nos lados de MT e BT. Neste caso, ao contrário do sistema de tração, cujos requisitos mais importantes são o peso e o volume, os requisitos primários para o SST no sistema de distribuição são a eficiência e a fiabilidade, conforme se verifica na Figura 2.1, pois não é tolerável que haja interrupção de fornecimento de Energia Elétrica, nem que haja elevadas perdas [10].

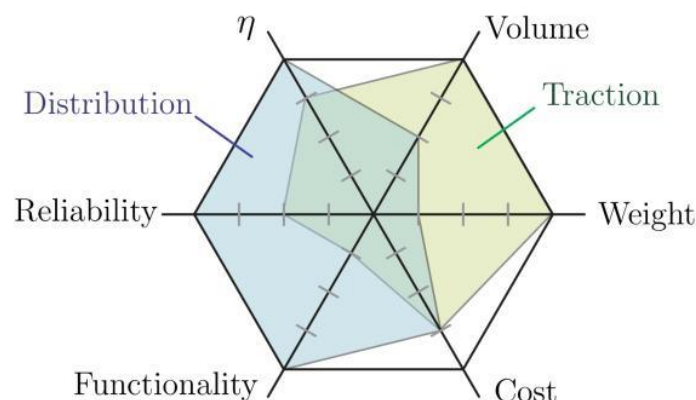


Figura 2.1: Requisitos para o SST em sistemas de tração e de distribuição [10]

A introdução de novas funcionalidades no SST, nomeadamente de controlo e comunicação, tornou este transformador inteligente, dando origem ao ST.



## 2.2. Fluxos de um Transformador Inteligente

O ST tem a capacidade de comunicar com as várias redes locais, sendo que o fluxo de informação pode ser realizado em ambas as direções, ou seja, tanto do transformador para a rede, como da rede para o transformador. Por esta razão, o ST é uma boa opção para mitigar ou solucionar problemas de rede.

A imagem seguinte afigura o modo de funcionamento do ST na rede de distribuição, podendo observar-se os dois tipos de fluxos que o ST tem a capacidade de gerir: a vermelho o fluxo de energia e a azul o fluxo de comunicação. Para além dos fluxos, observam-se também os vários tipos de serviços que o ST consegue fornecer à rede, sendo neste caso evidenciado os serviços à indústria, aos hospitais, às casas inteligentes, aos sistemas de energia renováveis, às centrais de energia convencionais e aos sistemas de armazenamento de energia.

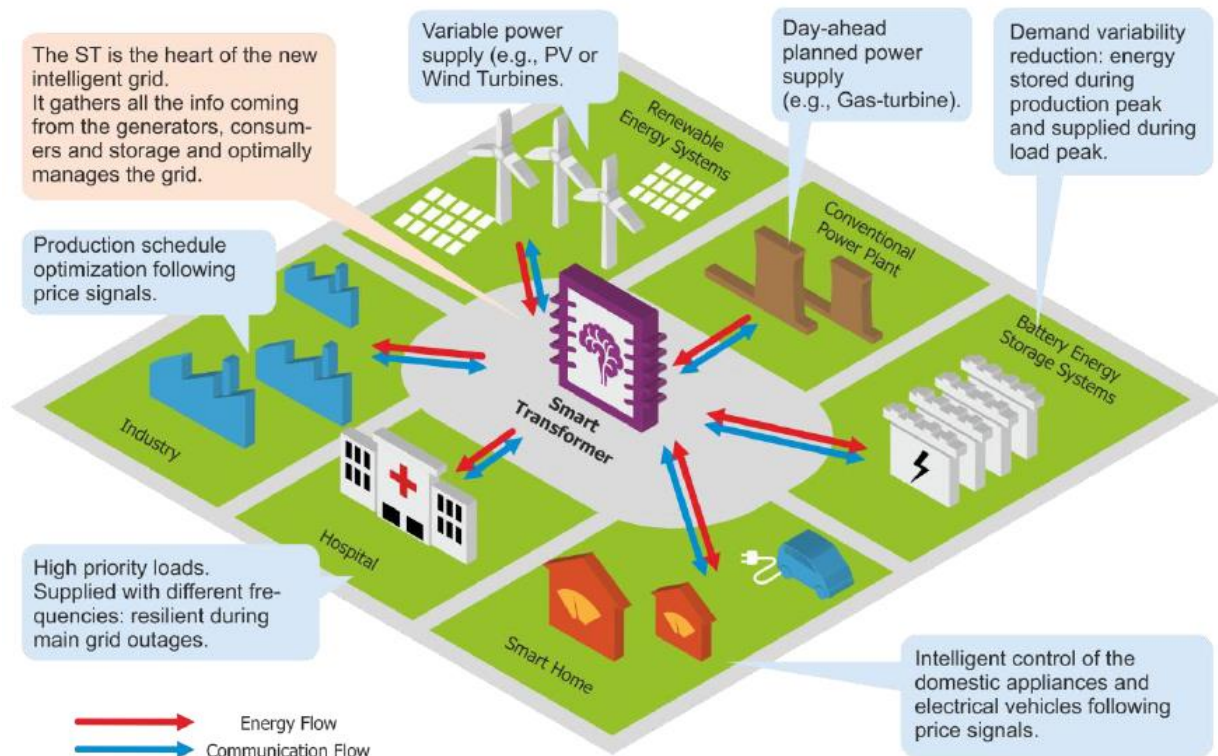


Figura 2.2: O papel de um Transformador Inteligente na rede de distribuição [10]

## 2.3. Arquitetura do Transformador Inteligente

Existem três tipos de arquiteturas para o ST, que não só variam em número de estágios de conversão, como também têm em conta a eficiência, a fiabilidade e as funcionalidades adicionais do ST.

As arquiteturas, bem como as respetivas características, encontram-se descritas abaixo:

- Arquitetura de 1 estágio (MT-AC / BT-AC) e arquitetura de 2 estágios (MT-AC / MT-DC / BT-AC):
  - Número reduzido de componentes;
  - Perturbações num lado do ST podem também afetar o outro lado;
  - Não permite a integração de redes BT DC;
- Arquitetura de 3 estágios (MT-AC / MT-DC / BT-DC / BT-AC):
  - Conexões DC em ambos os lados;
  - Realiza três estágios de conversão (AC-DC, DC-DC, DC-AC), tal como ilustrado na Figura 2.3;
  - Possui mais funcionalidades, tais como o uso direto de fontes renováveis DC;
  - Composto por: *active rectifier*, *isolated DC-DC* e um inversor.

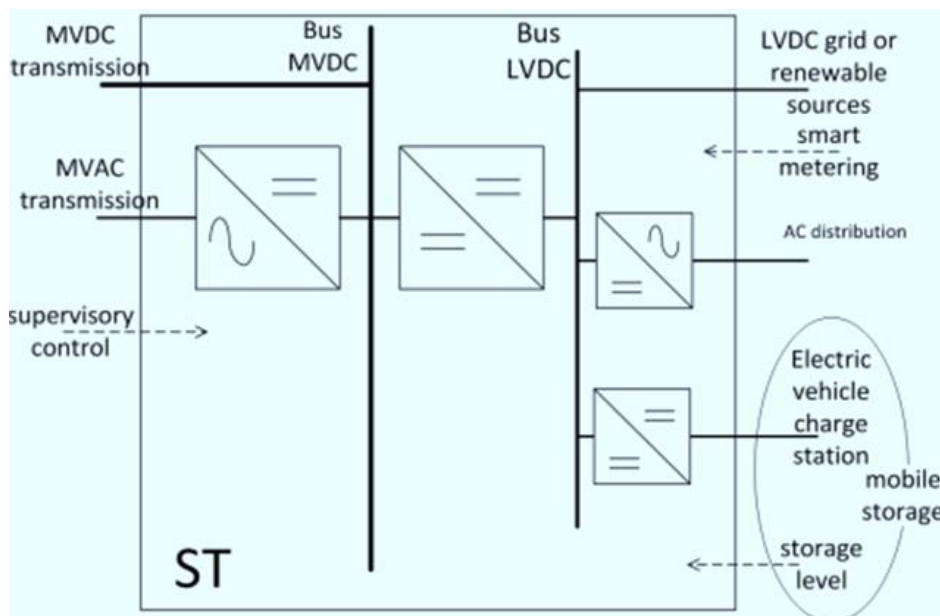


Figura 2.3: Diagrama de blocos de um conversor de três estágios [15]

Para realizar a simulação será utilizada a arquitetura de três estágios de conversão pois, para além de todas as vantagens acima mencionadas, é a única que torna possível a conectividade DC de BT.

### 2.3.1. Grau de modularidade da arquitetura 3

Tendo em conta a arquitetura de 3 estágios para o ST, é necessário escolher a sua modularidade, entre uma arquitetura modular ou não-modular.

A arquitetura modular é baseada na utilização de vários módulos de baixa-tensão/corrente, que são usados como um único bloco de construção do sistema inteiro. Para além desta modularidade apresentar uma eficiência muito elevada [10], a tensão e a potência do ST são facilmente escaláveis,

o que faz com que, caso se queira aumentar estes parâmetros, basta adicionar mais módulos ao sistema. Pelo contrário, se se desejar baixar a potência, basta desconectar os módulos suficientes até se atingir o valor desejado. Para além destas características, a arquitetura modular permite também implementar estratégias de manutenção e tolerância a falhas ou, por outras palavras, o transformador pode continuar a trabalhar caso algum dos blocos falhe ou avarie, [10]. Tal acontece devido ao facto de os transformadores serem normalmente construídos com mais módulos do que os necessários para o seu correto funcionamento. Assim, caso haja falha de algum dos módulos, basta mudar esse bloco durante a manutenção do equipamento, sendo que até esta mudança ocorrer, o transformador pode continuar a operar normalmente.

Por sua vez, a arquitetura não-modular é baseada numa única estrutura que representa o sistema no seu todo. A vantagem deste tipo de modularidade é o uso de um menor número de semicondutores, circuitos de disparo e sensores e a utilização de um único transformador. No entanto, tais características não são tão vantajosas quanto as características da arquitetura modular [10].

Em suma, devido às propriedades e benefícios apresentados anteriormente, percebe-se que a arquitetura modular é a opção que mais vantagens traz para a operação do ST e, por isso, deverá ser a escolhida quando se pretende implementar um ST na conexão da rede de MT e de BT.

## 2.4. Estrutura de controlo

O ST de 3 estágios pode oferecer vários serviços para as redes de MT DC e AC e ainda para as micro redes de BT DC e AC, sendo que a estrutura de controlo do ST, observada na Figura 2.4, pode ser dividida em três patamares:

- Camada 1, onde estão os serviços de rede;
- Camada 2, onde estão algumas funcionalidades básicas de controlo que permitem o correto funcionamento do sistema;
- Camada 3, onde se situa o controlo ativo da temperatura, que permite controlar a temperatura dos semicondutores dependendo das condições de operação do sistema. Assim, é possível reduzir o stress térmico dos semicondutores que têm a sua temperatura demasiado elevada, colocando estes em *standby* até que a sua temperatura seja reduzida. Deste modo, torna-se possível evitar falhas no sistema decorrentes de elevadas temperaturas nos semicondutores.

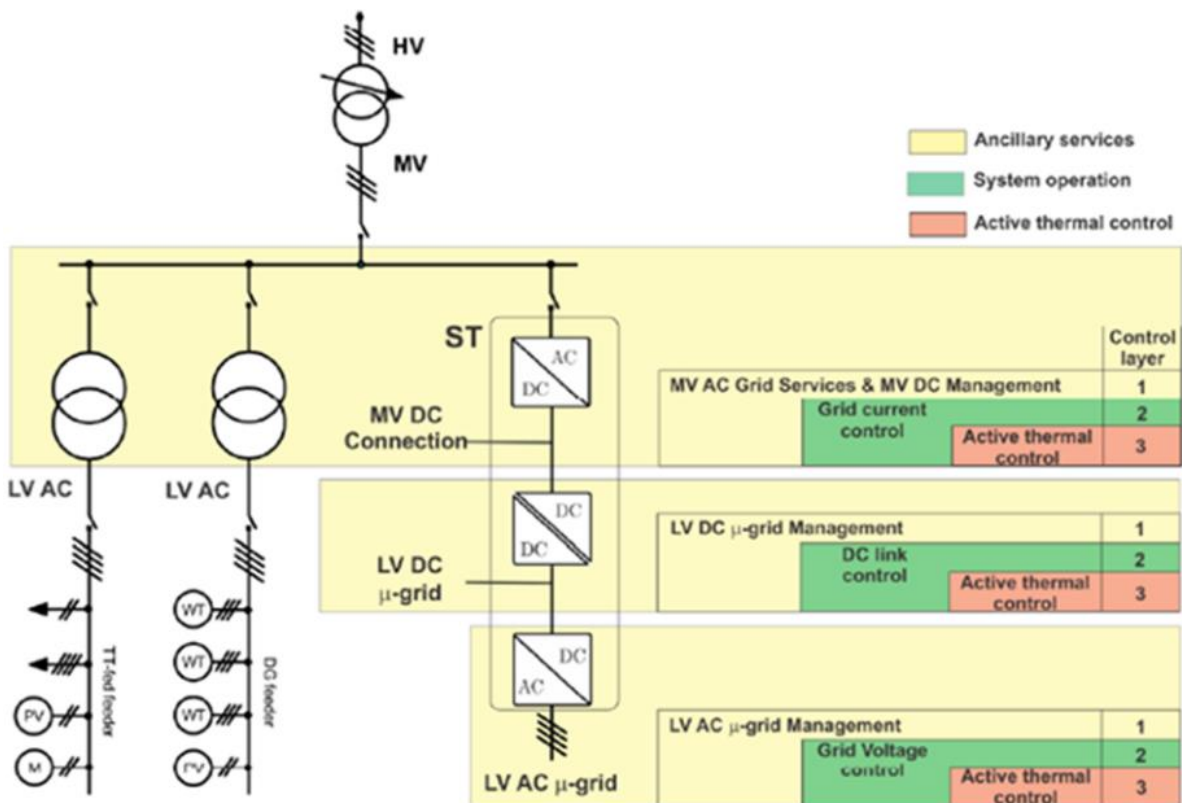


Figura 2.4: Controle e serviços auxiliares do Transformador Inteligente [10].

De seguida, na parte A, as camadas 1 e 2 da estrutura de controlo serão alvo de análise. Posteriormente, na parte B, serão discutidas as infraestruturas de comunicação, das quais o sistema do ST está dependente para que as camadas 1 e 2 consigam operar corretamente.

### 2.4.1. Parte A - Serviços da rede

Desde a possibilidade de conectividade DC, até à possibilidade de controlar as tensões e as frequências na rede de MT e BT, que possibilita a distribuição flexível e robusta, são várias as funcionalidades que tornam a aplicabilidade do ST muito interessante na rede de distribuição. Algumas dessas funções são descritas de seguida.

Sabe-se que o ST tem a capacidade de controlar a corrente absorvida da rede de MT, por forma a satisfazer a potência ativa necessária para a carga no lado de BT, tendo sempre em consideração as perdas ocorridas durante o processo. Deste modo, um aspeto a ter em consideração é o facto do transformador conseguir variar a tensão a ser convertida de modo a apenas transformar a energia necessária para a rede BT, ou seja, o ST consegue controlar a tensão na rede de BT, tornando-se mais flexível do que os transformadores atualmente usados.

Por outro lado, a potência reativa representa um grau de liberdade para o ST, ou seja, esta tem a possibilidade de ser controlada individualmente em cada fase [11]. Adicionalmente, a potência reativa pode ser desacoplada entre cada terminal devido à presença de barramentos DC. Com esta característica, é possível obter várias funções, desde trabalhar com um fator de potência unitário na

ligação à rede MT, até ter compensação de harmónicas e suporte de tensão no lado de MT. Adicionalmente, com os seus controlos avançados, consegue (i) suportar tensões na rede de MT em condições críticas, injetando ou absorvendo potência reativa, e (ii) resolver problemas na rede de BT, atuando em cada uma das fases individualmente. Importa salientar que, estando a potência reativa isolada entre cada terminal, evita-se que o lado de BT absorva a potência reativa do lado de MT e, conseqüentemente, evita corresponder os efeitos do lado de BT no lado de MT na redução direta da tensão.

Caso haja harmónicas elevadas, o ST funciona como um filtro ativo, reduzindo ou eliminando as harmónicas enviadas pelo transformador HV/MT na rede de MT, e, conseqüentemente, consegue melhorar a qualidade da energia na rede de distribuição MT.

Além disso, independentemente da carga conectada, o ST tem a capacidade de gerar tensões trifásicas sinusoidais e balanceadas ao nível da subestação na rede de BT. O ST possui também a capacidade de controlar a tensão e a frequência da rede e, assim, interagir com a tensão das cargas e dos geradores. De facto, esta característica é deveras importante, em especial quando um gerador produz mais energia do que a consumida pela rede de BT. Nesta situação, o excesso de energia seria revertido para a rede de MT, aumentando assim o valor da respetiva tensão. Usando um ST, é possível interagir com o gerador, aumentando a frequência da rede [12] e, assim, diminuir a produção de energia do gerador, evitando o fluxo de energia reverso para a rede de MT.

Por outro lado, o ST compara positivamente com os transformadores tradicionais, usados atualmente na rede de distribuição, cuja comparação é apresentada na Tabela 2.1. Para tal, o ST foi comparado com os seguintes transformadores tradicionais:

- Transformador com *off load tap changer*: este é o transformador mais comum na rede de distribuição, constituído por um núcleo de ferro com enrolamentos em cobre. De notar que, para trocar as tomadas deste transformador, é necessário desligar primeiramente a carga, tal como o seu próprio nome indica;
- Transformador com *on load tap changer*: este é composto, entre outras, por componentes eletrónicos de potência. Com este transformador não é necessário desligar a carga para que se mudem as tomadas. Contudo, é importante salientar que este é um processo moroso.

Tabela 2.1: Comparação do Transformador Inteligente com transformadores tradicionais

Características	Transformador tradicional com <i>off load tap changer</i>	Transformador tradicional com <i>on load tap changer</i>	ST
Volume e peso	Maior	Maior	Menor
Redução das perdas da rede	Parcialmente	Sim	Sim
Melhoramento na introdução de sistemas EV / PV	Parcialmente	Parcialmente	Sim
Eliminar harmónicas da tensão	Não	Não	Sim
Redução do desequilíbrio entre as 3 fases da tensão	Parcialmente	Parcialmente	Sim
Atenuar a flutuação da tensão	Não	Parcialmente	Sim
Capacidade de isolamento das falhas	Não	Não	Sim
Fiabilidade no fornecimento de energia	Não	Não	Sim

## 2.4.2. Parte B - Infraestrutura de comunicação

Um ST implementado na rede de distribuição comporta-se como um “cérebro”, que não só gere e otimiza o fluxo de energia da rede, como também regula o fluxo de informação entre a rede local e o centro de dados, que será analisada de seguida.

A norma IEEE 2030 define que existem três hierarquias de rede: (i) as *Private Networks*, relacionadas com as propriedades do consumidor; (ii) as *Wide Area Networks*, relacionadas com o domínio da distribuição; e (iii) as *Core Networks*, relacionadas com a geração e transmissão de energia. Em muitas aplicações, o ST está situado no domínio da distribuição, facilitando a regulação das *Wide Area Networks* e a troca de informação entre utilidade e consumidores [10].

A maioria das tecnologias de comunicação usadas nas redes inteligentes pode ser aplicada quando se pretende utilizar um ST na rede de distribuição, sendo que dependerão sempre das arquiteturas de comunicação e dos cenários de controlo onde vão ser aplicadas [13].

O fluxo de informação do ST na rede de distribuição pode ser definido em três tipos:

- O primeiro fluxo, entre os diferentes sistemas de distribuição;
- O segundo fluxo, entre o ST e os sistemas elétricos locais;
- O terceiro fluxo, entre o ST e os centros de informação, ou entre dois ST diferentes, caso existam múltiplos ST aplicados na mesma rede.

A Figura 2.5 apresenta diversas tecnologias de comunicação, bem como as respetivas características, tendo em conta o tipo de rede a ser utilizada.

Technology	Standard	Data Rate	Distance	Network
PLC	Ultra Narrow Band (UNB)-PLC	100 bps	150 km or more	core network
	Narrow Band (NB)-PLC	10-500 kbps	10 km or more	wide area network
	Broad Band (BB)-PLC	1-200 Mbps	1 km	private network
DSL	High-bit-rate DSL (HDSL)	1.5-2 Mbps	1.6-18 km	private/wide area network
	Asymmetric DSL (ADSL)	1.5-24 Mbps down/ 0.5-3.5 Mbps up	up to 5.5 km	private network
	Symmetric DSL (SDSL)	256 kbps-2.3 Mbps	up to 3 km	private network
	Very-high-bit-rate DSL (VDSL)	55-100 Mbps down/ 3-100 Mbps up	300m	private network
Wireless Mesh	IEEE 802.11	6-54 Mbps	0.1-5 km	private/wide area network
	IEEE 802.15	11 Mbps-5.3 Gbps	20-100m	private network
Cellular	2.5G	40-500 kbps down/ 9.6-42.8 kbps up	up to 200 km	wide area/core network
	3G	200 kbps-2 Mbps	10-72 km	wide area network
	3.5G	14-337 Mbps down/ 5.76-34 Mbps up	5-20 km	private/wide area network
	4G	100 Mbps-1 Gbps down/ 50-500 Mbps up	3-30 km	private/wide area network

Figura 2.5: Infraestruturas de comunicação: *Private, Wide Area and Core Network* [10]

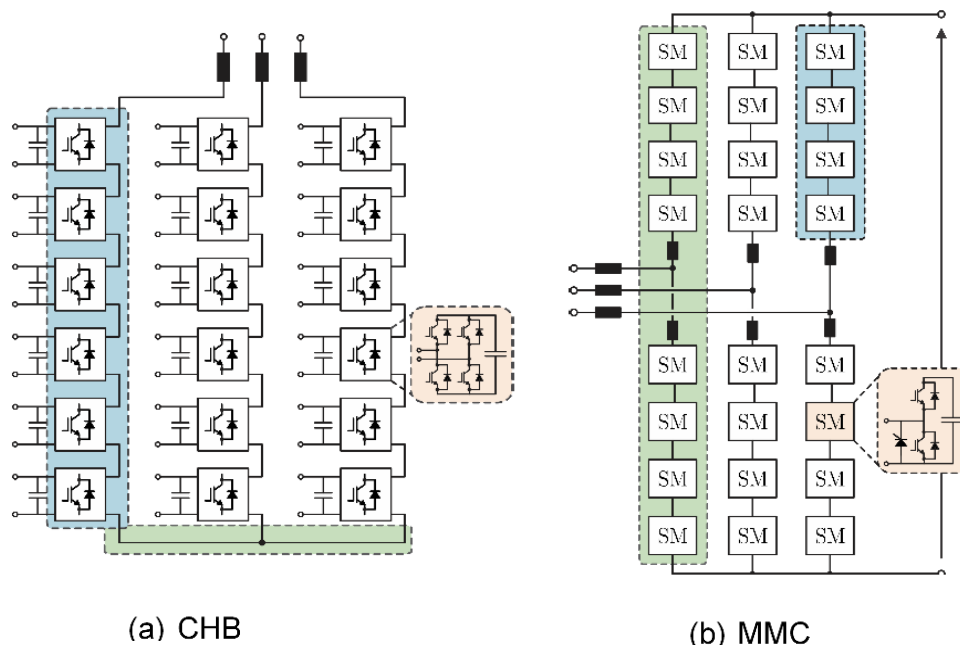
## 2.5. Conversores para os estágios de energia

Esta secção aborda, para cada estágio de conversão, as topologias mais vantajosas a serem utilizadas para cada tipo de conversor que compõe o ST, ou seja, para os conversores de MT, DC/DC e BT.

### 2.5.1. Conversor de média tensão AC/DC

A tarefa principal do conversor de MT é absorver a potência ativa da rede de MT para alimentar o próximo estágio de conversão e, conseqüentemente, alimentar a rede de distribuição de BT. Além disso, tem a capacidade de controlar a potência reativa para os serviços de rede [10].

Existem várias topologias que podem ser usadas para representar o conversor de MT, sendo algumas delas as seguintes: *Cascaded H-bridge* (CHB) e *Modular Multilevel Converter* (MMC). Ambas as topologias podem ser observadas na Figura 2.6.



(a) CHB

(b) MMC

Figura 2.6: Topologias do conversor de média tensão [10]

Conforme se pode observar na figura anterior, ambas as topologias são modulares, o que permite ao conversor rotear a energia interna entre cada módulo, o que, conseqüentemente, possibilita a existência de vários tipos de controlos avançados.

No que respeita ao conversor CHB, a sua modularidade, a baixa complexidade de controlo e a baixa frequência de operação são os aspetos fulcrais que tornam esta topologia uma escolha muito frequente para os conversores de MT. No entanto, esta topologia apresenta algumas desvantagens, tais como necessitar de fornecimento isolado de energia para cada célula e não possuir conexão DC, que é fundamental na aplicação do ST na rede de distribuição.

Por outro lado, o MMC, para além de ser modular e operar a uma baixa frequência, permite a conexão DC, constituindo uma vantagem em comparação com a topologia CHB. Porém, o controlo complexo e a necessidade de condensadores DC com uma capacidade muito elevada constituem um problema para esta topologia.

## 2.5.2. Conversor DC/DC

De todos os conversores utilizados para cada estágio de conversão do ST, o conversor DC/DC é o mais desafiante devido ao facto de este necessitar de ter uma alta potência nominal, uma capacidade de alta tensão no lado MT, uma capacidade alta de corrente no lado BT, uma alta frequência de isolamento e, ainda, uma eficiência elevada.

À semelhança do conversor de MT, existem diferentes tipos de conversores DC/DC, sendo os mais frequentes o conversor *Dual-Active-Bridge* (DAB) e o conversor *Series-Resonant* (SR) devido à respetiva eficiência, densidade de potência e comutação suave.



Em particular, o conversor SR apresenta uma tensão de saída bem regulada para uma ampla variedade de cargas, sem a necessidade de ter malhas de controlo. Contudo, quando é necessário controlar a tensão de saída ou o fluxo de potência, o conversor DAB é o mais vantajoso, visto que este conversor funciona com controlo ativo da potência transferida.

Uma alternativa às duas topologias acima apresentadas é o conversor de *Multiple Active Bridge* (MAB), que possui as mesmas características que o conversor DAB, mas consegue reduzir o número de transformadores de alta frequência [14], uma vez que o conversor MAB usa um único transformador, mas com vários enrolamentos no primário e no secundário.

Na Figura 2.7 podem ser observados os esquemas de cada conversor apresentados anteriormente para representar o conversor DC/DC.

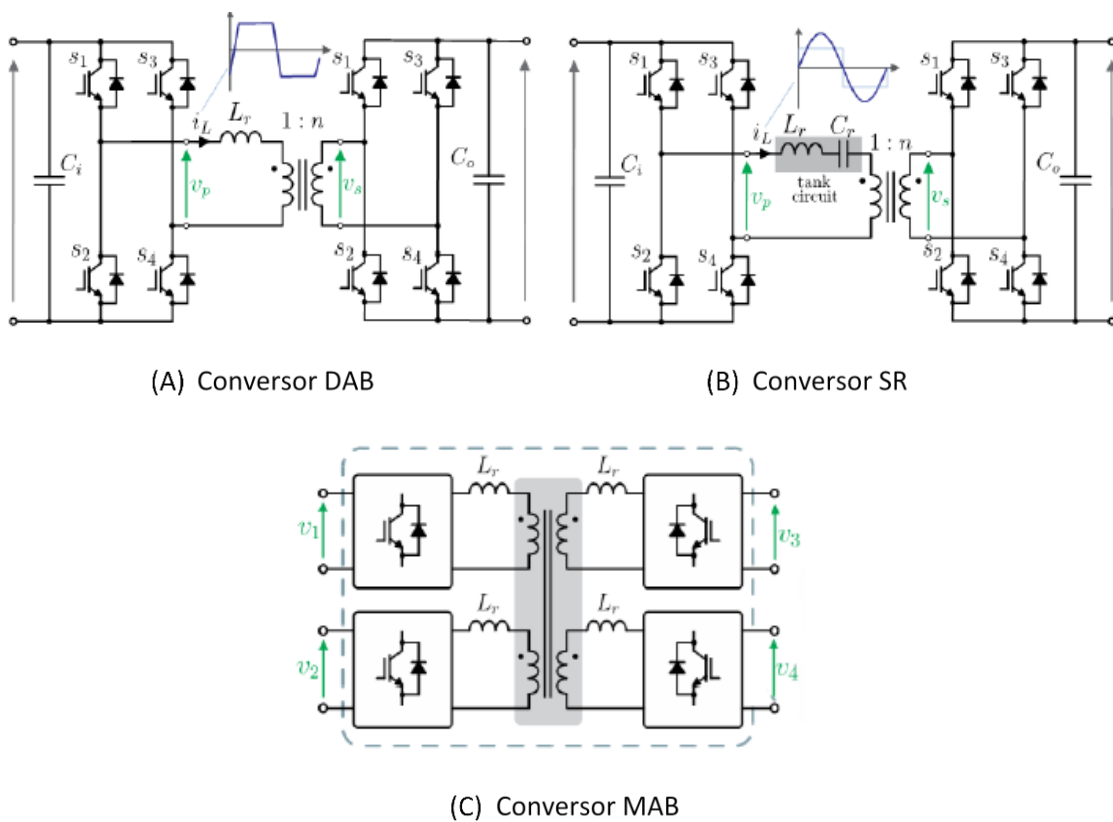


Figura 2.7: Topologias do conversor DC/DC [10]

### 2.5.3. Conversor de baixa tensão DC/AC

O conversor de BT é, de entre todos os conversores usados para cada estágio de conversão, o conversor que suporta correntes mais elevadas e está mais exposto às perturbações da rede de BT.

Existe uma ampla escolha de topologias para este conversor. O requisito principal para a sua escolha é a presença do neutro na sua saída, visto que o objetivo do ST é substituir os transformadores

na rede de distribuição de energia elétrica. Deste modo, o condutor neutro pode ser ligado ao ponto intermédio do andar DC do conversor de BT.

As topologias que apresentam estas características e que, conseqüentemente, são as mais frequentes são: *Half-Bridge* (HB), e *NPC standard* ou *NPC T-Type*, que se afiguram no seguinte esquema.

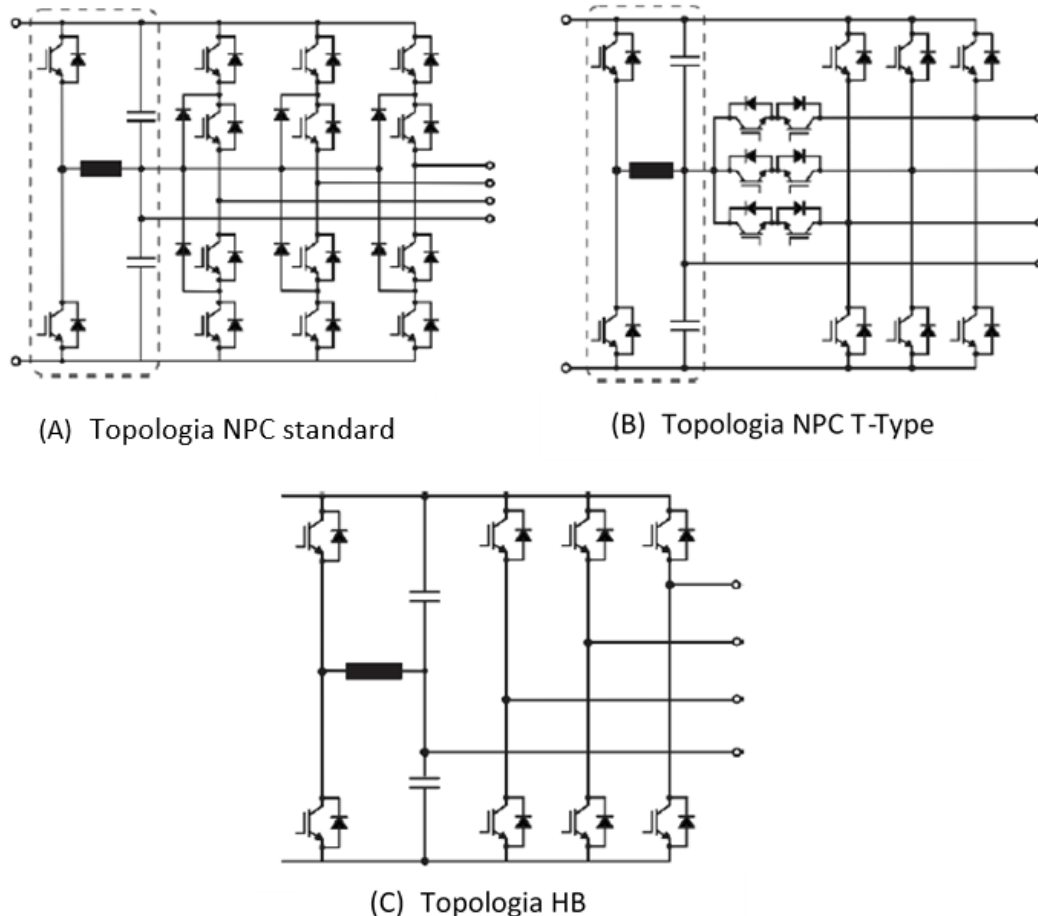


Figura 2.8: Topologias do conversor de baixa tensão [10]

De todas as topologias supramencionadas, a HB é a que apresenta a abordagem mais simples e consolidada. No entanto, a topologia *NPC standard* ou *NPC T-Type* permite usar dispositivos com 600V, bem como melhorar (i) a eficiência do sistema e (ii) a forma de onda de tensão da saída do conversor.

Enquanto um transformador tradicional tem uma grande capacidade de sobrecarga, tanto em termos de potência, como em termos de tempo, os conversores eletrônicos de potência são mais vulneráveis a sobrecargas e, por isso, não as consegue suportar em tempo devido. Visto que a rede de BT está sujeita a grandes variações e o ST encontra-se diretamente ligado à rede de BT, o ST está diretamente exposto aos efeitos desta rede, como por exemplo, correntes de defeito. Por esta razão, é pertinente que haja limitação de corrente, através de controlo da mesma, para que os componentes do ST não sejam danificados.

# 3

## Metodologia

Neste capítulo irão ser abordadas as metodologias escolhidas e as respetivas fórmulas e esquemas para a criação do programa de simulação do ST na rede de distribuição, nomeadamente (i) o esquema simplificado do ST, (ii) as técnicas de modulação, (iii) o dimensionamento dos filtros, (iv) o design dos controladores e, por fim, (v) o design da rede MT e BT.

### Conteúdo

---

- 3.1. Transformador Inteligente**
- 3.2. Técnicas de modulação**
- 3.3. Dimensionamento dos filtros**
- 3.4. Dimensionamento dos controladores**
- 3.5. Rede**

### 3.1. Transformador Inteligente

Devido às vantagens mencionadas na revisão bibliográfica, decidiu-se implementar uma arquitetura de 3 estágios de conversão para simular o ST na ligação á rede de MT e BT.

A escolha entre máquinas trifásicas ou monofásicas foi condicionada pelas vantagens de cada solução, tal como descrito abaixo.

Do ponto de vista financeiro, as máquinas trifásicas são soluções economicamente mais viáveis em termos de aquisição e montagem. Porém, em caso de falhas graves do ST, o custo de substituição ou reparação é mais elevado, o que faz com que as máquinas monofásicas sejam mais vantajosas em intervenções futuras.

Em termos de dimensões e peso, os módulos monofásicos são a melhor opção, pois, em caso de instalações em localizações de difícil acesso, poderá ser a única forma de viabilizar o transporte do equipamento. No entanto, as máquinas trifásicas ocupam menos espaço nas subestações, um fator a ter em conta quando o espaço de instalação não é grande, como, por exemplo, nas cidades.

Tendo em conta os aspetos relevantes de cada solução e a fim de garantir baixas tensões de operação e fluxo de potência bidirecional, o ST proposto (representado na Figura 3.1) usa uma associação de 4 módulos monofásicos em cada uma das três fases, em vez de usar apenas um único conversor trifásico em cada andar de conversão, evitando uma tensão DC muito elevada.

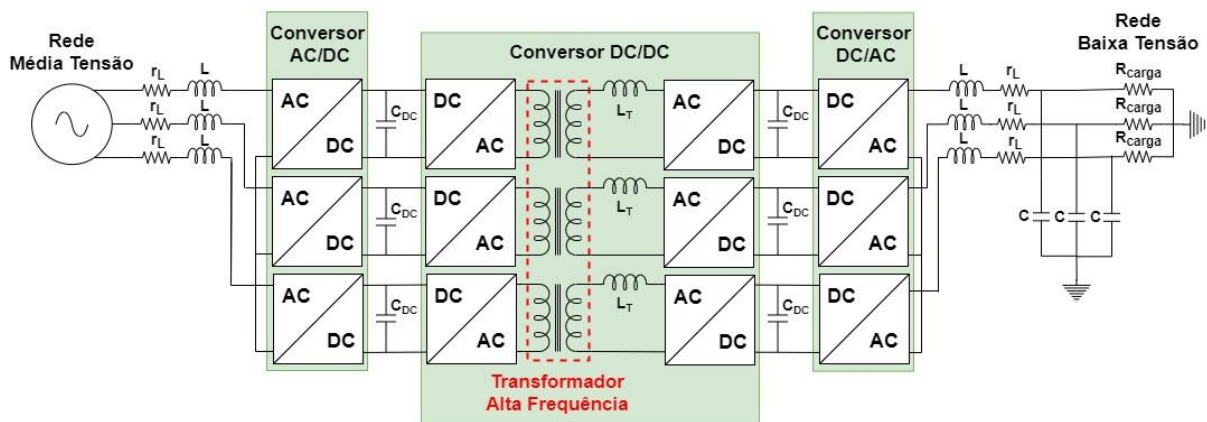


Figura 3.1: Esquema do Transformador Inteligente proposto

Para simular cada conversor monofásico com semicondutores de alta frequência de disparo, usou-se a topologia *H-bridge*, também denominada por *Full-bridge* (representada na Figura 3.2), com transístores bipolares de porta isolada (IGBT) e díodos ligados em anti paralelo. Para tal, recorreu-se ao bloco *Full-Bridge Converter* do programa de simulação do *Matlab (Simulink)*, que pode ser observado na Figura 3.3. Importante realçar que decidiu-se utilizar esta topologia pois o conversor poderá ser operado tanto como retificador (conversão de AC para DC), como inversor (conversão de DC para AC). Através da tabela apresentada na Figura 3.2, é possível perceber que esta topologia apresenta 3 níveis de tensão na sua saída ( $V_{AC}$ ):  $-V_{DC}$ , 0 e  $V_{DC}$ .

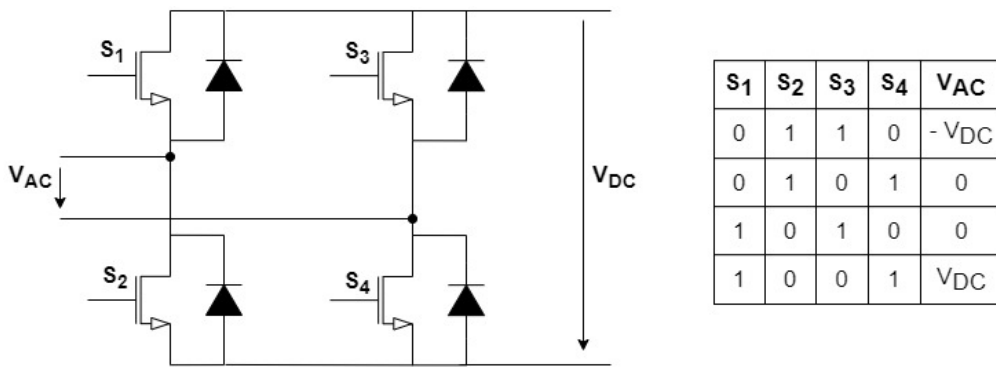


Figura 3.2: Conversor H-bridge e a respetiva tabela com as possíveis combinações de disparo para os semicondutores

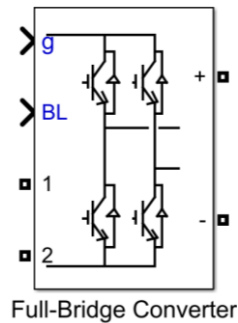


Figura 3.3: Bloco do conversor H-bridge do programa de simulação Simulink

Analisando o bloco representado pela Figura 3.3, enquanto as entradas/saídas 1 e 2 são do lado AC do conversor, as entradas/saídas + e - são do lado DC do conversor. Em relação aos sinais de entrada BL e g, ambos são de controlo. O sinal BL é um sinal de bloqueio dos pulsos dos semicondutores, ou seja, se BL for igual a um, os pulsos são bloqueados e o conversor deixa de operar, enquanto o sinal de entrada g é o sinal de controlo do conversor que contém os pulsos de disparo para os interruptores de cada módulo de conversão.

Para garantir isolamento galvânico e um baixo volume do ST, o conversor DC/DC utiliza um transformador de alta frequência em cada uma das fases do ST. Na Figura 3.4 é possível observar a topologia DAB usada para o segundo andar de conversão, onde o transformador de alta frequência conecta os dois conversores H-bridge e onde a reatância de dispersão  $L_T$  representa a soma da reatância de dispersão do lado secundário,  $L_S$ , com a do lado primário,  $L_p$ , do transformador [18].

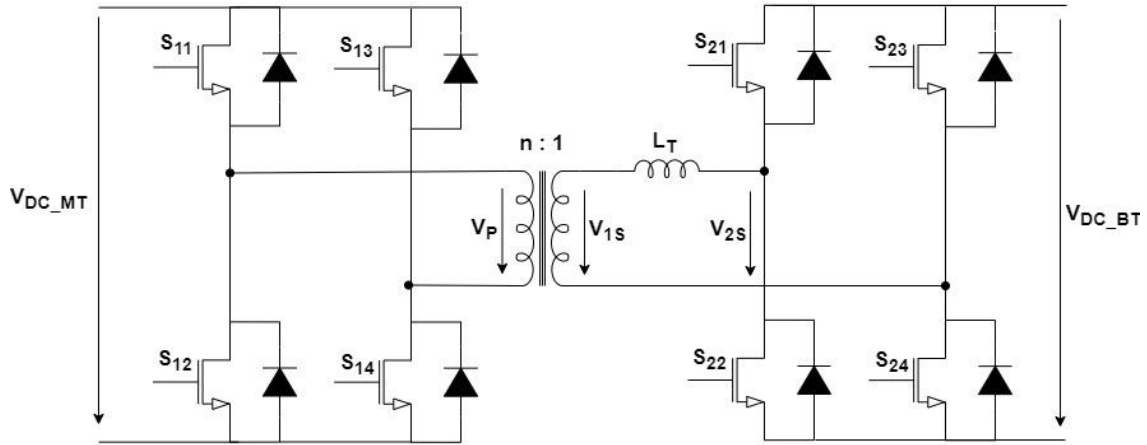


Figura 3.4: Configuração do conversor DC/DC com a topologia DAB

Tendo em conta os sinais da Figura 3.4, o conversor *Full-bridge* do lado MT gera um sinal quadrado,  $V_p$ , com amplitude  $V_{DC\_MT}$  e com um fator de ciclo de 50%, ao mesmo tempo que o conversor *Full-bridge* do lado BT irá controlar o fluxo de energia entre a tensão  $V_{DC\_MT}$  e  $V_{DC\_BT}$  gerando um sinal quadrado,  $V_{2S}$ , com um fator de ciclo de 50% e desfasado  $\delta$  em relação a  $V_{1S}$  [18].

O fluxo de potência médio do conversor DAB pode ser escrito através da seguinte fórmula [18]

$$P_{DAB} = \frac{V_p \cdot V_{2S}}{2\pi^2 n f_s L_T} \delta(\pi - \delta) \quad (3.1)$$

onde a potência máxima transferida pelo conversor DAB é alcançada quando o desfasamento entre as tensões  $V_{1S}$  e  $V_{2S}$  é  $\pi/2$ . Através da Figura 3.5, é possível observar a resposta da potência transferida pelo andar DC/DC,  $P_{DAB}$ , em função do respetivo desfasamento.

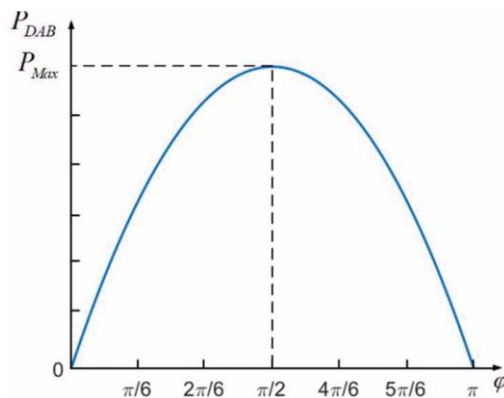


Figura 3.5: Potência transferida do conversor DC/DC em função do desfasamento [18]

Por dedução da fórmula (3.1), a reatância de dispersão  $L_T$  é dada por

$$L_T = \frac{V_p \cdot V_{2S}}{2\pi^2 n f_s P_0} \delta(\pi - \delta) \quad (3.2)$$

sendo que,

- $V_P$  e  $V_{2S}$  são as tensões observadas na Figura 3.4;
- $\delta$  é o defasamento entre as tensões  $V_{1S}$  e  $V_{2S}$ ;
- $P_0 = \frac{P}{3}$  corresponde à potência monofásica do conversor, sendo  $P = 630 \text{ kVA}$  a potência total do ST;
- $f_s = 10 \text{ kHz}$  é a frequência de comutação dos semicondutores do ST;
- $n = V_P/V_{1S}$  diz respeito ao número de espiras do transformador.

O valor de  $L_T$  obtido no programa de simulação, para cada uma das fases do ST, encontra-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Valor do parâmetro  $L_T$

$L_T (\mu H)$
9,5238

## 3.2. Técnicas de modulação

Para garantir (i) um fator de potência quase unitário, (ii) uma redução da taxa de distorção harmônica e (iii) uma diminuição do valor dos filtros AC, foi usada uma modulação de largura de pulso de três níveis (*three level Pulse Width Modulation*; 3 PWM), para modelar os inversores ligados à rede de MT e BT [17].

Quanto aos conversores ligados ao transformador de alta frequência que constituem o conversor DC/DC, foi utilizada uma modulação de pulso único de alta frequência, de modo a garantir que em cada período de comutação, o valor médio das tensões aplicadas aos transformadores é zero, evitando assim a sua saturação [17].

## 3.3. Dimensionamento dos filtros

Ao realizar-se as conversões de AC para DC e de DC para AC é criado um tremor nas ondas de corrente e de tensão, que não é desejável. Deste modo, para reduzir a taxa de distorção harmônica na corrente e na tensão resultante da comutação dos semicondutores foi necessário recorrer ao uso de filtros, que são compostos por componentes passivos, tais como resistências, bobines e condensadores.

Na Figura 3.6 é ilustrada a localização dos filtros utilizados no ST, para apenas uma das fases, que será explicada em maior detalhe nas secções seguintes.

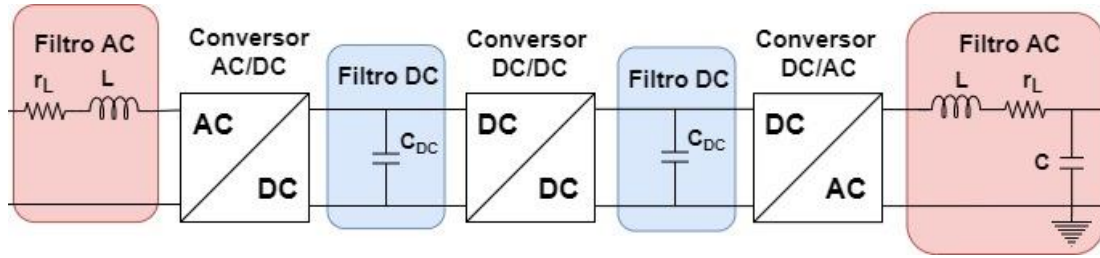


Figura 3.6: Localização dos filtros AC e DC no Transformador Inteligente

### 3.3.1. Filtros AC

De acordo com a Figura 3.6, o filtro AC que se situa à entrada do ST é composto por uma bobine,  $L$ , e uma resistência,  $r_L$ , que representa as perdas da respetiva bobine. O filtro AC à saída do ST é também composto por  $L$  e  $r_L$ , existindo ainda a ligação de um condensador,  $C$ . Não obstante, para efeitos de simulação, decidiu-se não colocar os condensadores no lado MT, visto que o sistema é modular e a taxa de distorção harmónica da corrente AC no lado MT é muito baixa.

A indutância do filtro AC pode ser calculada através da seguinte fórmula [19]

$$L = \frac{U_{DC} \cdot T_s}{2 \cdot (N_m - 1) \cdot \Delta i_L} \quad (3.3)$$

em que,

- $N_m$  é o número de níveis em cada conversor ( $N_m = 3$ );
- $U_{DC}$  corresponde à tensão no lado DC em cada módulo;
- $T_s = \frac{1}{f_s}$  respeita ao período de comutação dos semicondutores;
- O *ripple* é dado por  $\Delta i_L = 2\sqrt{3} \times THD_i \times i_{LRMS}$ , com  $THD_i = 3\%$ , o que representa um tremor de corrente máximo de aproximadamente 10%, em que  $i_{LRMS}$  é o valor monofásico da corrente AC.

Considerando que as perdas das indutâncias de cada fase representam 1% da potência total de cada conversor,  $r_L$  é dado por [16]

$$r_L = 0.01 \frac{P_0}{i_{LRMS}^2} \quad (3.4)$$

, onde  $P_0 = \frac{P}{3}$  é a potência do conversor em cada fase, sendo  $P$  a potência total do ST.

Considerando que se usa uma técnica de modulação de largura de pulso de três níveis (3 PWM) para os conversores BT DC/AC, o valor da capacitância  $C$  é [19]

$$C = \frac{U_{DC} \cdot T_s^2}{32 \cdot L \cdot \Delta V_0} \quad (3.5)$$

tal que,

- $U_{DC}$  é a tensão no lado DC em cada módulo;



- $T_s = \frac{1}{f_s}$  é o período de comutação dos semicondutores;
- $L$  corresponde ao valor da indutância calculada na equação (3.3);
- $\Delta V_0 = 0,02 \cdot V_0$ , onde é imposto um tremor máximo (variação) de 2% da tensão AC monofásica;

Note-se que a aplicação deste tipo de filtro é indicada para conversores onde a frequência de comutação é muito elevada e, portanto, a atenuação deste é suficiente.

Na Tabela 3.2 e na Tabela 3.3 apresentam-se os valores do filtro de entrada e de saída para cada fase, respetivamente, obtidos através das fórmulas acima mencionadas.

Tabela 3.2: Valores do filtro de entrada (lado MT)

$L(mH)$	$r_L(m\Omega)$
66,1375	529,1005

Tabela 3.3: Valores do filtro de saída (lado BT)

$L(\mu H)$	$r_L(\mu\Omega)$	$C(\mu F)$
105,8201	846,5608	255,7481

### 3.3.2. Filtros DC

No que respeita ao filtro DC, a Figura 3.6 revela que é composto por apenas um condensador,  $C_{DC}$ , ligado em paralelo em cada uma das fases entre os 3 andares de conversão. Assim, cada capacitância pode ser calculada por [19]

$$C_{DC} = \frac{P_0}{\omega \cdot U_{DC} \cdot \Delta U_{DC}} \quad (3.6)$$

onde sabemos que,

- $\omega = 2\pi f$  é a frequência angular, onde  $f = 50Hz$  é a frequência da rede;
- $U_{DC}$  diz respeito à tensão DC medida no condensador;
- $\Delta U_{DC} = 0,1 \cdot U_{DC}$ , onde é imposto um tremor máximo de 10% da tensão DC;
- $P_0 = \frac{P}{3}$  é a potência do conversor em cada fase, sendo  $P$  a potência total do ST.

No que diz respeito à simulação, foi necessário impor a tensão inicial do condensador ao valor pretendido, simulando assim o efeito de pré-carregamento dos condensadores antes da operação do ST.

Na Tabela 3.4 encontram-se os valores da capacitância calculada em (3.6) para ambos os lados do ST.

Tabela 3.4: Valores do parâmetro  $C_{DC}$  para o lado MT e BT

$C_{DC}$	
Lado MT ( $\mu F$ )	Lado BT ( $mF$ )
6,8450	41,7781

### 3.4. Dimensionamento dos controladores

Os controladores têm como objetivo realizar os cálculos da malha de controle do sistema, a fim de controlar as correntes e as tensões e, conseqüentemente, o ST, permitindo a sua correta operação na ligação à rede de MT e BT. Por conseguinte, projetaram-se quatro tipos de controladores a fim de estabilizar a corrente AC, a tensão DC, a tensão AC e a corrente DC.

Relativamente à tensão do filtro DC do lado MT, utilizou-se um controlador de tensão DC que originou, na sua saída, a corrente de referência AC para o lado da rede MT. De seguida, a corrente de referência calculada foi usada como sinal de entrada para o controlador de corrente AC do lado MT, onde foi criado um sinal de controle de quatro pulsos. Posteriormente, este sinal foi enviado para os conversores AC/DC do lado MT, de forma a controlar os semicondutores e, assim, estabilizar a tensão DC e a corrente AC do lado MT.

Do mesmo modo, utilizou-se um controlador de tensão AC na rede BT para controlar a tensão AC, que originou, na sua saída, a corrente de referência AC para o lado da rede BT. Esta corrente de referência foi usada como sinal de entrada pelo controlador de corrente AC do lado BT, que criou, na sua saída, um sinal de controle de quatro pulsos. Assim, foi possível controlar os semicondutores dos conversores DC/AC do lado BT, bem como as correntes e as tensões AC da rede BT.

Em relação aos semicondutores do andar DC/DC, começou-se por usar um controlador de tensão DC para estabilizar a tensão DC do lado BT, que calculou a corrente DC de referência para ser posteriormente utilizada como sinal de entrada pelo controlador de corrente DC. De seguida, utilizou-se um controlador da corrente DC, para calcular o desfasamento entre as tensões  $V_{1S}$  e  $V_{2S}$ , observadas na Figura 3.4, e desacoplar o sinal de controle de disparo dos semicondutores do conversor AC/DC do lado de BT, que está ligado ao transformador de alta frequência, do sinal de controle do conversor DC/AC do lado de MT, que também está ligado ao transformador de alta frequência. Importa salientar que, para existir trânsito de energia no ST, o desfasamento terá de ser diferente de zero, tal como observado na Figura 3.5.

Em primeira instância, decidiu-se realizar os controladores em coordenadas  $dq$ . Porém, após a realização de algumas simulações, verificou-se que não seria possível controlar corretamente o ST com estas coordenadas e, por isso, optou-se por realizar todos os controladores em coordenadas  $abc$ . Além disso, decidiu-se também utilizar um controlador de cada tipo em cada uma das fases, de modo a permitir o controle individual de cada uma das três fases do ST.

### 3.4.1. Controlador de corrente AC

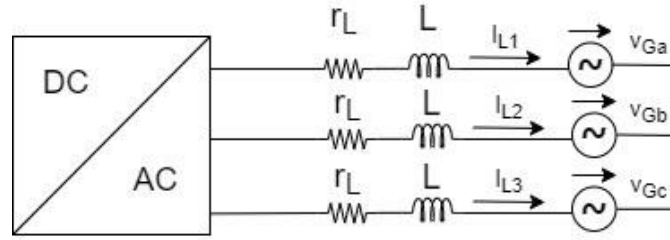


Figura 3.7: Conversor DC/AC e o seu respetivo filtro AC na ligação à rede

Para desenhar o controlador de corrente AC, começou-se por escrever as equações da dinâmica das correntes,  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$  e  $i_{L3}$ , em coordenadas  $dq$ ,  $i_{Ld}$  e  $i_{Lq}$ , através do uso da transformada de *Concordia* e de *Park*, sendo o valor destas sincronizado com o valor das tensões da rede,  $v_{Gd}$  e  $v_{Gq}$ . A dinâmica das correntes são também dependentes das tensões de entrada do PWM,  $v_d$  e  $v_q$ , e dos termos de acoplamento,  $\omega i_{Lq}$  e  $\omega i_{Ld}$  [16]. Assim, as equações da dinâmica das correntes [19] escritas na forma canónica são

$$\begin{cases} \frac{di_{Ld}}{dt} = \frac{v_d}{L} - \frac{r_L}{L} i_{Ld} + \omega i_{Lq} - \frac{v_{Gd}}{L} \\ \frac{di_{Lq}}{dt} = \frac{v_q}{L} - \frac{r_L}{L} i_{Lq} - \omega i_{Ld} - \frac{v_{Gq}}{L} \end{cases} \quad (3.7)$$

De modo a garantir o desacoplamento entre as ações de controlo  $d$  e  $q$ , o sistema de equações (3.7) foi linearizado e foram criadas 2 variáveis auxiliares,  $H_{id}$  e  $H_{iq}$ , tal como pode ser observado na equação (3.8).

$$\begin{cases} \frac{di_{Ld}}{dt} = -\frac{r_L}{L} i_{Ld} + \frac{1}{L} H_{id} \\ \frac{di_{Lq}}{dt} = -\frac{r_L}{L} i_{Lq} + \frac{1}{L} H_{iq} \end{cases}, \text{ onde } \begin{cases} H_{id} = v_d + \omega i_{Lq} - v_{Gd} \\ H_{iq} = v_q - \omega i_{Ld} - v_{Gq} \end{cases} \quad (3.8)$$

Através das equações linearizadas em (3.8), é possível modelar o inversor como uma função de transferência de 1ª ordem,  $G_{inv}(s)$ , em que o seu ganho diferencial,  $K_{di}$ , é unitário e o seu atraso,  $T_{di}$ , depende da frequência de comutação dos conversores,  $T_s = \frac{1}{f_s}$  [19].

$$G_{inv}(s) = \frac{K_{di}}{1 + sT_{di}} \leftrightarrow G_{inv}(s) = \frac{1}{1 + sT_{di}} \quad (3.9)$$

tal que,

$$T_{di} = \frac{T_s}{2} \quad (3.10)$$

De seguida, para garantir um erro estático nulo [17] usou-se um compensador integral proporcional (PI), sendo a sua função transferência dada pela seguinte equação [19]

$$G_{PI}(s) = \frac{sT_{zi} + 1}{sT_{pi}} = \frac{sT_{zi}}{sT_{pi}} + \frac{1}{sT_{pi}} = K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s} \quad (3.11)$$

tal que,

$$K_{pi} = \frac{T_{zi}}{T_{pi}} \quad (3.12)$$

$$K_{ii} = \frac{1}{T_{pi}} \quad (3.13)$$

Note-se que o compensador PI irá depender do ganho proporcional da corrente,  $K_{pi}$ , e do ganho integral da corrente,  $K_{ii}$ , que, por sua vez, irá depender da constante de tempo  $T_{pi}$ . Adicionalmente, como o trânsito de energia é realizado da rede de MT para a rede de BT, a energia está a ser injetada no lado MT do ST e, por isso, os valores dos ganhos apresentados nas equações (3.12) e (3.13) têm de ser negativos para o conversor AC/DC do lado MT.

Considerando o sistema linearizado nas equações (3.8), para desenhar o controlador de corrente é necessário obter a função transferência em malha fechada de todo o sistema de controlo da corrente. Por isso, tendo em conta que o zero do compensador PI na equação (3.11) é coincidente com o polo introduzido pelo filtro da rede, então

$$T_{zi} = \frac{L}{R_T} \quad (3.14)$$

sendo,

- $L$  a bobine do filtro AC;
- $R_T$  a resistência equivalente da rede aos terminais do inversor.

Em suma, o diagrama de blocos do controlador de corrente afigura-se da seguinte maneira [19]

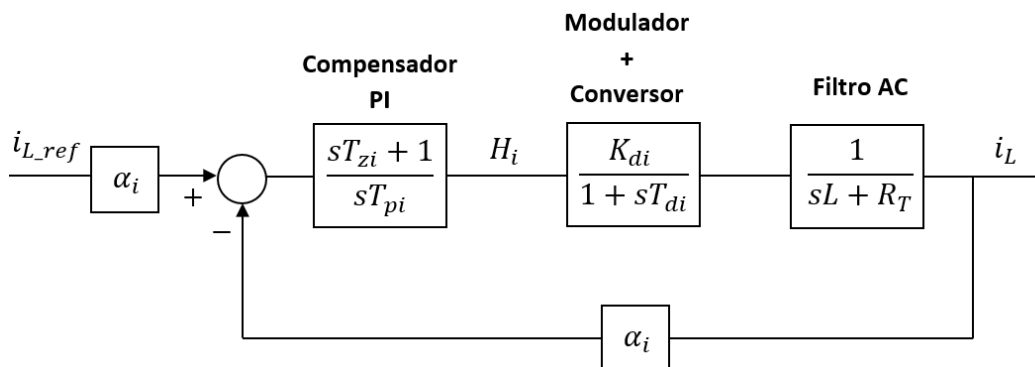


Figura 3.8: Diagrama de blocos simplificado do controlador de corrente AC

onde  $\alpha_i$  representa o ganho do sensor de corrente. Deste modo, a função de transferência em malha fechada é apresentada na equação (3.15) [19].

$$\frac{i_L(s)}{i_{L.ref}(s)} = \frac{\frac{\alpha_i K_{di}}{T_{di} T_{pi} R_T}}{s^2 + s \frac{1}{T_{di}} + \frac{\alpha_i K_{di}}{T_{di} T_{pi} R_T}} \quad (3.15)$$

Por fim, comparando o denominador da equação (3.15) com o denominador da função transferência de 2ª ordem escrita na forma canônica (3.16), é possível obter o valor de  $T_{pi}$  (3.17), considerando um fator de amortecimento de  $\xi = \sqrt{2}/2$  [19].

$$G_2(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.16)$$

$$T_{pi} = \frac{4 \cdot \xi^2 \cdot \alpha_i \cdot T_{di} \cdot K_{di}}{R_T} \leftrightarrow T_{pi} = \frac{2 \cdot \alpha_i \cdot T_{di}}{R_T} \quad (3.17)$$

Na Tabela 3.5 e Tabela 3.6 constam os principais parâmetros do controlador de corrente AC para o lado MT e para o lado BT, respectivamente.

Tabela 3.5: Principais parâmetros do controlador de corrente AC para o lado MT

$T_{di}$ (ms)	$K_{pi}$	$K_{ii}$
50	$-1,3227 \times 10^5$	$-3,1746 \times 10^8$

Tabela 3.6: Principais parâmetros do controlador de corrente AC para o lado BT

$T_{di}$ (ms)	$K_{pi}$	$K_{ii}$
50	211,6402	$5,0793 \times 10^5$

### 3.4.2. Controlador de tensão DC

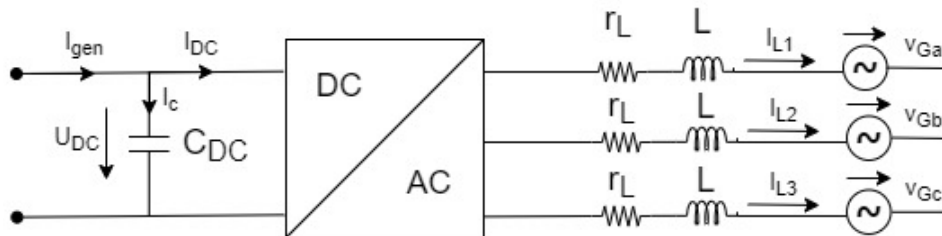


Figura 3.9: Conversor DC/AC e o seu filtro DC e AC

Tendo a corrente AC estabilizada, o conversor e o seu controlador de corrente AC podem ser representados pela seguinte função de transferência [19][20]

$$\frac{i_{DC}(s)}{i_{L\_ref}(s)} \approx \frac{G_i}{\alpha_i} \frac{1}{1 + sT_{dv}} \quad (3.18)$$

sendo que,

- $T_{dv} = 20 \text{ ms}$ ;
- $G_i = V_{AC_{max}} / (2 \cdot U_{DC})$  é o ganho do controlador de corrente em cada uma das fases [20].

Utilizando também um compensador PI, o diagrama de blocos do controlador de tensão DC é representado na Figura 3.10, onde  $\alpha_v$  representa o ganho do sensor de tensão.

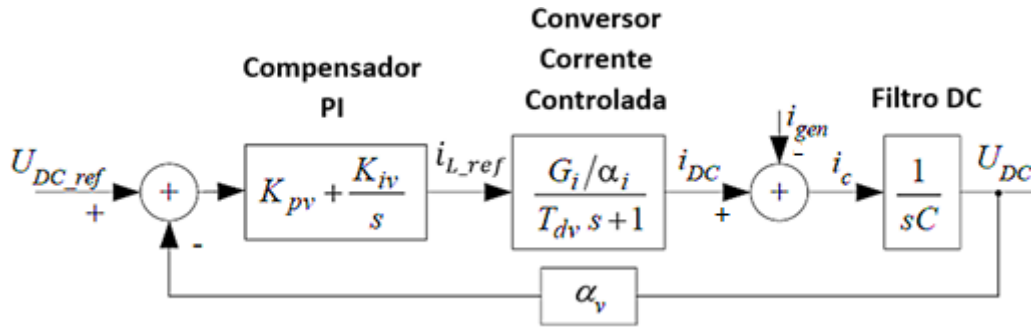


Figura 3.10: Diagrama de blocos simplificado do controlador de tensão DC

Deste modo, a função de transferência em malha fechada do controlador de tensão é [19]

$$\frac{U_{DC}}{U_{DC\_ref}} = \frac{\frac{\alpha_v G_i K_{pv} + s K_{iv}}{\alpha_i T_{dv} C}}{s^3 + s^2 \frac{1}{T_{dv}} + s \frac{\alpha_v G_i K_{pv}}{\alpha_i T_{dv} C} + \frac{\alpha_v G_i K_{iv}}{\alpha_i T_{dv} C}} \quad (3.19)$$

Comparando o denominador da função de transferência em (3.19) com o polinómio de 3º grau escrito na forma canónica na equação (3.20), conseguimos obter o ganho proporcional da tensão,  $K_{pv}$  (3.21), e o ganho integral da tensão,  $K_{iv}$  (3.22), que constituem o bloco PI do controlador de tensão [19].

$$P_3(s) = s^3 + 1.75\omega_0 s^2 + 2.15\omega_0^2 s + \omega_n^3 \quad (3.20)$$

$$K_{pv} = \frac{2.15C\alpha_i}{1.75^2\alpha_v G_i T_{dv}} \quad (3.21)$$

$$K_{iv} = \frac{C\alpha_i}{1.75^3\alpha_v G_i T_{dv}^2} \quad (3.22)$$

A Tabela 3.7 e a Tabela 3.8 indicam os valores dos ganhos do controlador de tensão DC para o lado MT e para o lado BT, respetivamente.

Tabela 3.7: Ganhos do controlador de tensão DC para o lado MT

$K_{pv}$	$K_{iv}$
$2,8737 \times 10^{-3}$	$3,8189 \times 10^{-2}$

Tabela 3.8: Ganhos do controlador de tensão DC para o lado BT

$K_{pv}$	$K_{iv}$
1,7960	23,8682

### 3.4.3. Controlador de tensão AC

A tensão AC na rede MT é imposta ao ST e, por isso, não pode ser controlada pelo mesmo. Deste modo, o controlador de tensão AC apenas pode ser usado para controlar a tensão AC da rede BT.

O controlador de tensão AC é idêntico ao controlador de tensão DC anteriormente apresentado. Contudo, analisando a equação (3.18), o valor do ganho do controlador de corrente em cada uma das fases,  $G_i$ , passa a ser unitário e o valor de  $T_{dv}$  passa a ser o mesmo que o valor obtido da equação (3.10). Por conseguinte, o conversor e o seu controlador de corrente AC são representados pela seguinte função de transferência [21]

$$\frac{i_{DC}(s)}{i_{L.ref}(s)} \approx \frac{G_i}{\alpha_i} \frac{1}{1 + sT_{dv}} \quad (3.23)$$

onde,

- $T_{dv} = \frac{T_s}{2}$ ;
- $G_i = 1$ .

O diagrama de blocos do controlador de tensão AC é igual ao da Figura 3.10 e as restantes expressões escritas nas equações (3.19), (3.21) e (3.22) mantêm-se inalteradas.

Os principais parâmetros do controlador de tensão AC para o lado BT estão revelados na Tabela 3.9.

Tabela 3.9: Principais parâmetros do controlador de tensão AC para o lado BT

$T_{dv} (ms)$	$K_{pv}$	$K_{iv}$
50	1,7954	$9,5439 \times 10^3$

### 3.4.4. Controlador de corrente DC

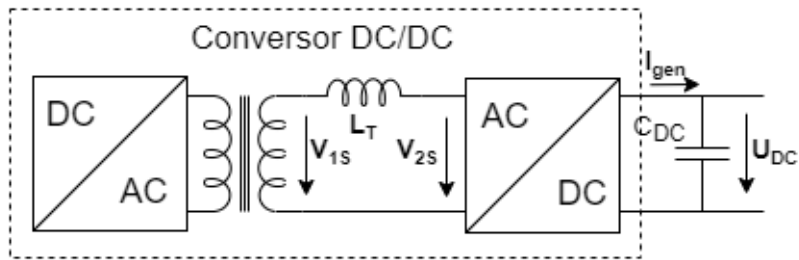


Figura 3.11: Conversor DC/DC e o filtro DC do lado de baixa tensão

Através da equação (3.2) é possível regular o fluxo de potência bidirecional do ST através do controle do ângulo de defasamento  $\delta$  entre as tensões  $V_{1s}$  e  $V_{2s}$ . Caso o defasamento seja positivo, o trânsito de energia é realizado do lado de MT para o lado de BT. Porém, se negativo, o trânsito de energia é realizado no sentido inverso.

Utilizando um compensador integral em vez de um compensador PI, o diagrama de blocos do controlador de corrente DC é representado na Figura 3.12 [17].

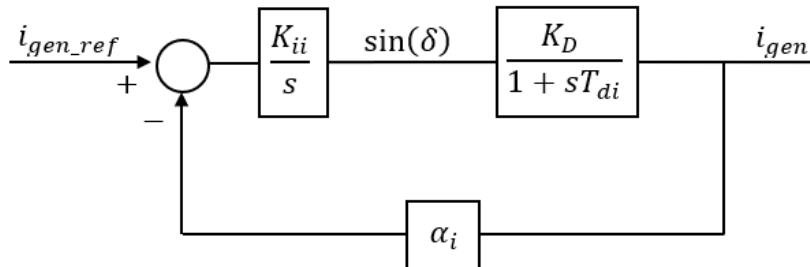


Figura 3.12: Diagrama de blocos simplificado do controlador de corrente DC

O ganho diferencial do controlador [17] apresentado na Figura 3.12 é dado por

$$K_D = \frac{V_{1s} \cdot V_{2s}}{2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot L_T \cdot U_{DC}} \quad (3.24)$$

onde,

- $V_{1s}$  e  $V_{2s}$  são as tensões de cada lado da bobine para cada uma das fases, tal como pode ser observado na Figura 3.11;
- $f_s$  é a frequência de comutação dos semicondutores do ST;
- $L_T$  é o valor da bobine calculado em (3.2);
- $U_{DC}$  é a tensão DC no filtro DC no lado BT.



A função de transferência em malha fechada do controlador de corrente DC [17] da Figura 3.12 é

$$\frac{i_{gen}(s)}{i_{gen\_ref}(s)} = \frac{\frac{\alpha_i K_{ii} K_D}{T_{di}}}{s^2 + s \frac{1}{T_{di}} + \frac{\alpha_i K_{ii} K_D}{T_{di}}} \quad (3.25)$$

tal que,  $\alpha_i$  representa o ganho do sensor de corrente.

Comparando o denominador da equação (3.25) com o denominador da função transferência de 2ª ordem escrita na forma canônica em (3.16), é possível obter o valor do ganho integral  $K_{ii}$ , considerando um fator de amortecimento de  $\xi = \sqrt{2}/2$  [17].

$$K_{ii} = \frac{1}{4 \cdot \xi^2 \cdot T_{di} \cdot K_D \cdot \alpha_i} \leftrightarrow K_{ii} = \frac{1}{2 \cdot T_{di} \cdot K_D \cdot \alpha_i} \quad (3.26)$$

Na Tabela 3.10 encontram-se os valores dos ganhos para o controlador de corrente DC para o lado BT.

Tabela 3.10: Ganhos do controlador de corrente DC para o lado BT

$K_D$	$K_{ii}$
668,4507	149,5996

### 3.5. Rede

Para simular a rede de distribuição AC com o ST utilizaram-se dois tipos de redes: ativa e passiva.

A rede MT é uma rede ativa, ou seja, onde a energia que será fornecida pelo ST ao andar de BT é gerada, tendo, deste modo, usado uma rede MT de 10 kV. Contudo, esta situação apenas pode ser usada em ambiente de simulação pois, na realidade, tensões destas grandezas destruiriam os semicondutores dos conversores da arquitetura apresentada na Figura 3.1.

Por outro lado, a rede BT, com tensão trifásica de 400 V, é uma rede passiva composta apenas por cargas, ou seja, por componentes passivos, tais como, resistências, bobines e condensadores. No programa de simulação, tal como pode ser observado na Figura 3.1, decidiu-se utilizar uma rede puramente resistiva para representar a rede BT, onde o valor de  $R_{carga}$  em cada fase é calculada por

$$R_{carga} = \frac{V_{AC}^2}{P_{consumido}} \quad (3.27)$$

tal que,

- $P_{consumido}$  é a potência consumida em cada fase;
- $V_0$  é a tensão AC monofásica.



# 4

## Resultados e Discussão

Neste capítulo serão descritos os vários cenários utilizados na simulação para testar o comportamento do ST no sistema de distribuição, nomeadamente, (i) o funcionamento normal do ST sem perturbações em ambas as redes, (ii) a presença de cavas na rede MT, (iii) a presença de sobretensões na rede MT, (iv) a variação da frequência na rede BT e (v) o desacoplamento da potência reativa entre cada terminal do ST.

### Conteúdo

---

- 4.1. Cenário 1: Condições e funcionamento normal**
- 4.2. Cenário 2: Presença de cavas na rede de média tensão**
- 4.3. Cenário 3: Presença de sobretensões na rede de média tensão**
- 4.4. Cenário 4: Variação da frequência da rede de baixa tensão**
- 4.5. Cenário 5: Desacoplamento da potência reativa entre cada terminal**

## 4.1. Cenário 1: Condições e funcionamento normal

No primeiro cenário foi feita uma análise do ST perante condições normais de operação, sem qualquer perturbação na rede de MT e BT.

Os principais parâmetros de simulação usados no cenário 1, onde o ST irá ser o responsável pela conversão da tensão 10 kV / 400 V encontram-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Principais parâmetros da simulação do cenário 1

Parâmetros	Valores
$P_{ST}$ (trifásica)	630 kVA
$P_{ST}$ (monofásica)	210 kVA
$f_{comutação}$	10 kHz
$V_{RMS\_MT}$	10 kV
$f_{MT}$	50 Hz
$V_{RMS\_BT}$	400 V
$f_{BT}$	50 Hz
$P_{consumido}$ (trifásico)	594 kVA
$P_{consumido}$ (monofásico)	198 kVA
$R_{carga}$	269,3602 mΩ

Na Figura 4.1 estão representadas as formas de onda da tensão na rede MT, bem como as respetivas correntes.

A tensão AC é imposta pela rede MT e, por isso, o valor observável no gráfico a) da Figura 4.1 é apresentado na equação (4.1).

$$V_{AC\_MT\_max} = \frac{10\,000}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} = 8\,165\,V \quad (4.1)$$

Os controladores de corrente AC da rede MT foram desenhados para limitar o valor da corrente AC entre o valor da corrente máxima calculada em (4.2) e o seu valor negativo. Observando o gráfico b) da Figura 4.1, o controlador está a operar corretamente pois o valor medido é menor que  $I_{AC\_MT\_max}$ . Além disso, os erros dos controladores estão próximos de zero, o que significa que o controlador está a conseguir estabilizar a corrente AC no valor de referência pretendido.

$$I_{AC\_MT\_max} = \frac{210\,000}{\frac{10\,000}{\sqrt{3}}} \times \sqrt{2} = 51,44\,A \quad (4.2)$$

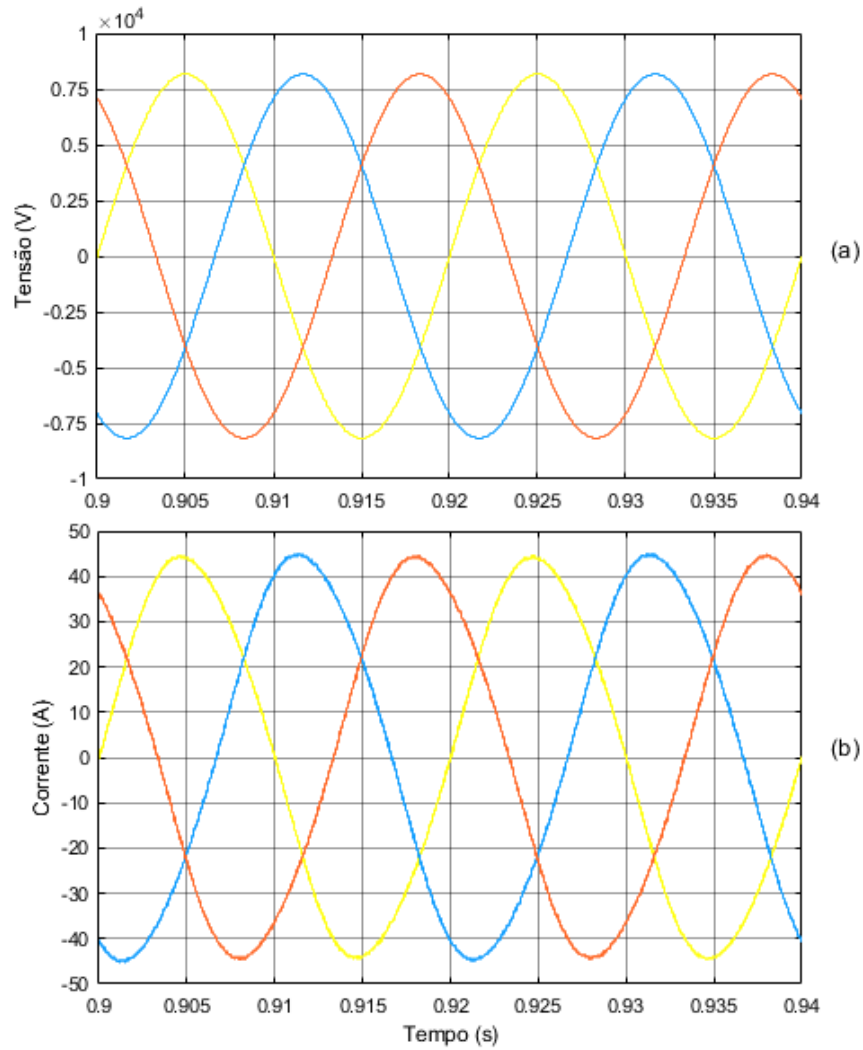


Figura 4.1: a) Tensão AC da rede MT; b) Corrente AC da rede MT (cenário1)

Na Figura 4.2 é possível observar a tensão DC das capacitâncias dos filtros DC para o lado MT. Para os controladores de tensão DC do lado MT, escolheu-se o valor de referência de  $V_{DC\_MT\_ref} = 10\ 000\ V$  e, como se pode constatar, os controladores estão a estabilizar corretamente a tensão DC do lado MT e também apresentam um erro próximo de zero.

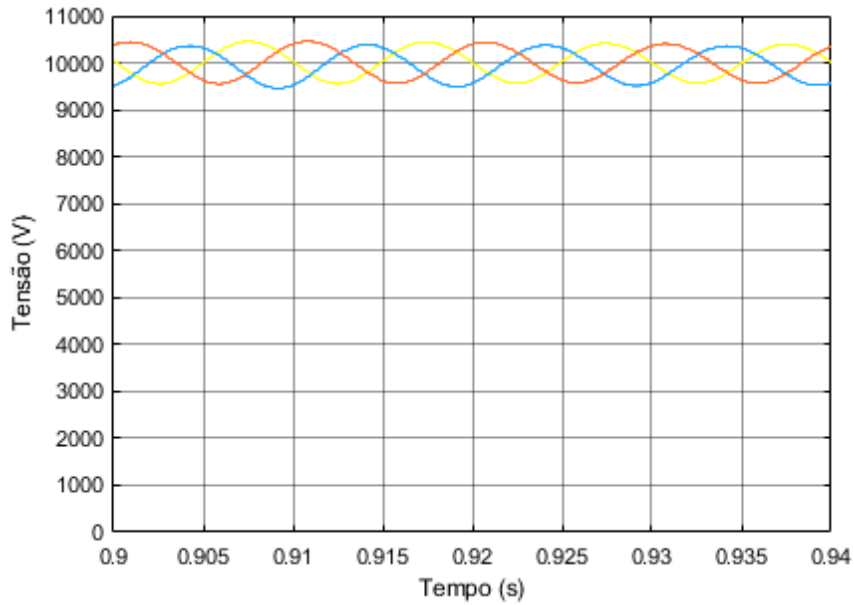


Figura 4.2: Tensão nos condensadores dos filtros DC do lado MT (cenário1)

Para os controladores de tensão DC do lado BT, escolheu-se o valor de referência de  $V_{DC\_BT\_ref} = 400\text{ V}$ . Como se pode observar na Figura 4.3, que representa as formas de onda para a tensão DC das capacitâncias dos filtros DC do lado BT, os controladores estão a controlar corretamente a tensão DC do lado BT e também apresentam um erro próximo de zero.

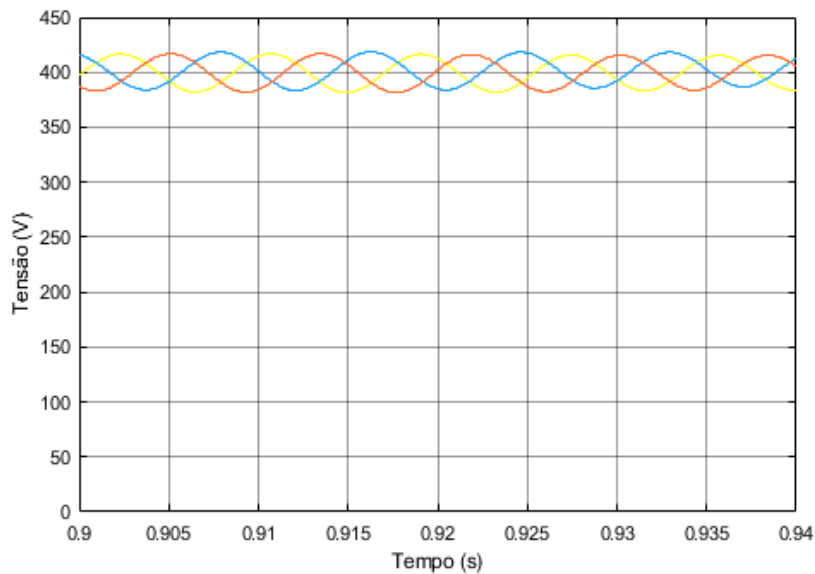


Figura 4.3: Tensão nos condensadores dos filtros DC do lado BT (cenário1)

Na Figura 4.4 é apresentado o valor das correntes DC medidas à saída do andar de conversão DC/DC do lado BT. Os erros dos controladores de corrente DC foram próximos de zero, o que demonstra o correto controlo da corrente DC. Ainda assim, é possível calcular o valor da corrente DC

e comprovar o correto valor da medição. Sabendo que em cada fase é consumido 198 kVA e  $V_{DC\_BT\_ref} = 400 V$ , o valor da corrente DC é calculado na equação (4.3), e analisando o gráfico da Figura 4.4, pode-se ver que o valor medido é semelhante ao calculado.

$$P_{DC} = P_{consumido} \leftrightarrow V_{DC} \times I_{DC} = P_{consumido} \leftrightarrow I_{DC} = \frac{198\,000}{400} = 495 A \quad (4.3)$$

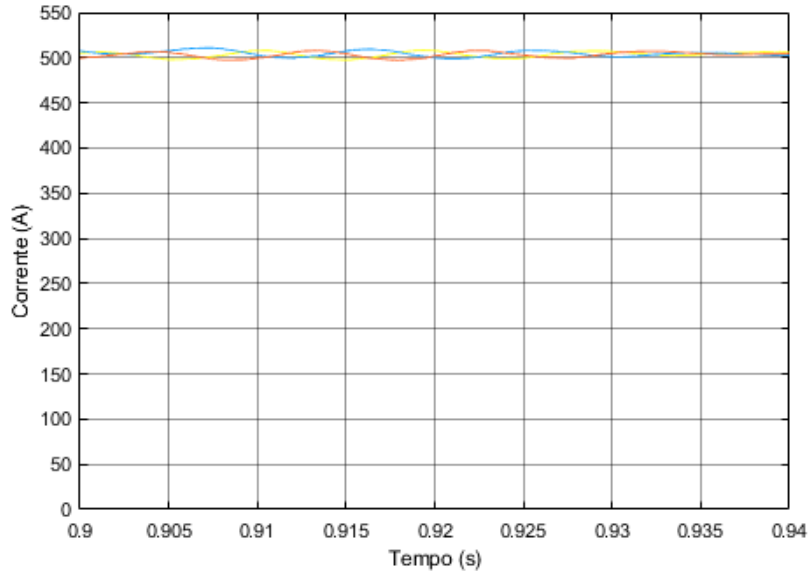


Figura 4.4: Corrente DC à saída do andar de conversão DC/DC (cenário1)

Na Figura 4.5 estão representadas as formas de onda da tensão AC (gráfico a) e da corrente AC (gráfico b) da rede BT.

A tensão AC da rede BT é controlada por um controlador de tensão AC que impõe como valor de referência o valor da tensão AC máximo calculado em (4.4) e, tal como pode ser observado no gráfico a) da Figura 4.5, o controlador de tensão AC está a operar corretamente. Assim, conclui-se que o seu erro é também próximo de zero.

$$V_{AC\_BT\_max} = \frac{400}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} = 326,6 V \quad (4.4)$$

Os controladores de corrente AC da rede BT foram desenhados para limitar o valor da corrente AC entre o valor máximo calculado em (4.5). Observando o gráfico b) da Figura 4.5, o controlador está a operar corretamente pois o valor medido é menor que  $I_{AC\_BT\_max}$ . Os erros dos controladores de corrente AC também são próximos de zero, o que verifica o seu correto funcionamento.

$$I_{AC\_BT\_max} = \frac{210\,000}{\frac{400}{\sqrt{3}}} \times \sqrt{2} = 1\,286 A \quad (4.5)$$

O valor da corrente AC pode ainda ser calculado. Sabendo que em cada fase é consumido 198 kVA e  $V_{AC\_BT\_mono} = 400/\sqrt{3} \approx 230 V$ , o valor da corrente AC é

$$P_{AC} = P_{consumido} \leftrightarrow I_{AC} = \frac{198\,000}{230} \times \sqrt{2} = 1\,217A \quad (4.6)$$

Analisando o gráfico da Figura 4.5, pode-se ver que o valor medido é semelhante ao calculado na equação (4.6), corroborando a medição.

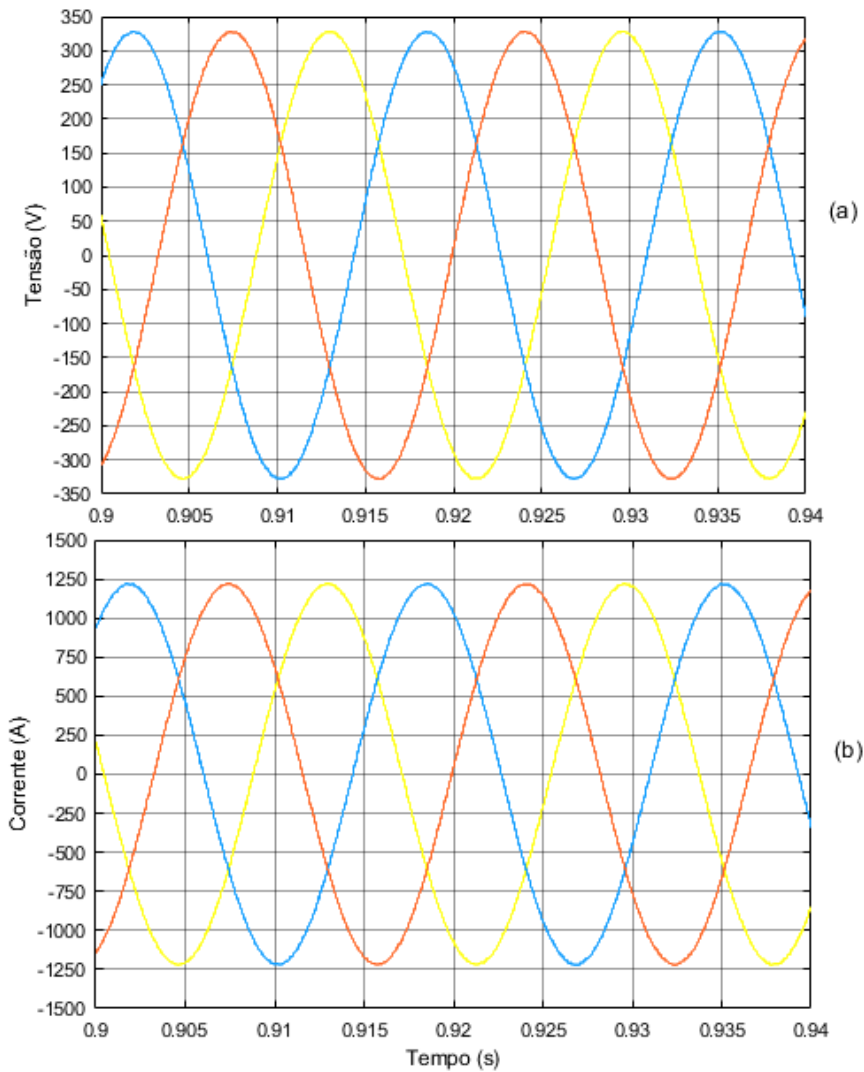


Figura 4.5: a) Tensão AC da rede BT; b) Corrente AC da rede BT (cenário1)

Por fim, na Figura 4.6 é possível observar a potência fornecida pelo ST à carga e, tal como seria de esperar, o valor da potência fornecida do gráfico é muito semelhante ao valor esperado e calculado na equação (4.7), uma vez que todo o sistema está corretamente controlado.

$$P_{consumido} = 3 \times 198\,000 = 594\,kVA \quad (4.7)$$



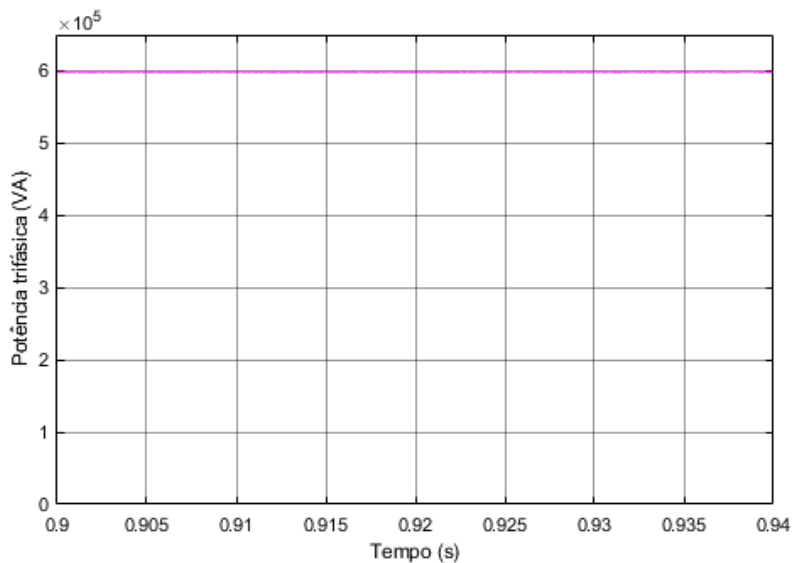


Figura 4.6: Potência trifásica fornecida pelo ST à carga (cenário1)

Em suma, foi comprovado ao longo desta análise que não só os controladores, como também todos os outros componentes que constituem o ST, são capazes de operar corretamente perante condições normais de operação da rede BT e MT.

## 4.2. Cenário 2: Presença de cavas na rede de média tensão

No segundo cenário foi feita uma análise do comportamento do ST quando confrontado com uma situação de cavas de tensão na rede MT, que podem ser provenientes da ocorrência de defeitos ou da ligação de cargas de grande potência [22].

Segundo a norma EN 50160:2010 e o Regulamento da Qualidade de Serviço, uma cava de tensão é uma “diminuição brusca da tensão de alimentação para um valor situado entre 90% e 5% da tensão nominal, seguida do restabelecimento da tensão depois de um curto lapso de tempo. Por convenção, uma cava de tensão dura de dez milissegundos a 1 minuto.” [23].

A Tabela 4.2 indica os principais parâmetros de simulação usados no cenário 2 e na Tabela 4.3 são apresentadas as características da cava de tensão em estudo.

Tabela 4.2: Principais parâmetros da simulação do cenário 2

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>
$P_{ST}$ (trifásica)	630 kVA
$P_{ST}$ (monofásica)	210 kVA
$f_{comutação}$	10 kHz
$V_{RMS\_MT}$	10 kV
$f_{MT}$	50 Hz
$V_{RMS\_BT}$	400 V
$f_{BT}$	50 Hz
$P_{consumido}$ (trifásico)	540 kVA
$P_{consumido}$ (monofásico)	180 kVA
$R_{carga}$	296,2962 mΩ

Tabela 4.3: Características da cava de tensão

<b>Profundidade da cava</b>	<b>Duração da cava</b>
20 %	2 ciclos da rede (40 ms)

No gráfico a) da Figura 4.7, onde estão representadas as formas de onda da tensão e da corrente na rede MT à entrada do ST, é possível observar a cava de tensão que provocou uma redução na tensão de entrada de 8 165 V para os 6 532 V durante dois períodos da rede. Depois dos 0,84 segundos, a tensão AC retoma o seu valor original de 8 165 V .

Por sua vez, pode-se analisar através do gráfico b) que, durante a presença da cava na rede MT, a corrente AC aumentou aproximadamente 10 A. Depois da cava se ter dissipado, a rede demorou cerca de 80 ms a estabilizar, isto é, a voltar ao seu valor original. Durante todo o processo, os erros dos controladores de corrente AC permaneceram próximos de zero, o que significa que a corrente AC consegue permanecer controlada mesmo com a presença de cavas na rede MT.

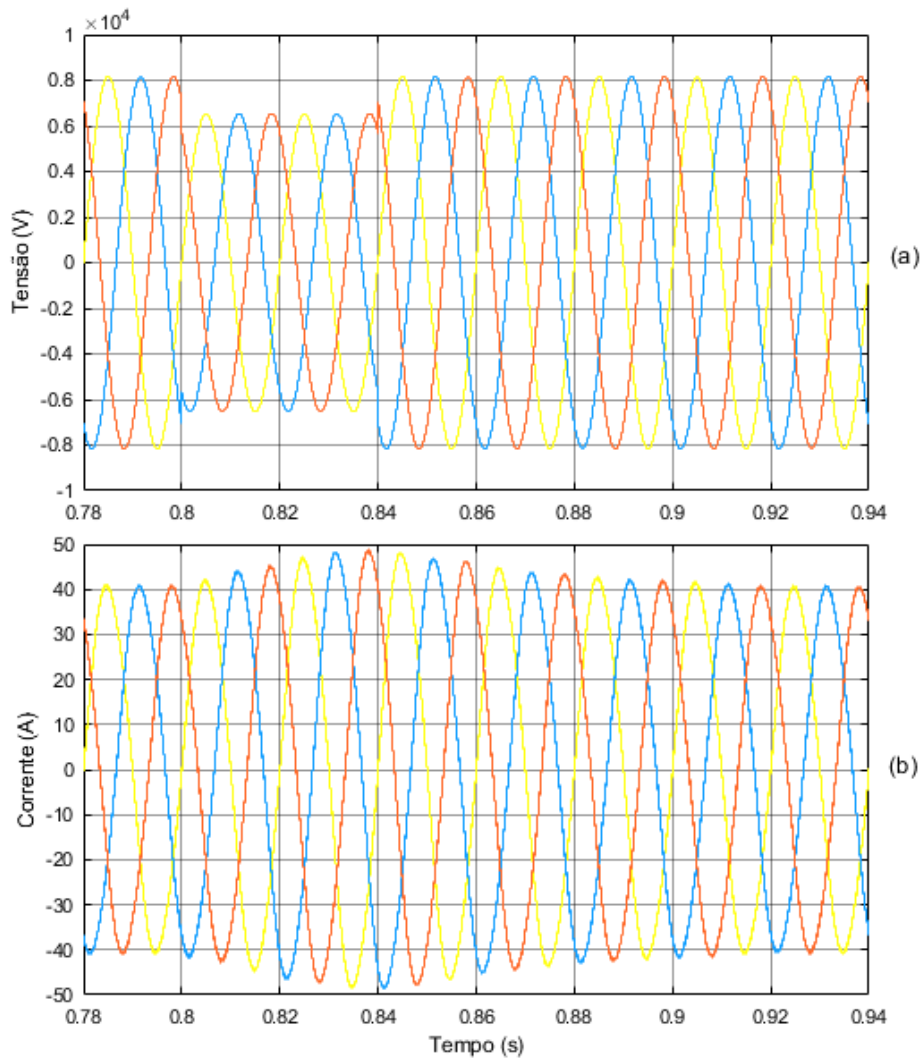


Figura 4.7: a) Tensão AC da rede MT; b) Corrente AC da rede MT (cenário2)

Na Figura 4.8 pode-se constatar que, durante a cava de tensão na rede MT, a tensão DC do lado MT diminuiu e, após a cava ter desaparecido, demorou cerca de 0,31 segundos a estabilizar no valor nominal da tensão DC de referência (10 kV). Após a estabilização, os erros dos controladores DC ficaram próximos de zero, o que significa que a tensão DC está corretamente controlada e os controladores de tensão DC foram corretamente construídos.

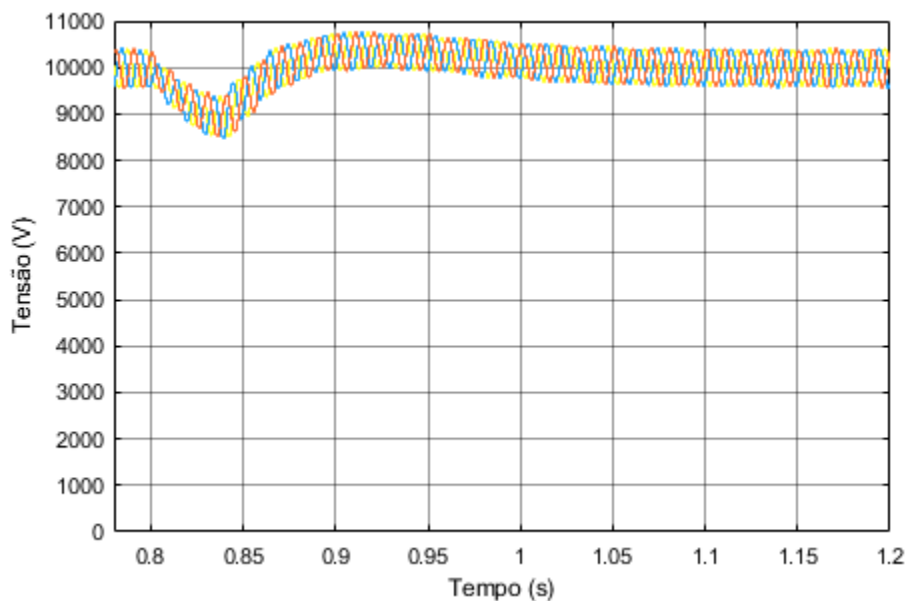


Figura 4.8: Tensão nos condensadores dos filtros DC do lado MT (cenário2)

Na Figura 4.9 é representada a tensão DC do lado BT e é possível perceber que a presença de cavas de tensão na rede MT não interferiu com o lado BT do ST, tal como era esperado. Neste caso, a tensão DC ficou sempre igual ao valor de referência estipulado de 400 V, o que significa que os controladores de tensão DC do lado BT tiveram os seus erros sempre próximos de zero, provando assim que os controladores em causa operam corretamente.

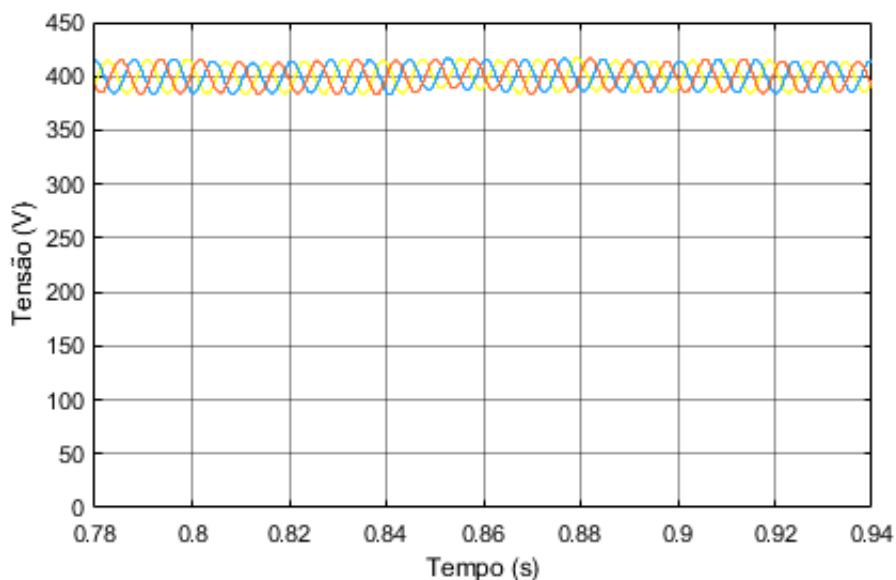


Figura 4.9: Tensão nos condensadores dos filtros DC do lado BT (cenário2)

Da análise da Figura 4.10, em que é apresentada a corrente DC à saída do andar DC/DC do lado BT, verifica-se que durante a cava de tensão na rede MT, a corrente DC também não se alterou.

Por conseguinte, os erros dos controladores de corrente DC permaneceram próximos de zero, o que por sua vez implica que também estes controladores estão a funcionar corretamente.

O valor da corrente DC diminuiu em comparação com o cenário 1 pois em cada fase passaram a ser consumidos 180 kVA. Assim, o valor da corrente DC é calculado na equação (4.8), e analisando o gráfico da Figura 4.10, pode-se ver que o valor calculado é semelhante ao medido.

$$P_{DC} = P_{consumido} \leftrightarrow I_{DC} = \frac{180\,000}{400} = 450\,A \quad (4.8)$$

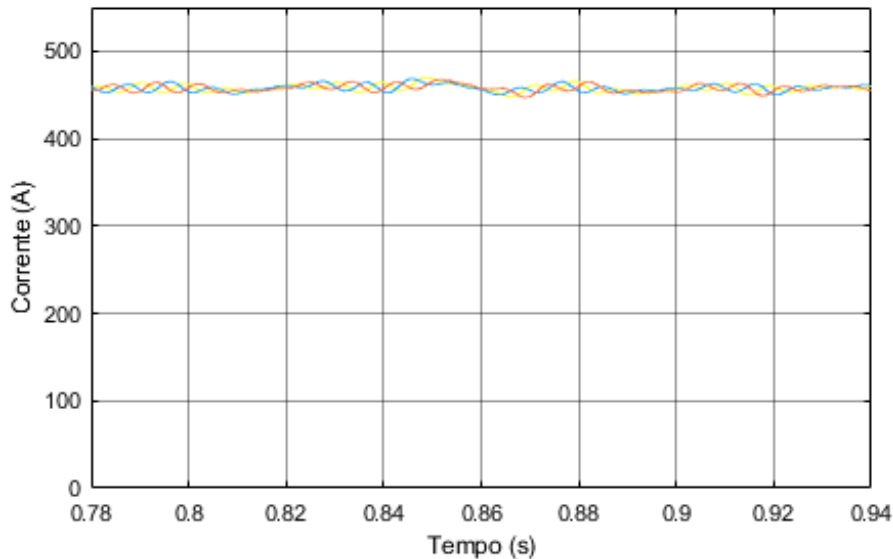


Figura 4.10: Corrente DC à saída do andar de conversão DC/DC (cenário2)

Da Figura 4.11 é possível concluir que a tensão e a corrente AC aos terminais da carga não sofreram nenhuma alteração, tal como esperado, o que prova o bom comportamento do ST perante este tipo perturbações. Ambos os controladores tiveram os seus erros próximos de zero, o que corrobora o seu correto funcionamento.

O valor da corrente AC é menor que o valor apresentado para o cenário 1 na equação (4.6) pois a potência consumida é de 180 kVA em cada fase. Assim sendo, o novo valor de corrente AC do lado BT é

$$P_{AC} = P_{consumido} \leftrightarrow I_{AC} = \frac{180\,000}{230} \times \sqrt{2} = 1\,107\,A \quad (4.9)$$

Analisando o gráfico b) da Figura 4.11, pode-se verificar que o valor medido é semelhante ao calculado na equação (4.9).

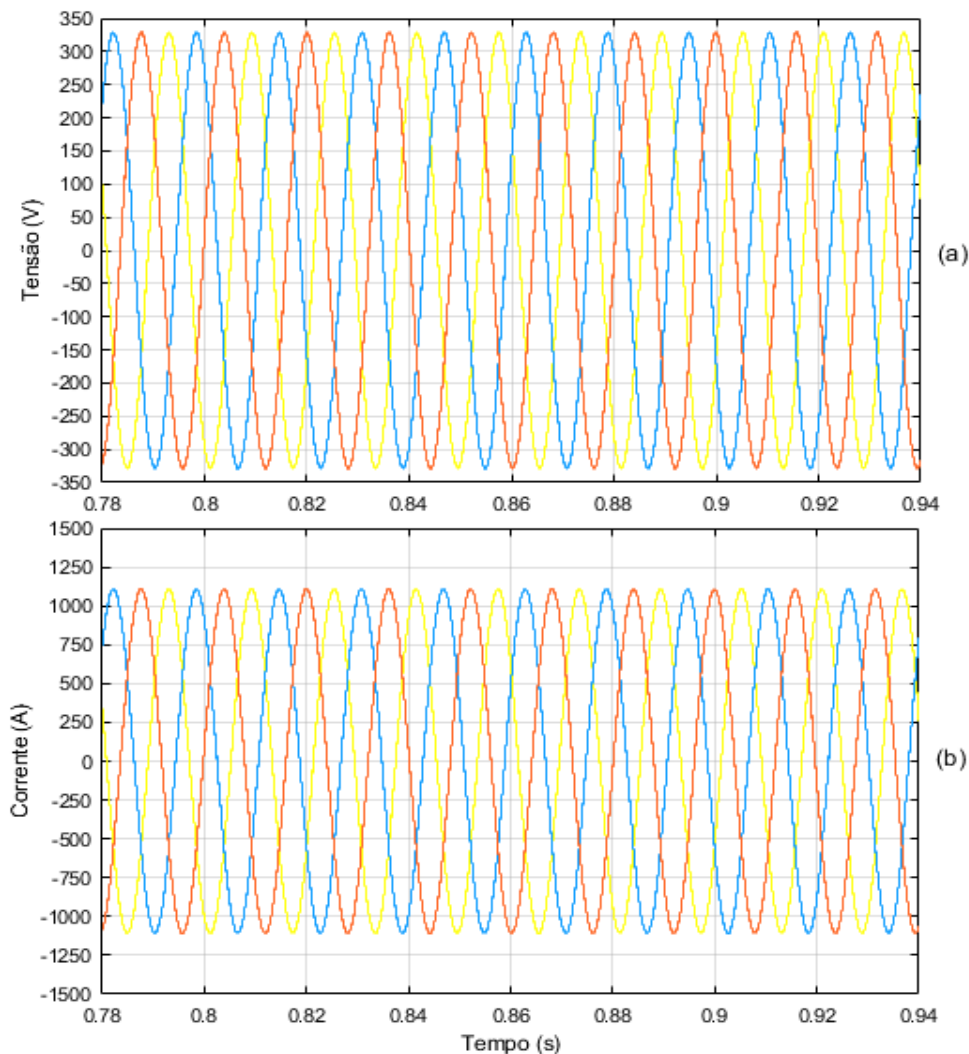


Figura 4.11: a) Tensão AC da rede BT; b) Corrente AC da rede BT (cenário2)

Cessada a análise dos gráficos retirados do programa de simulação para o cenário número 2, pode-se concluir que o ST teve um bom comportamento e conseguiu operar corretamente perante a presença de uma cava de tensão na rede MT.

### 4.3. Cenário 3: Presença de sobretensões na rede de média tensão

No terceiro cenário, o ST foi submetido a uma sobretensão na rede MT que pode ser originada devido a descargas atmosféricas ou eletrostáticas.

Segundo o manual de Qualidade da Energia Elétrica, as sobretensões transitórias correspondem a variações extremamente rápidas do valor da tensão, com durações entre os microssegundos e os segundos, podendo atingir valores de pico bastante elevados [24].

De acordo com a norma EN 50160:2010, as sobretensões são caracterizadas por um aumento temporário do valor RMS igual a 110% da referência, em determinado ponto do sistema de alimentação elétrica [23].

Os principais parâmetros de simulação usados no cenário 3 constam na Tabela 4.4, sendo que na Tabela 4.5 estão descritas as características da sobretensão em análise.

Tabela 4.4: Principais parâmetros da simulação do cenário 3

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>
$P_{ST}$ (trifásica)	630 kVA
$P_{ST}$ (monofásica)	210 kVA
$f_{comutação}$	10 kHz
$V_{RMS\_MT}$	10 kV
$f_{MT}$	50 Hz
$V_{RMS\_BT}$	400 V
$f_{BT}$	50 Hz
$P_{consumido}$ (trifásico)	555 kVA
$P_{consumido}$ (monofásico)	185 kVA
$R_{carga}$	288,2882 mΩ

Tabela 4.5: Características da sobretensão

<b>Profundidade da sobretensão</b>	<b>Duração da sobretensão</b>
10 %	2 ciclos da rede (40 ms)

No gráfico a) da Figura 4.12, onde estão representadas as formas de onda das tensões AC na rede MT, bem como as respectivas correntes AC, é possível observar uma sobretensão que provocou um aumento ligeiro na tensão AC de entrada de 8 165 V para os 8 982 V durante dois períodos da rede. Depois de a sobretensão desaparecer aos 0,84 segundos, a tensão AC retoma o seu valor original de 8 165 V .

Por sua vez, no gráfico b) da Figura 4.12, pode-se analisar que durante a presença perturbação na rede MT, a corrente AC diminuiu ligeiramente. Depois da sobretensão se ter dissipado, a corrente AC demorou cerca de 60 ms a estabilizar, isto é, a voltar ao seu valor original. Durante todo o processo, os erros dos controladores de corrente AC permaneceram próximos de zero, o que significa que a corrente AC consegue permanecer controlada mesmo com a presença de sobretensões na rede MT.

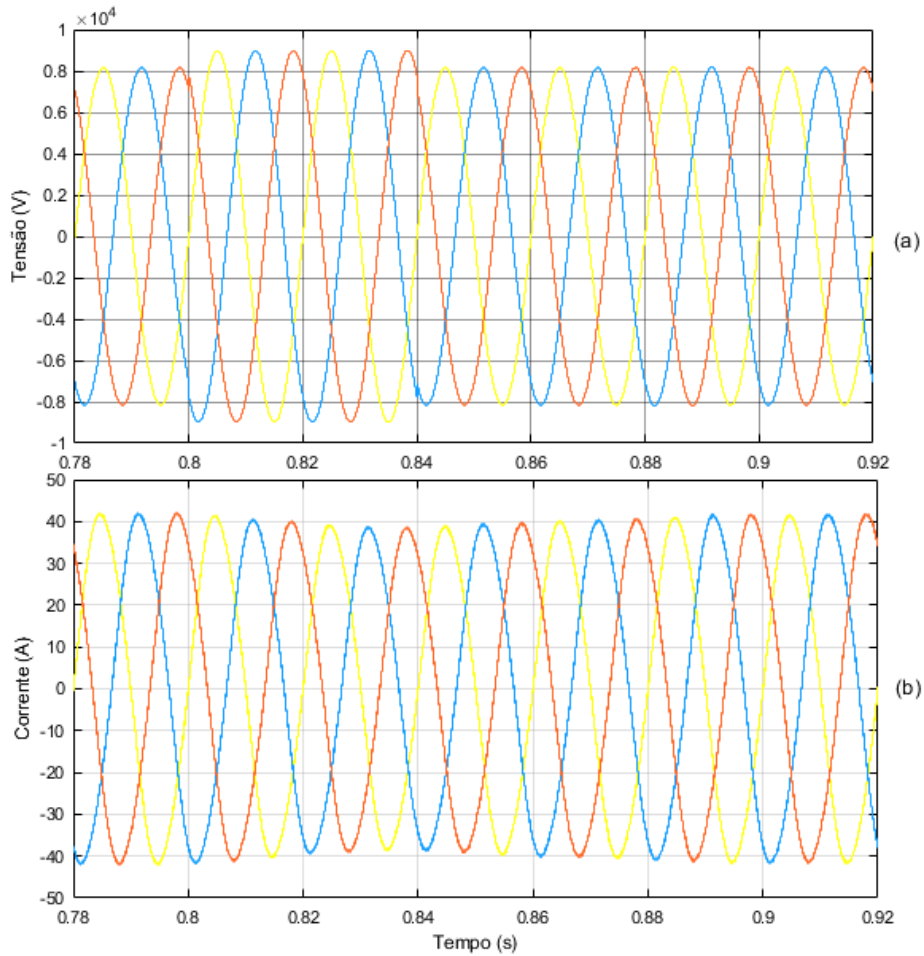


Figura 4.12: a) Tensão AC da rede MT; b) Corrente AC da rede MT (cenário3)

Na Figura 4.13 pode-se constatar que durante a sobretensão na rede MT, a tensão DC do lado MT aumentou ligeiramente, e após a perturbação ter desaparecido, demorou aproximadamente 0,21 segundos a estabilizar no valor da tensão DC de referência de 10 kV. Após a estabilização, os erros dos controladores DC ficaram próximos de zero, o que significa que a tensão DC está corretamente controlada e os controladores de tensão DC conseguem permanecer controlados mesmo com a presença de sobretensões na rede MT.



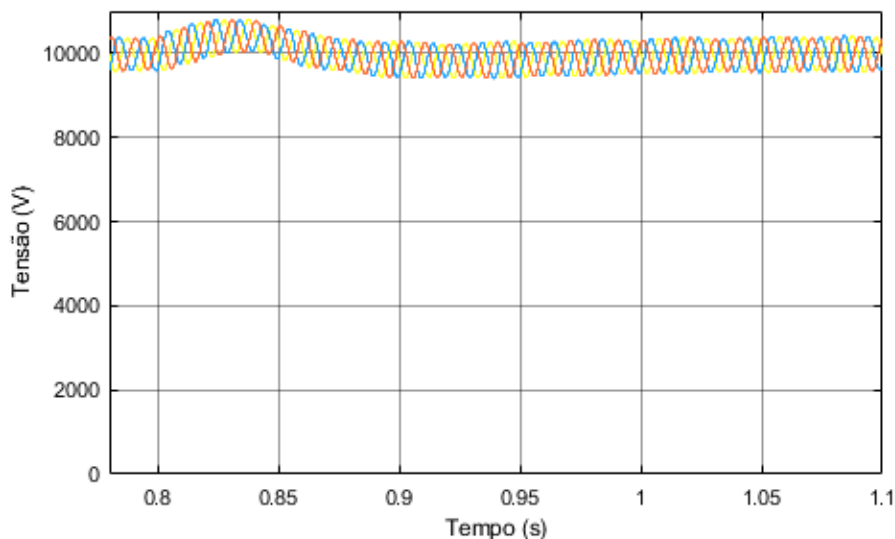


Figura 4.13: Tensão nos condensadores dos filtros DC do lado MT (cenário3)

Na Figura 4.14 é representada a tensão DC do lado BT e é possível perceber que a presença de sobretensões na rede MT não interferiu com o lado BT do ST, tal como era esperado. Neste caso, a tensão DC ficou sempre igual ao valor de referência estipulado de 400 V, o que significa que os controladores de tensão DC do lado BT tiveram os erros sempre próximos de zero, provando assim que os controladores em causa operam corretamente mesmo com a presença deste tipo de perturbações na rede MT.

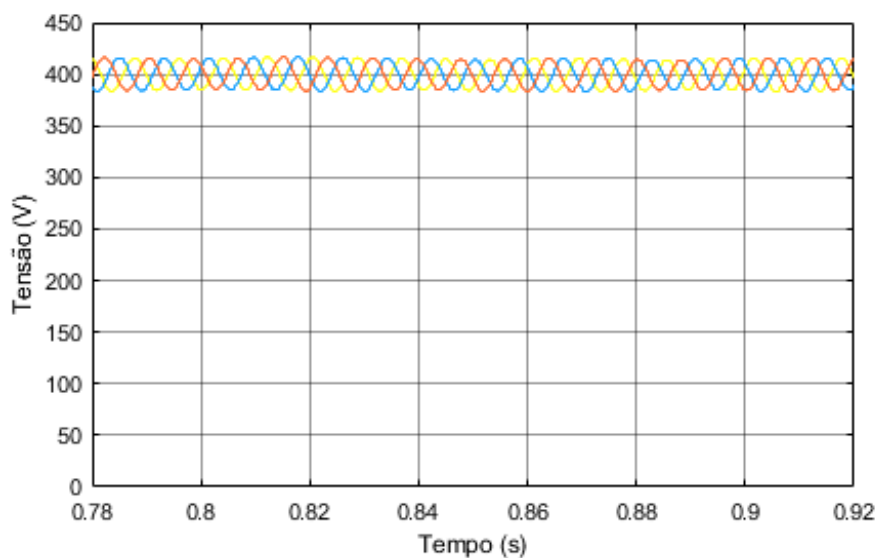


Figura 4.14: Tensão nos condensadores dos filtros DC do lado BT (cenário3)

Da análise da Figura 4.15, onde é apresentada a corrente DC á saída do andar DC/DC do lado BT, constata-se que durante a presença da sobretensão na rede MT, a corrente DC não se modificou. Deste modo, os erros dos controladores de corrente DC permaneceram próximos de zero, o que

comprova que estes controladores estão a funcionar corretamente mesmo com a presença de sobretensões.

O valor da corrente DC voltou a alterar-se pois em cada fase são agora consumidos 185 kVA e por isso, o valor da corrente DC pode ser observado na equação (4.10).

$$P_{DC} = P_{consumido} \leftrightarrow I_{DC} = \frac{185\,000}{400} = 463\,A \quad (4.10)$$

Analisando o gráfico da Figura 4.15, pode-se observar que o valor calculado é semelhante ao valor medido.

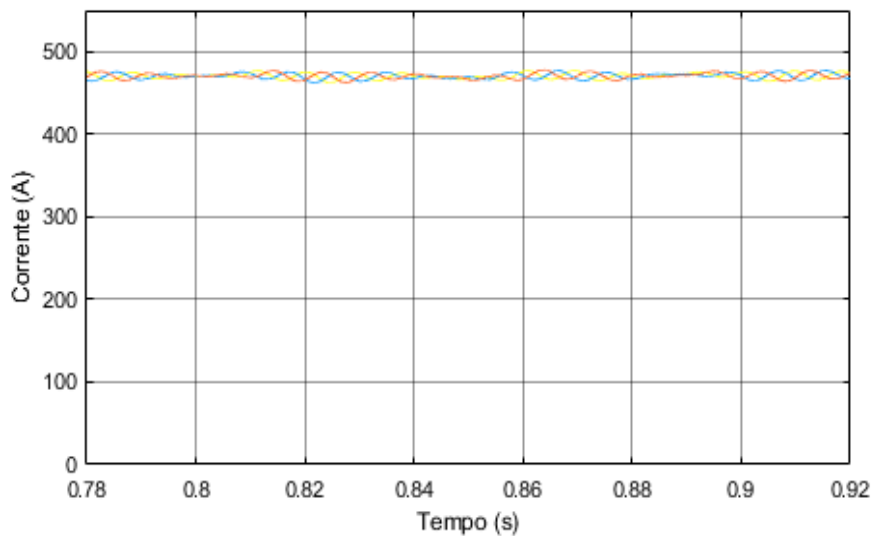


Figura 4.15: Corrente DC à saída do andar de conversão DC/DC (cenário3)

Frente a uma situação de sobretensão na entrada do ST, é possível observar na Figura 4.16 que a tensão e a corrente AC aos terminais da carga não sofreram grandes modificações, tal como era esperado, o que mostra a boa resposta do ST perante este tipo de perturbações. Ambos os controladores tiveram os seus erros próximos de zero durante a presença da perturbação, o que suporta também o seu correto funcionamento.

O valor da corrente AC voltou a mudar pois a potência consumida é agora de 185 kVA em cada fase, e assim sendo, o novo valor de corrente AC do lado BT é

$$P_{AC} = P_{consumido} \leftrightarrow I_{AC} = \frac{185\,000}{230} \times \sqrt{2} = 1\,138\,A \quad (4.11)$$

Analisando o gráfico b) da Figura 4.16, pode-se verificar que o valor medido é semelhante ao calculado.

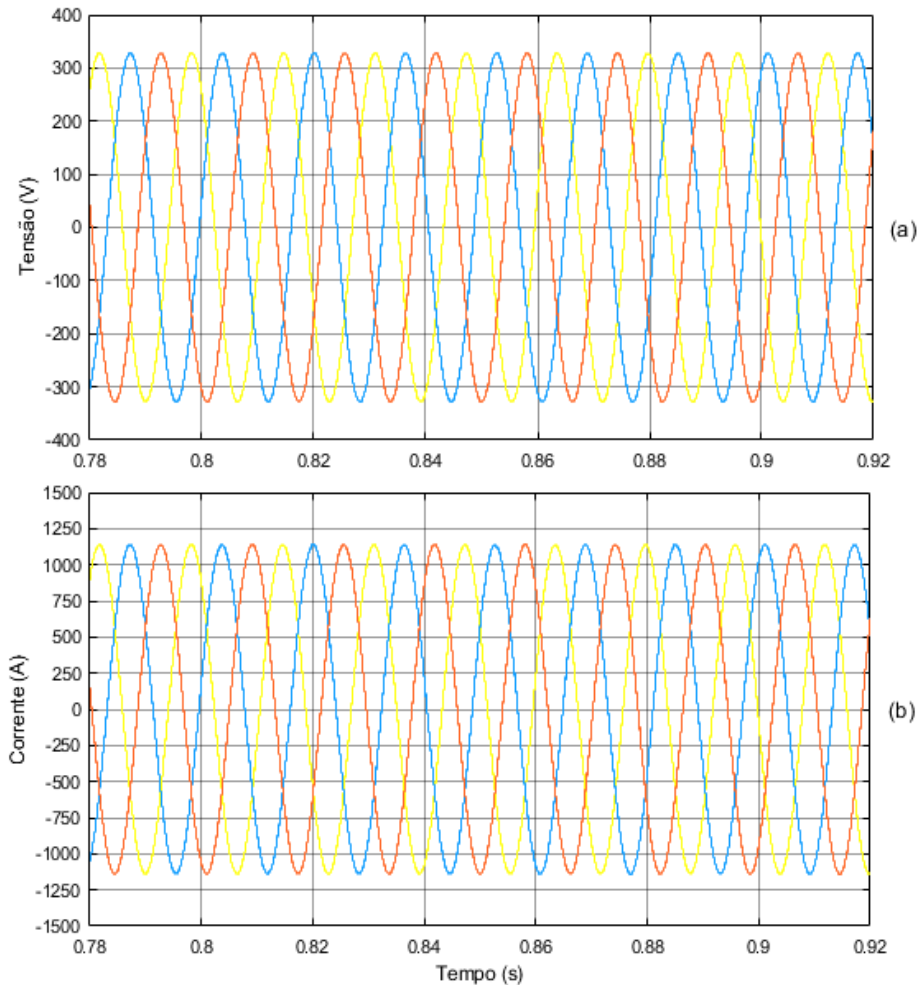


Figura 4.16: a) Tensão AC da rede BT; b) Corrente AC da rede BT (cenário3)

Em suma, foi comprovado ao longo desta análise que o ST consegue manter o correto funcionamento de todos os seus controladores mesmo com a presença de perturbações, neste caso, a presença de sobretensões na rede MT.

#### 4.4. Cenário 4: Variação da frequência da rede de baixa tensão

No quarto cenário é analisado o comportamento do ST perante uma variação da frequência da rede BT.

A estabilidade da frequência depende da garantia de equilíbrio entre a absorção e a geração de potência ativa. Nas redes fortemente interligadas, as variações de frequência são praticamente insignificantes, dada a capacidade de resposta das redes a variações de carga. Por outro lado, em redes isoladas, de pequena dimensão, são necessários cuidados acrescidos para que não ocorram desvios de frequência, que ponham em causa a estabilidade do sistema elétrico. [24]

Em suma, a frequência da rede elétrica varia em torno da frequência nominal (50 Hz), reduzindo quando a rede está fortemente carregada e aumentando quando esta está levemente carregada.

Na Tabela 4.6 encontram-se os principais parâmetros de simulação usados no cenário 4 onde se decidiu simular a ligação do ST a uma rede BT com frequência de 60 Hz.

Tabela 4.6: Principais parâmetros da simulação do cenário 4

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>
$P_{ST}$ (trifásica)	630 kVA
$P_{ST}$ (monofásica)	210 kVA
$f_{comutação}$	10 kHz
$V_{RMS\_MT}$	10 kV
$f_{MT}$	50 Hz
$V_{RMS\_BT}$	400 V
$f_{BT}$	60 Hz
$P_{consumido}$ (trifásico)	594 kVA
$P_{consumido}$ (monofásico)	198 kVA
$R_{carga}$	269,3602 mΩ

Na Figura 4.17 estão representados os gráficos da tensão e da corrente AC da rede MT, e tal como era esperado, a rede MT não sofreu nenhuma alteração com a mudança da frequência da rede BT. Como resultado, os gráficos da Figura 4.17 são idênticos aos gráficos obtidos na Figura 4.1, onde se simulou o cenário de operação do ST em condições normais de operação.

Os gráficos da tensão DC para ambos os lados do ST e o gráfico da corrente DC à saída do andar DC/DC também permaneceram muito semelhantes aos gráficos apresentados no subcapítulo 4.1., onde se simulou o ST sem qualquer perturbação na rede de MT e BT. Deste modo, os três gráficos em questão estão apresentados no Anexo 1.

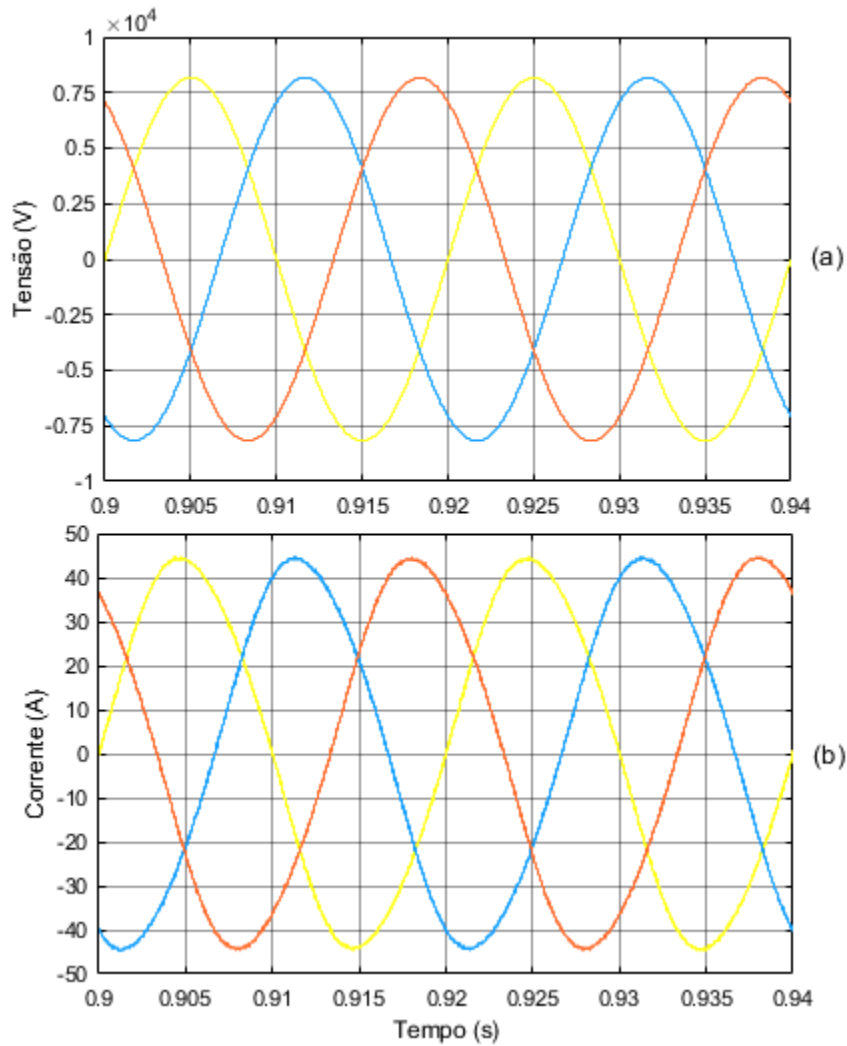


Figura 4.17: a) Tensão AC da rede MT; b) Corrente AC da rede MT (cenário4)

Perante uma situação de mudança da frequência da rede BT para 60 Hz, tanto a tensão AC como a corrente AC da rede BT continuaram com as mesmas amplitudes, como se verifica na Figura 4.18, que as formas de onda da Figura 4.5, sendo que a única alteração ocorrida, tal como era esperado, foi uma diminuição do período de operação de 20 ms para 16,7 ms.

$$T_{rede\ BT} = \frac{1}{60} = 16,7\ ms \quad (4.12)$$

Com a alteração da frequência da rede BT, tanto o controlador de corrente AC, como o controlador de tensão AC da rede BT, continuaram com os seus erros próximos de zero, revelando que estes controladores conseguem operar corretamente mesmo com a mudança da frequência da rede BT.

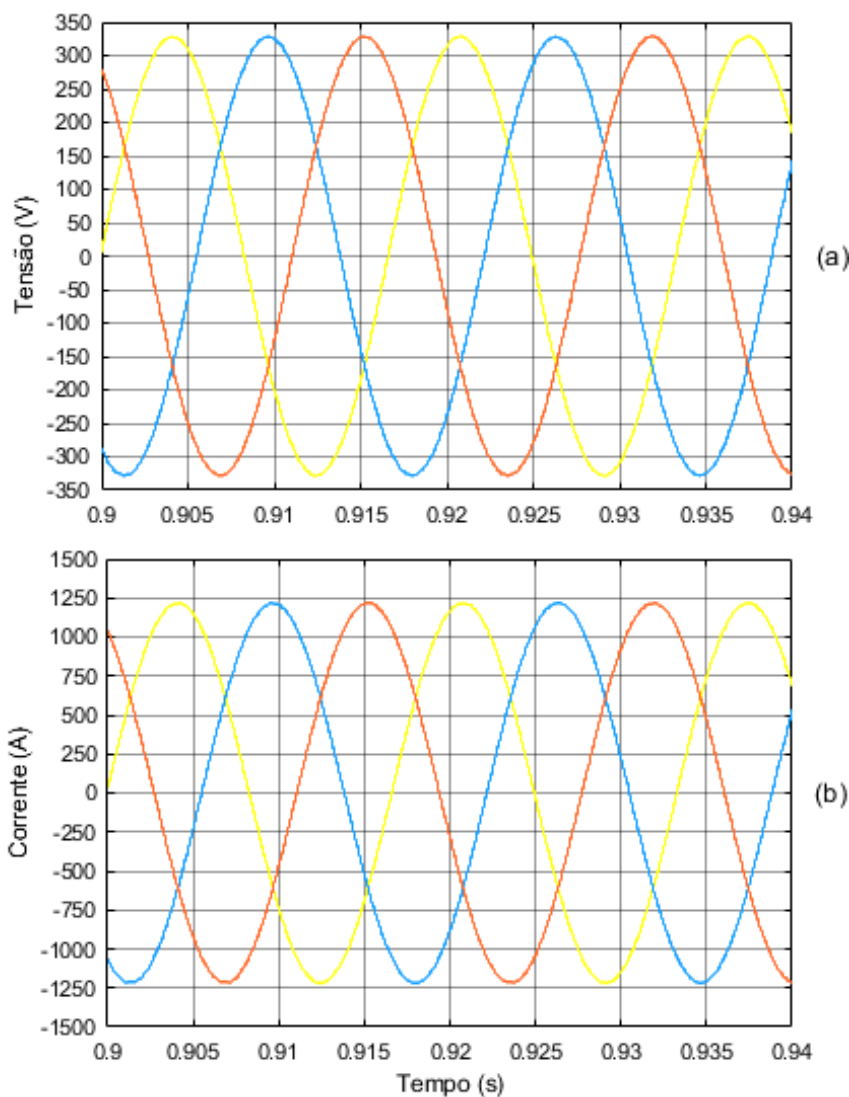


Figura 4.18: a) Tensão AC da rede BT; b) Corrente AC da rede BT (cenário4)

Pode-se concluir que mesmo com uma alteração da frequência da rede BT para 60 Hz, o ST consegue operar corretamente e manter a mesma qualidade de serviço na rede de distribuição.

#### 4.5. Cenário 5: Desacoplamento da potência reativa entre cada terminal

No quinto cenário pretende-se comprovar o desacoplamento da potência reativa entre cada terminal do ST.

Devido à presença de barramentos DC na montagem do ST, a potência reativa pode ser desacoplada entre cada terminal.

A Tabela 4.7 indica os principais parâmetros de simulação usados no cenário 5, onde o ST irá absorver potência reativa da rede MT, de forma a diminuir a tensão da mesma.

Tabela 4.7: Principais parâmetros da simulação do cenário 5

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>
$P_{ST}$ (trifásica)	630 kVA
$P_{ST}$ (monofásica)	210 kVA
$f_{comutação}$	10 kHz
$V_{RMS\_MT}$	10 kV
$f_{MT}$	50 Hz
$V_{RMS\_BT}$	400 V
$f_{BT}$	50 Hz
$P_{consumido}$ (trifásico)	594 kVA
$P_{consumido}$ (monofásico)	198 kVA
$R_{carga}$	269,3602 mΩ

Visto ter havido uma absorção de potência reativa na rede MT, tal como era de esperar, a corrente AC representada no gráfico b) da Figura 4.19, está em atraso relativamente à tensão AC do gráfico a) da mesma figura. Apesar das formas de onda não estarem em fase, os erros dos controladores de corrente AC são próximos de zero, o que significa que estes controladores conseguem operar corretamente mesmo quando o ST está a absorver potência reativa.

Quer seja os gráficos da tensão DC para o lado MT e BT, quer seja o gráfico da corrente DC à saída do andar DC/DC, as formas de onda obtidas neste cenário foram muito semelhantes aos gráficos apresentados no subcapítulo 4.1., o que significa que todos estes controladores são capazes de operar corretamente perante o cenário em estudo. Assim, os três gráficos em questão estão apresentados no Anexo 2.

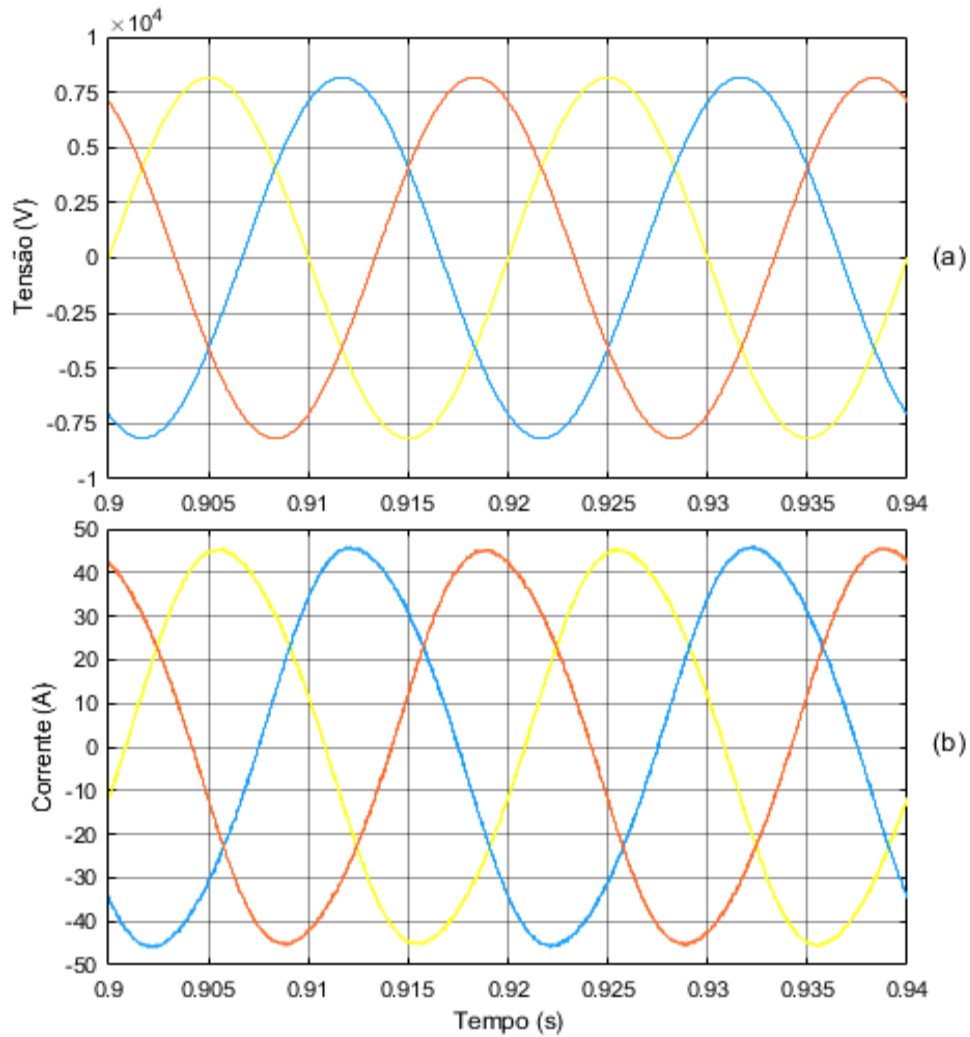


Figura 4.19: a) Tensão AC da rede MT; b) Corrente AC da rede MT (cenário5)

Tal como era de esperar, analisando os gráficos da Figura 4.20 é possível concluir que a tensão e a corrente AC aos terminais da carga não sofreram nenhuma alteração, na medida em que os gráficos são muito idênticos aos da Figura 4.5 do cenário 1. Efetivamente, devido à presença de barramentos DC no ST, ao haver absorção de potência reativa no lado MT, impede-se que haja repercussões para o lado BT do ST. Adicionalmente, os controladores de tensão e corrente AC tiveram os seus erros próximos de zero o que salienta a correta operação do ST.



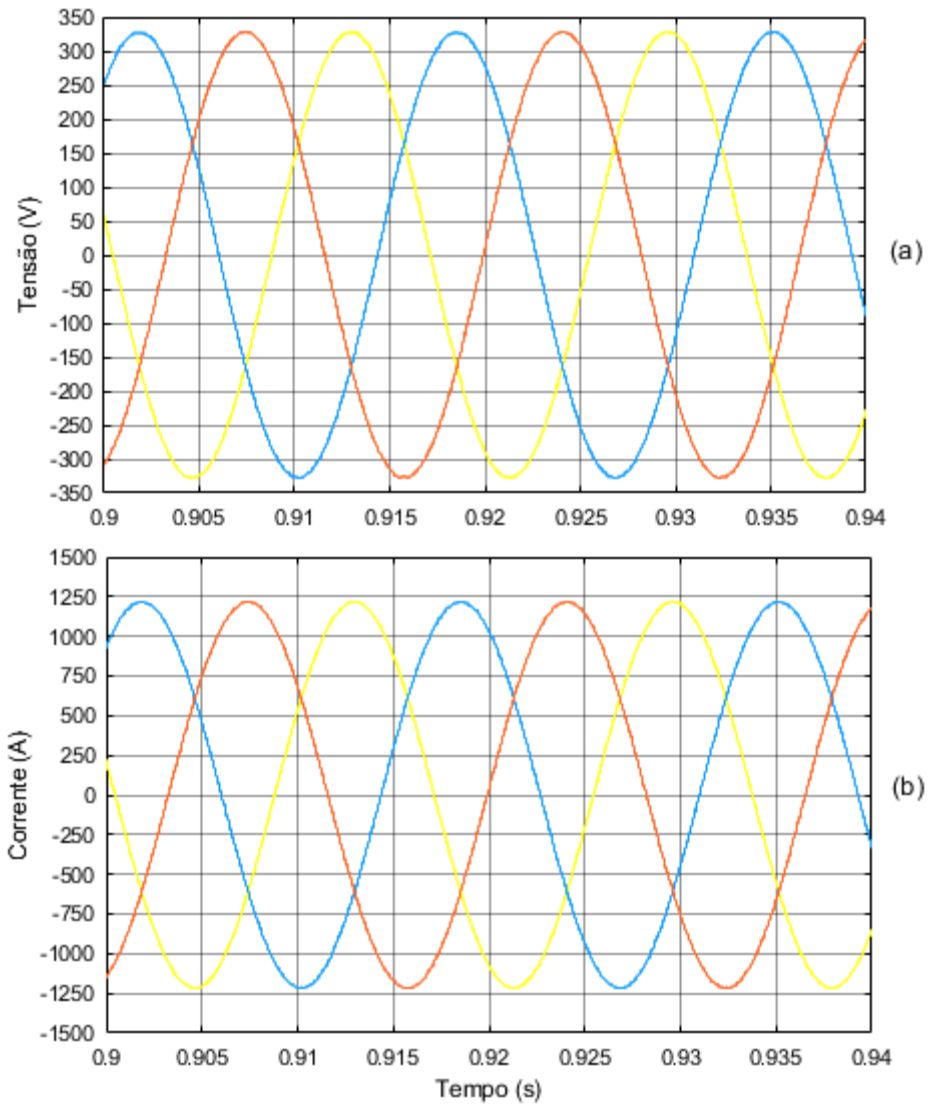


Figura 4.20: a) Tensão AC da rede BT; b) Corrente AC da rede BT (cenário5)

Deste cenário pode-se concluir que o ST foi capaz de desacoplar a potência reativa entre os seus terminais, e operar corretamente mantendo todas as tensões e correntes controladas.



# 5

## **Conclusões e Trabalho Futuro**

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões e sugeridas melhorias a efetuar em dissertações futuras sobre esta matéria.

### **Conteúdo**

---

**5.1. Conclusões**

**5.2. Perspetivas de Trabalho Futuro**

## 5.1. Conclusões

Com esta dissertação pretendeu-se estudar o impacto do ST na rede de distribuição, por forma a tentar colmatar os desafios técnicos e operacionais do sistema de distribuição, bem como conseguir dar resposta às lacunas impostas pelos transformadores tradicionais.

Foi desenvolvido um transformador com uma arquitetura de 3 estágios de conversão, onde se usou uma associação de 4 módulos monofásicos e um transformador de alta frequência em cada uma das três fases do ST. Além dos filtros DC e AC, foram também criados controladores de corrente DC e AC e de tensão DC e AC para controlar as correntes e tensões de todo o sistema em análise.

Em primeira instância, analisou-se o comportamento do ST perante condições normais de operação da rede BT e MT. Para este cenário foram estudados vários níveis de carga e foi possível constatar que tanto os controladores, como todos os outros componentes que constituem o ST, foram capazes de operar corretamente. Porém, verificou-se que o ST apenas foi capaz de fornecer  $594\text{ kV}$  à carga da rede BT, em vez do valor dimensionado de  $630\text{ kV}$ , constituindo-se por isso uma limitação à simulação.

Contudo, nem sempre a rede se comporta de modo ideal, estando sujeita a várias perturbações, sendo que nesta tese foram analisadas duas perturbações comuns de ocorrerem. Assim, o ST foi sujeito a variações bruscas da tensão, na rede MT, em curtos períodos de tempos (uma cava de tensão de 20% e uma sobretensão de 10%, ambos durante dois períodos da rede), tendo-se comportado de acordo com o esperado em ambos os cenários. Concluiu-se deste modo que o ST foi capaz de suportar variações bruscas da tensão na rede MT, mantendo sempre a qualidade de serviço do fornecimento de correntes e tensões trifásicas sinusoidais e balanceadas à rede BT.

O ST foi também simulado, no quarto cenário, com uma rede BT com frequência de operação de  $60\text{ Hz}$ . A única alteração ocorrida foi uma diminuição do período da rede BT, continuando todos os controladores a operar corretamente. Assim, conclui-se que este ST tem uma abrangência geográfica alargada uma vez que pode ser aplicado na Europa, dado que se comporta bem perante uma frequência de operação de  $50\text{ Hz}$  (conforme constatado no cenário 1), bem como em alguns países da América do Sul, na medida em que se comportou bem perante uma rede BT de  $60\text{ Hz}$ , característica de alguns países deste continente.

Por último, foi demonstrado que o ST tem a capacidade desacoplar a potência reativa aos seus terminais pois, quando imposto pela simulação, conseguiu absorver potência reativa na rede MT sem causar interferências na rede BT, mantendo concomitantemente todo o sistema a funcionar de modo correto. Contudo, mais importante do que verificar que consegue desacoplar a potência reativa, seria estudar se o ST é capaz de regular a absorção e injeção da potência reativa a fim de controlar a tensão da rede MT.

Pode-se concluir que todos os controladores projetados para o ST funcionaram adequadamente quando submetidos tanto ao cenário normal, como aos cenários adversos, apresentando sempre uma boa capacidade de regulação. Além disso, as tensões e as correntes apresentaram formas de onda praticamente sinusoidais sem distorções apreciáveis, sendo apenas visível um reduzido tremor proveniente da comutação dos semicondutores.

## 5.2. Perspetivas de Trabalho Futuro

Depois de terminada a realização desta dissertação, surgiram novas ideias com vista a melhorar o sistema do ST proposto, nomeadamente:

- Simular o ST com mais cenários possíveis, tanto na rede MT, como na rede BT, a fim de testar o funcionamento do ST quando sujeito a outro tipo de perturbações, como por exemplo, a presença de harmónicas na rede MT;
- Perceber o que levou à limitação da potência fornecida do ST de  $594\text{ kV}$ , em vez do valor dimensionado de  $630\text{ kV}$  à carga da rede BT, tentando resolver esse mesmo problema de modo a eliminar a limitação detetada no *Simulink*;
- Reestruturar o conversor, utilizando um maior número de módulos em série em cada um dos estágios de conversão do ST, pois permitiria simular um sistema mais próximo da realidade;
- Implementar um controlador de potência reativa para a rede MT, por forma a permitir um controlo da potência reativa, absorvida ou injetada, na rede MT para os serviços auxiliares do ST na rede de distribuição.

Por fim, a própria execução do ST proposto seria uma mais-valia, visto que permitiria testar o equipamento com situações reais, que são mais benéficas do que as simulações em cenário de estudo. Tais situações iriam potenciar o desenvolvimento desta tecnologia.



# Bibliografia

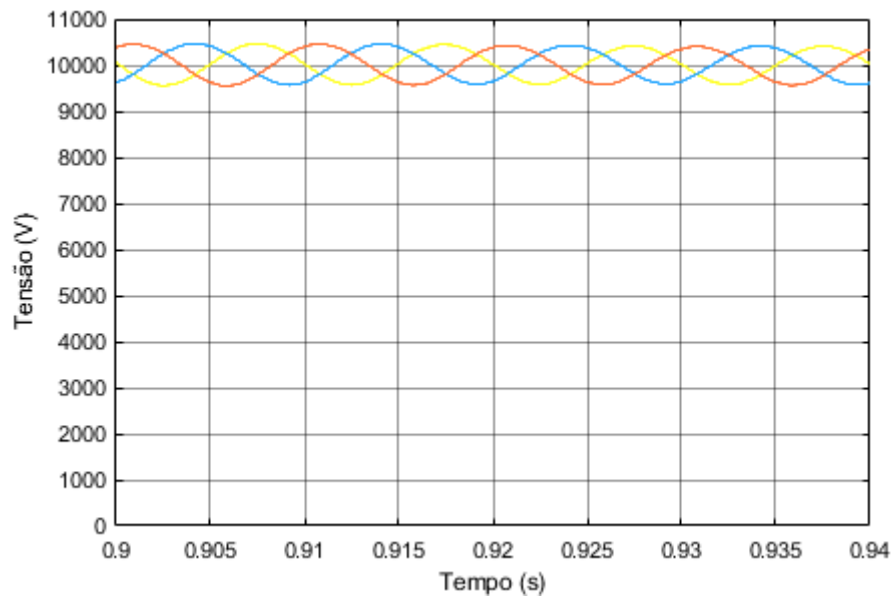
- [1] E. J. Coster, J. M. A. Myrzik, B. Kruimer e W. L. Kling, "Integration Issues of Distributed Generation in Distribution Grids," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, nº 1, pp. 28 - 39, Janeiro 2011.
- [2] M. Liserre, T. Sauter e J. Y. Hung, "Integrating Renewable Energy Sources into the Smart Power Grid," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 4, nº 1, pp. 18 - 37, Março 2010.
- [3] V. K. Sood, *HVDC and FACTS Controllers: Applications of Static Converters in Power Systems*, Springer Science & Business Media, 2004.
- [4] J. Wang, A. Q. Huang, W. Sung, Y. Liu e B. J. Baliga, "Smart grid technologies," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 3, nº 2, pp. 16 - 23, Junho 2009.
- [5] H. Wang, M. Liserre e F. Blaabjerg, "Toward Reliable Power Electronics: Challenges, Design Tools, and Opportunities," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 7, nº 2, pp. 17 - 26, Junho 2013.
- [6] M. A. e M. Liserre, "Impact of active thermal management on power electronics design," *Microelectronics Reliability*, vol. 54, nº 9 - 10, pp. 1935 - 1939, Setembro-Outubro 2014.
- [7] S. Brüske, G. De Carne e M. Liserre, "Multi-frequency power transfer in a smart transformer based distribution grid," em *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Dallas, TX, USA, 29 Outubro - 1 Novembro 2014.
- [8] B. Olek e M. Wierzbowski, "Local Energy Balancing and Ancillary Services in Low-Voltage Networks with Distributed Generation, Energy Storage, and Active Loads," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, nº 4, pp. 2499 - 2508, Abril 2015.
- [9] W. McMurray, "Power converter circuits having a high frequency link". Patente US3517300, 1968.
- [10] M. Liserre, G. Buticchi, M. Andresen, G. De Carne, L. F. Costa e Z.-X. Zou, "The Smart Transformer: Impact on the Electric Grid and Technology Challenges," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 10, nº 2, pp. 46 - 58, Junho 2016.
- [11] G. De Carne, G. Buticchi, M. Liserre, C. Yoon e F. Blaabjerg, "Voltage and current balancing in Low and Medium Voltage grid by means of Smart Transformer," em *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Denver, CO, USA, 26-30 Julho 2015.
- [12] G. De Carne, G. Buticchi, M. Liserre e C. Vournas, "Frequency-Based Overload Control of Smart Transformers," em *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, Eindhoven, Netherlands, 29 Junho - 2 Julho 2015.

- [13] V. C. Gungor, D. Sahin, T. Kocak, S. Ergut, C. Buccella, C. Cecati e G. P. Hancke, "Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 7, nº 4, pp. 529 - 539, Novembro 2011.
- [14] C. Gu, Z. Zheng, L. Xu, K. Wang e Y. Li, "Modeling and Control of a Multiport Power Electronic Transformer (PET) for Electric Traction Applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, nº 2, pp. 915 - 927, Fevereiro 2016.
- [15] M. Liserre, "Christian-Albrechts-University of Kiel," 17 Janeiro 2014. [Online]. Available: [https://www.tf.uni-kiel.de/etit/LEA-download/dl-open/presentation\\_sonderborg.pdf](https://www.tf.uni-kiel.de/etit/LEA-download/dl-open/presentation_sonderborg.pdf). [Acedido em 10 Dezembro 2020].
- [16] R. A. Alexandre, S. F. Pinto e J. J. Santana, "Energy storage system for grid connection and island operation," em *2016 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, Trento, Italy, 12-15 Sept. 2016.
- [17] R. G. Gago, S. F. Pinto e J. F. Silva, "G2V and V2G electric vehicle charger for smart grids," em *2016 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, Trento, Italy, 12-15 Sept. 2016.
- [18] G. M. Paraíso, S. F. Pinto e J. F. Silva, "Modelling and nonlinear control of Dual-Active Bridge converters for DC microgrids," em *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Lisboa, Portugal, 2019.
- [19] F. Silva, S. Pinto e J. Santana, *Conversores Comutados para Energias Renováveis*, 2016/2017.
- [20] S. Pinto, J. F. Silva, F. Silva e P. Frade, *Design of a Virtual Lab to Evaluate and Mitigate Power Quality Problems Introduced by Microgeneration*, 2011.
- [21] P. Fernandes, *Transformador Electrónico de Potência para Aplicações em Sistemas de Energia*, Tese de Mestardo, IST, 2014.
- [22] D. Faria e H. Jorge, *Qualidade de Energia Eléctrica – Caracterização de Cavas de Tensão em Redes MT*, 2013.
- [23] P. E. Networks, *EN 50160 - Voltage characteristics of electricity supplied*, 2010.
- [24] C. Patrao, J. Delgado e A. Almeida, *Manual de Qualidade da Energia Eléctrica*, Portuguese National Utility - EDP Distribuição, Dezembro 2005.

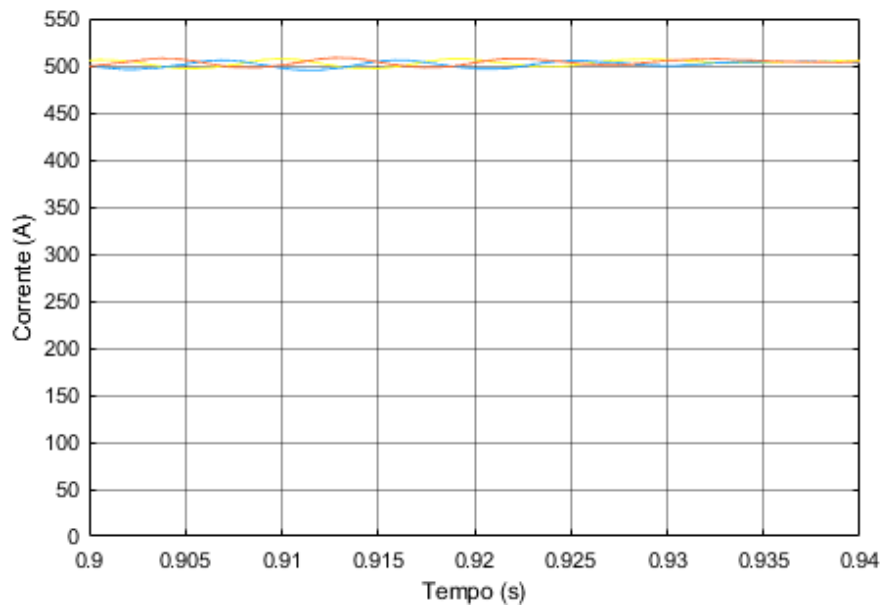


# Anexos

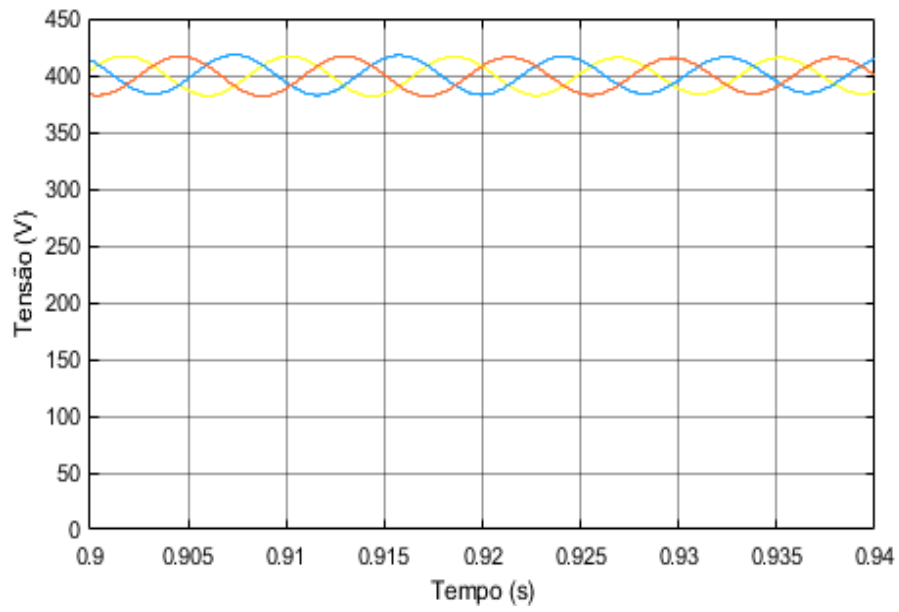
## Anexo 1: Gráficos auxiliares para o cenário 4



Tensão nos condensadores dos filtros DC do lado MT (cenário 4)

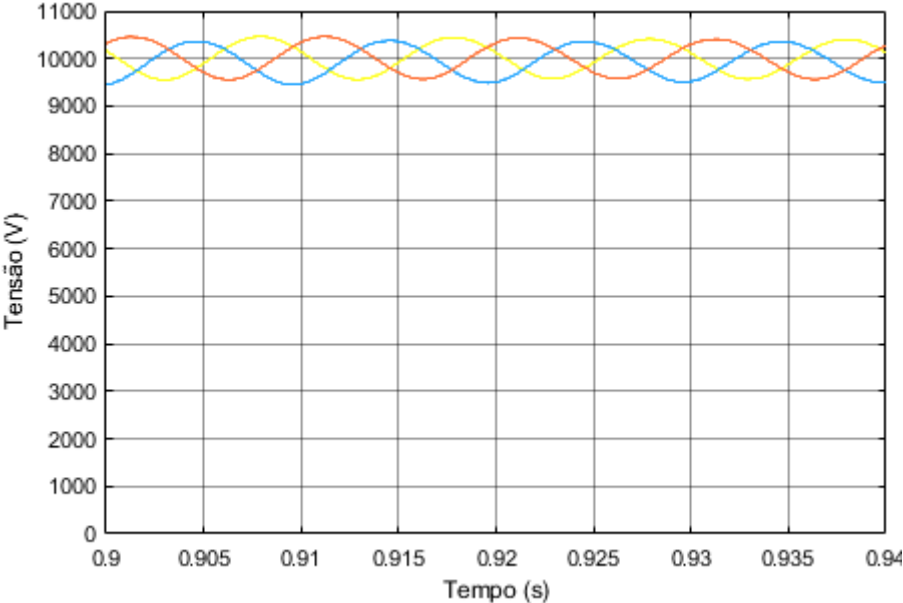


Corrente DC à saída do andar de conversão DC/DC (cenário 4)

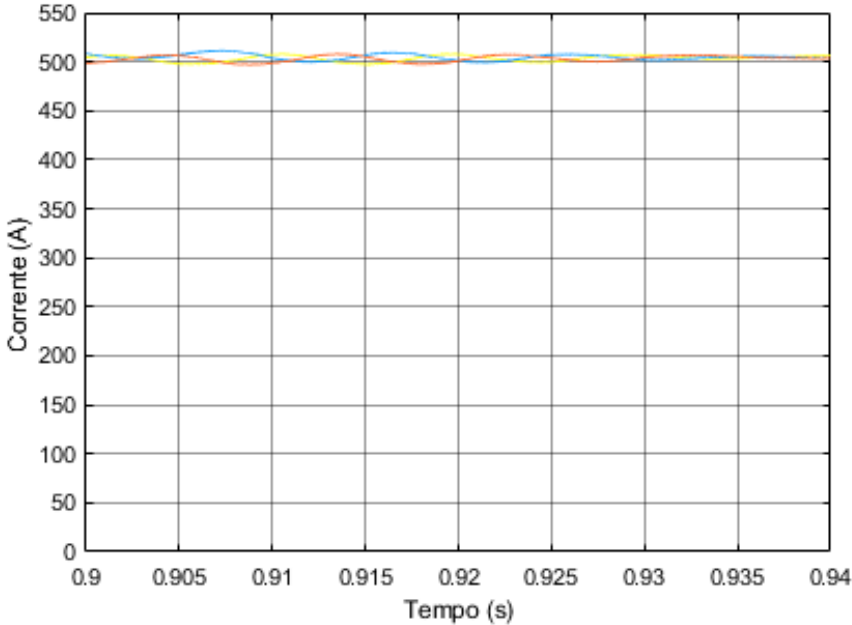


Tensão nos condensadores dos filtros DC do lado BT (cenário 4)

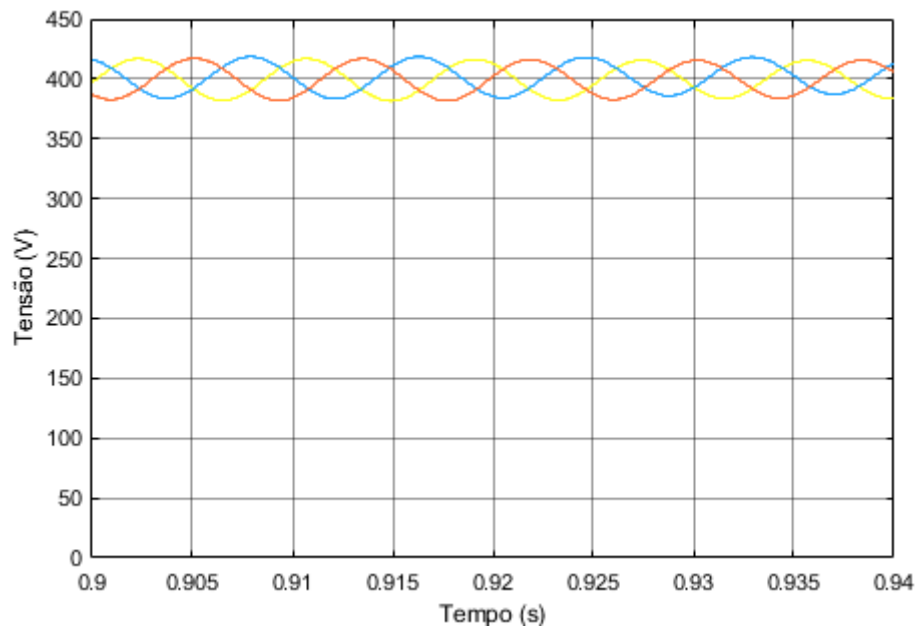
## Anexo 2: Gráficos auxiliares para o cenário 5



Tensão nos condensadores dos filtros DC do lado MT (cenário 5)



Corrente DC à saída do andar de conversão DC/DC (cenário 5)



Tensão nos condensadores dos filtros DC do lado BT (cenário 5)