

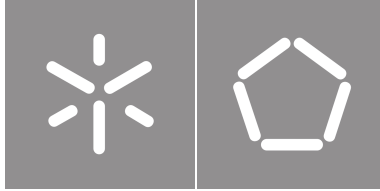


Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Iryna Kaplunska

Desenvolvimento de um Conversor *Triple Active Bridge* para Interface com Fontes de Energias Renováveis



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Iryna Kaplunska

Desenvolvimento de um Conversor *Triple Active Bridge* para Interface com Fontes de Energias Renováveis

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Eletrónica Industrial e Computadores

Sistemas de Energia

Trabalho efetuado sob a orientação de:

Professor Doutor José Gabriel Oliveira Pinto

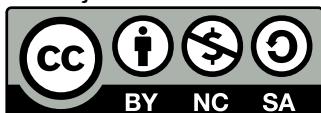
DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositoriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Creative Commons Atribuição-NãoComercial-Compartilhalgual 4.0 Internacional CC BY-NC-SA 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.pt>

Agradecimentos

O desenvolvimento desta dissertação teve a contribuição de muitas pessoas, as quais eu gostava de agradecer com toda a sinceridade.

Em primeiro lugar, ao meu orientador, professor Doutor Gabriel Pinto, por acompanhar dedicadamente desde o início o desenvolvimento desta dissertação. Pelo tempo e paciência que sempre conseguiu disponibilizar. Além disso, por todo o conhecimento que conseguiu transmitir durante este período de orientação e também nas Unidades Curriculares lecionadas pelo mesmo.

Ao professor Doutor João Luiz Afonso e ao professor Doutor Vítor Monteiro pelo conhecimento transmitido nas Unidades Curriculares lecionadas.

Em especial, ao professor Luis Barros, pela ajuda prestada em diversos problemas durante a realização desta dissertação. Da boa disposição e, não menos importante, do apoio nas situações mais difíceis.

Ao engenheiro Carlos Martins por estar sempre a transmitir boa disposição e ambiente no laboratório. Ao engenheiro José Cunha pelas explicações de conceitos relevantes para a realização desta dissertação.

Aos meus colegas do laboratório, em particular ao Nuno Rodrigues, pelo companheirismo e apoio a todos os níveis. Ao Ricardo Coelho e ao Pedro Xavier, pela ajuda prestada na resolução de muitos problemas.

Ao departamento técnico, nomeadamente ao Carlos Torres e Paulo Silva pela ajuda com as técnicas de soldadura mais peculiares.

Aos meus pais por me terem apoiado durante todo o percurso académico.

E com muito carinho ao meu namorado e as minhas amigas de longa data mais próximas.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

(Local)

(Data)

(Iryna Kaplunska)

Resumo

Desenvolvimento de um Conversor Triple Active Bridge para Interface com Fontes de Energias Renováveis

Hoje em dia, há um aumento exponencial na substituição de combustíveis fósseis por energias renováveis, sendo que são feitos inúmeros investimentos na melhoria e avanço tecnológico deste ramo. Nas cidades desenvolvidas, é possível verificar a presença de fontes renováveis em grande abundância, que acabam por fazer parte dos novos edifícios, casas e outros tipos de estruturas. Em particular, a energia elétrica proveniente dos painéis solares fotovoltaicos é das mais incluídas nas aglomerações urbanas. Como tal, é importante conseguir o melhor aproveitamento e gestão da energia proveniente desta fonte.

Para conseguir o melhor aproveitamento de energias tem que haver uma gestão eficiente. Assim sendo, durante os períodos de menor consumo, pode ser efetuado o armazenamento de energia proveniente dos painéis solares em sistemas de armazenamento. Quando é requerido um maior consumo de energia elétrica, pode ser utilizada a energia armazenada nas baterias diretamente pela habitação. Neste contexto, esta dissertação aborda o desenvolvimento de um conversor Corrente Contínua (CC) -CC *Triple Active Bridge* (TAB) com interface com fontes de energias renováveis que se destina à inserção na produção de energia renovável para autoconsumo.

São abordadas algumas topologias possíveis para a implementação do conversor e a sua aplicação em diferentes contextos. Após uma análise detalhada do problema e dos conceitos relevantes para a sua implementação, é realizado um estudo recorrendo à ferramenta de simulação *Power Simulation* (PSIM), onde são validados alguns dos algoritmos relevantes para a implementação, como o *Maximum Power Point Tracker* (MPPT), a técnica *phase-shift* e o Proporcional Integral (PI). Como também é feita a validação das indutâncias associadas ao transformador e o algoritmo de *Phase Locked Loop* (PLL) que permite sincronização com a rede elétrica.

Posteriormente, são descritos detalhadamente os processos de implementação de *hardware*, das ferramentas utilizadas, como, por exemplo, o *Altium Printed Circuit Board* (PCB) *Designer* para realizar as placas de circuito impresso e o *Code Composer Studio* para programar a *Digital Signal Controller* (DSC) TMS320F28379D. Por fim, são apresentados alguns resultados obtidos durante os testes ao protótipo.

Palavras-chave: MPPT, Painéis Solares Fotovoltaicos, Sistemas de Armazenamento, TAB, Sistemas de Autoconsumo.

Abstract

Development of a Triple Active Bridge Converter for interface with renewable energy sources

Nowadays, as never before, there is an exponential increase in fossil fuel substitution by renewable energies sources. Numerous investments are made in technological improvement and advancement of this branch. In recent years, many companies based on renewable energy have been created. In developed cities it is possible to verify the presence of renewable sources in great abundance, become part of new buildings, houses and other types of constructed structures. In particular, the energy from photovoltaic solar panels is one of the most included in urban agglomerations. It is important to get the best extraction and management of electrical energy from this source.

To achieve the best energy use, there must be involved an intelligent management. During periods of low energy consumption, the energy from solar panels can be stored in a storage system. However, when higher electrical energy consumption is required, it will be used the energy stored in the batteries directly in the house.

With this in mind, this document covers the development of a converter TAB with interface with renewable energy sources intended for self-consumption.

In which are mentioned some possible topologies for the converter implementation and possible application of TAB converter.

After the detailed analyses of the problem and relevant concepts for the implementation, some algorithms are studied like the MPPT algorithm, the phase-shift algorithm and the PI control with the use of PSIM software. Also, the inductances associated to the transformer are validated for the prototype. And the PLL algorithm is studied for the synchronization with the grid.

Afterward, is described in detail the process of the hardware implementation, the tools that are used like Altium PCB Designer and Code Composer Studio for DSC TMS320F28379D programming. Lastly, some results are discussed.

Keywords: MPPT, Photovoltaic Solar Panels, Self-Consumption, Storage Systems, TAB.

Índice

Índice de Figuras	x
Índice de Tabelas	xiv
Siglas	xvi
1 Introdução	1
1.1 Introdução	1
1.2 Influência de energia solar fotovoltaica em Portugal	2
1.3 Influência de energia solar fotovoltaica no Mundo	3
1.4 Investimentos anuais	4
1.5 Enquadramento e motivações	5
1.6 Objetivos	6
1.6.1 Realização de simulações	6
1.6.2 Implementação do Conversor	6
1.7 Organização do Documento	6
1.8 Conclusão	7
2 Células Solares Fotovoltaicas e Armazenamento de Energia	8
2.1 Introdução	8
2.2 Categorias de células solares fotovoltaicas	8
2.2.1 Painel solar fotovoltaico de silício monocristalino	9
2.2.2 Painel solar fotovoltaico de silício policristalino	9
2.3 Armazenamento de energia	10
2.4 Conclusão	14
3 Conversores de Eletrónica de Potência e Técnicas de Controlo	15
3.1 Introdução	15

3.2	Inversor de ponte completa	15
3.3	<i>Double Active Bridge</i>	16
3.4	<i>Triple Active Bridge</i>	17
3.4.1	Aplicação do TAB	18
3.4.2	Configurações modulares do conversor TAB	21
3.5	Conversor bidirecional de meias pontes de três portas	22
3.6	<i>Neutral Point Clamped TAB</i>	23
3.7	Tipos de isolamento nos conversores de três portas	24
3.8	Técnicas de Modulação	26
3.8.1	<i>Sinusoidal Pulse Width Modulation</i> Bipolar	26
3.8.2	<i>Phase-shift Pulse-Width Modulation (PWM)</i>	27
3.9	Algoritmo de seguimento de ponto de potência máxima	28
3.9.1	Algoritmo de perturbação e observação	28
3.9.2	Algoritmo de condutância incremental	29
3.9.3	Algoritmo de circuito aberto	30
3.10	Conclusão	31
4	Simulação da topologia TAB	32
4.1	Introdução	32
4.2	Princípio de funcionamento	32
4.3	Simulação da topologia proposta	34
4.4	Painel solar fotovoltaico	35
4.5	Dimensionamento do banco de baterias	35
4.6	Técnica de controlo de sintonização com a rede - PLL	36
4.7	Simulação do algoritmo de MPPT	38
4.8	Algoritmo de <i>Phase-Shift</i>	40
4.9	Conclusões	42
5	Implementação da topologia TAB	43
5.1	Introdução	43
5.2	Parâmetros do sistema	43
5.3	Dimensionamento do transformador	45
5.3.1	Efeito de corpo	46
5.3.2	Secção do fio	47
5.3.3	Teste ao Transformador	47
5.4	Proteções	49
5.5	Sensores de tensão e de corrente	50
5.5.1	Sensor de tensão	50

5.5.2	Sensor de corrente	52
5.6	Regulador de Tensão 12 V	52
5.7	Pontes H e circuito de <i>drive</i>	53
5.8	<i>Analog to Digital Converter</i> (ADC) externo	56
5.9	Plataforma para o DSC	61
5.10	Implementação do <i>software</i>	64
5.11	Conclusão	66
6	Resultados experimentais	67
6.1	Introdução	67
6.2	Linearização dos sensores	67
6.3	Funcionamento no modo <i>Double Active Bridge</i>	68
6.4	Funcionamento no modo <i>Triple Active Bridge</i>	72
6.5	Validação do algoritmo de MPPT	72
6.6	Conclusão	75
7	Conclusão	76
7.1	Conclusão	76
7.2	Trabalhos Futuros	78
	Bibliografia	80

Índice de Figuras

1	Capacidade instalada em Portugal de energias renováveis [3].	2
2	Capacidade Instalada de Energia Solar em Portugal [3].	3
3	Capacidade Instalada de Energia Solar no Mundo [3].	4
4	Investimentos realizados mundialmente em diversos setores de energia renovável [3].	5
5	Diferentes categorias de painéis solares fotovoltaicos.	8
6	Painel solar monocristalino [8].	9
7	Painel solar policristalino [8].	10
8	Evolução das instalações de armazenamento de energia acumulada em todo o mundo [11].	11
9	Circuito equivalente do modelo de uma bateria.	13
10	Circuito de Thevenin equivalente do modelo de uma bateria.	14
11	Circuito de um inversor de ponte completa.	16
12	Esquema geral do <i>Double Active Bridge</i> (DAB).	17
13	Esquema geral do TAB.	18
14	Aplicação do TAB numa <i>microgrid</i>	19
15	Aplicação do TAB num avião	19
16	Aplicação do TAB numa <i>Uninterruptible Power Supply</i> (UPS).	20
17	Aplicação do TAB <i>Data Center</i>	21
18	Ligação modular com ligação do sistema de baterias em paralelo.	22
19	Ligação modular com ligação do sistema de baterias independente.	22
20	Esquemático do conversor bidirecional de meias pontes de três portos.	23
21	Exemplo da configuração de um <i>Neutral Point Clamped</i> (NPC) TAB.	24
22	Conversor de três portas não isolado.	24
23	Conversor de três portas parcialmente isolado.	25
24	Conversor de três portas com isolamento [25].	25
25	Possível aplicação da modulação de PWM.	26
26	Princípio de funcionamento da modulação <i>phase-shift</i>	27

27	Fluxograma do algoritmo de MPPT de perturbação e observação.	29
28	Fluxograma do algoritmo de MPPT para condutância incremental	30
29	Fluxograma do algoritmo de MPPT para tensão constante.	31
30	Esquemático de um TAB.	33
31	Formas de onda dos modos de operação do TAB.	34
32	Esquemático em PSIM do TAB.	34
33	Características do módulo KC200GHT-2 utilizado no modelo de simulação do PSIM.	35
34	Diagrama de blocos do algoritmo da PLL.	37
35	Resultado da simulação da PLL :(a) sem distorção da rede elétrica; (b) com distorção.	37
36	Tensão de saída da PLL e da rede elétrica: (a): frequência fundamental de 49,5 Hz; (b) frequência fundamental de 50,5 Hz.	38
37	Implementação do algoritmo de MPPT recorrendo ao conversor <i>step-up</i>	38
38	Resposta do algoritmo de MPPT implementado no conversor <i>Step-up</i>	39
39	Potência disponível no painel solar fotovoltaico vs Potência extraída com o algoritmo de MPPT.	39
40	Potência disponível nos painéis solares vs Potência transferida.	40
41	Ângulos de desfasamento.	40
42	Ondas de PWM que acionam os semicondutores.	41
43	Ondas na saída dos conversores CC-Corrente Alternada (CA).	41
44	Tensão e corrente a saída do conversor CC-CA no enrolamento dos painéis solares fotovoltaicos.	42
45	Protótipo final do TAB.	44
46	Circuito equivalente do transformador na topologia de TAB.	45
47	Transformador implementado.	47
48	Tensão nos três enrolamentos do transformador de alta frequência.	48
49	Botoeira utilizada no circuito de proteção.	49
50	Caixa de controlo dos PWM e do <i>reset</i> do sistema.	50
51	Sensor de tensão CYHVS5/25A.	51
52	Esquemático do sensor de tensão.	51
53	Sensor de corrente LA 100-P.	52
54	Esquemático do regulador de tensão de 12 V.	53
55	Circuito do regulador de tensão de 12 V.	53
56	Integração da Ponte H e do circuito de <i>drive</i>	54
57	<i>Layout</i> da PCB do circuito de <i>drive</i> no Altium PCB Designer.	55
58	Sinais de PWM para controlo de um braço da ponte H.	55
59	Desempenho de uma ponte H com a carga ligada.	56
60	Primeira camada de sinal do ADC externo no Altium PCB Designer.	57

61	Segunda camada <i>Ground</i> (GND) do ADC externo no Altium PCB Designer.	57
62	Terceira camada de Potência do ADC externo no Altium PCB Designer.	58
63	Quarta camada GND do ADC externo no Altium PCB Designer.	58
64	Modelo 3D ADC externo do ADC externo no Altium PCB Designer.	59
65	PCB final do ADC externo.	59
66	Esquemático do filtro passa-baixo de segunda ordem.	60
67	Esquemático do circuito de detecção de erro.	61
68	<i>Layout</i> da PCB da plataforma para a DSC no Altium PCB Designer.	62
69	Visualização 3D da plataforma para a DSC no Altium PCB Designer.	63
70	PCB da plataforma para a DSC.	63
71	Ambiente de trabalho do Code Composer Studio.	64
72	Demonstração dos valores de ADC lidos pelo DSC.	65
73	Linearização dos valores de tensão lidos em função do valor digital correspondente. . .	67
74	Esquemático do teste realizado no modo DAB.	68
75	Resultado experimental no modo DAB entre a rede domestica e o sistema de armazenamento. Tensões a saída do conversor CC-CA e corrente de entrada do enrolamento do sistema de armazenamento.	69
76	Resultado experimental ampliado no modo DAB entre a rede domestica e o sistema de armazenamento com desfasamento de 15°. Tensões à saída do conversor CC-CA e corrente de entrada do enrolamento do sistema de armazenamento.	69
77	Resultado experimental no modo DAB entre a rede domestica e o sistema de armazenamento com desfasamento de 30°. Tensões à saída do conversor CC-CA e corrente de entrada do enrolamento do sistema de armazenamento.	70
78	Resultado experimental ampliado no modo DAB entre a rede domestica e o sistema de armazenamento com desfasamento de 30°. Tensões à saída do conversor CC-CA e corrente de entrada do enrolamento do sistema de armazenamento.	70
79	Resultado experimental no modo DAB entre a rede domestica e o com desfasamento de 15°. Tensões à saída do conversor CC-CA e corrente de entrada do enrolamento do painel solar.	71
80	Resultado experimental ampliado no modo DAB entre a rede domestica e o com desfasamento de 15°. Tensões à saída do conversor CC-CA e corrente de entrada do enrolamento do painel solar.	71
81	Resultado experimental no modo TAB sem desfasamentos. Tensões à saída do conversor CC-CA e corrente de entrada do enrolamento do painel solar.	72
82	Resultado experimental ampliado no modo TAB com desfasamentos nos enrolamentos do secundário de 10° e 30° relativamente à referência. Tensões à saída do conversor CC-CA e corrente de entrada do enrolamento do painel solar.	73
83	Esquemático para implementar o teste do algoritmo MPPT.	73

84	Resultados obtidos com o algoritmo de MPPT de perturbação e observação. Tensão aos terminais do reóstato e a saída do conversor CC-CA.	74
85	Resultado do desfasamento obtido com o algoritmo de MPPT de perturbação e observação. Tensões à saída do conversor CC-CA.	74

Índice de Tabelas

1	Tabela de estados do inversor de ponte completa.	16
2	Parâmetros de funcionamento do protótipo.	43
3	Resultado dos testes ao transformador recorrendo à ponte RLC.	49
4	Resistências utilizadas nos sensores de tensão.	51
5	Comparação dos <i>Insulated-Gate Bipolar Transistor</i> (IGBT)s - IKW40N120H3 (Infineon) e IXFH42N50P2 (IXIS).	53
6	Valores máximos para as variáveis de controlo.	61
7	Valores digitais correspondentes aos respetivos ângulos.	65

Índice de Listagens

1	Código C do algoritmo de MPPT.	66
---	--	----

Siglas

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
BESS	<i>Battery Energy Storage System</i>
BNEF	BloombergNEF
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Continua
CMOS	<i>Complementary Metal–Oxide–Semiconductor</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
DAB	<i>Double Active Bridge</i>
DAC	<i>Digital to Analog Converter</i>
DSC	<i>Digital Signal Controller</i>
GEE	Gases com Efeito de Estufa
GEPE	Grupo de Eletronica de Potência e Energia
GND	<i>Ground</i>
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
IES	<i>Integrated Energy Systems</i>
IGBT	<i>Insulated-Gate Bipolar Transistor</i>
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
MLT	<i>Mean Length per Turn</i>
MOSFET	<i>Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor</i>

MPP	<i>Maximum Power Point</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracker</i>
NPC	<i>Neutral Point Clamped</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PI	<i>Proportional Integral</i>
PLL	<i>Phase Locked Loop</i>
PSIM	<i>Power Simulation</i>
PV	<i>PhotoVoltaics</i>
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i>
RECAI	<i>Renewable Energy Country Attractiveness Index</i>
SOC	<i>State Of Charge</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
TAB	<i>Triple Active Bridge</i>
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
ZVS	<i>Zero Voltage Switching</i>

Introdução

1.1 Introdução

Nos últimos anos foi possível observar algumas das fraquezas e vulnerabilidades do sistema energético dependente maioritariamente dos combustíveis fósseis. Tanto no setor económico, como também no social foram sentidas alterações e preocupações.

A procura de energia em termos globais visa aumentar mais do que 30% ao longo dos próximos 20 anos. Por outro lado, um dos principais desafios dos dias de hoje é reduzir a produção dos Gases com Efeito de Estufa (GEE) com vista em manter o aquecimento global abaixo dos 2 °C. A energia renovável tem sido uma fonte competitiva com uma forte contribuição para o crescimento do produto interno bruto, além de atenuar os potenciais impactos na economia que as alterações climáticas podem trazer. A transição energética é possível através de tecnologia informativa e inteligente, estruturas políticas sólidas e de um mercado confiável.

O desenvolvimento das energias renováveis é indispensável para cumprir as metas climáticas sem desacelerar o crescimento económico e reduzir o bem-estar da população. De acordo com a *International Renewable Energy Agency* (IRENA), duplicar a quota de energias renováveis até 2030 pode resultar em cerca de metade das reduções de emissões exigidas e, com a eficiência energética, manter o aumento médio da temperatura abaixo de 2 °C, evitando alterações climáticas bruscas [1].

As tecnologias de energia renovável são vistas não só como ferramentas para atenuar as alterações climáticas, mas também como investimentos que podem proporcionar benefícios económicos diretos e indiretos. A energia renovável pode reduzir a dependência de combustíveis importados, no caso dos países que não possuem recursos fósseis. Do mesmo modo, é possível melhorar os desequilíbrios comerciais bem como a segurança energética, impulsionar o desenvolvimento económico e aumentar postos de emprego.

Os baixos custos das tecnologias das energias renováveis proporcionam uma transição energética menos dispendiosa do que a alternativa. Esta é a razão pela qual um número crescente de empresas privadas optam por energias renováveis para satisfazer as suas necessidades energéticas, incluindo algumas das maiores do mundo, como a Apple, Ikea, Amazon, Wal-Mart e Lego [2].

1.2 Influência de energia solar fotovoltaica em Portugal

O desenvolvimento e produção de energias renováveis tem um papel fundamental em Portugal, uma vez que, o país não produz, nem explora recursos fósseis. Por outro lado, tendo em conta que Portugal possui um território apropriado e favorecido para a exploração de recursos energéticos renováveis provenientes do sol, do vento, dos rios, ondas e biomassa. Existem condições favoráveis para a exploração de energia solar fotovoltaica em particular, devido à elevada exposição solar.

Como se pode verificar na Figura 1, houve um aumento significativo nos últimos 10 anos de exploração em todos os setores no que se deve às energias renováveis. Também um forte indicador, a nível global, são as maiores necessidades energéticas, as indústrias crescem cada vez mais e os processos autónomos tornam a produção mais simples e rápida, proporcionando uma maior ambição de produção e investimentos nestas áreas. Por outro lado, as necessidades da população sofreram um aumento devido aos gastos energéticos, incluindo um maior número de eletrodomésticos e maior cobertura das instalações elétricas e, não menos importante, o aparecimento dos carros elétricos, que tendem a conquistar o mercado e aumentar os consumos de energia elétrica mundialmente.

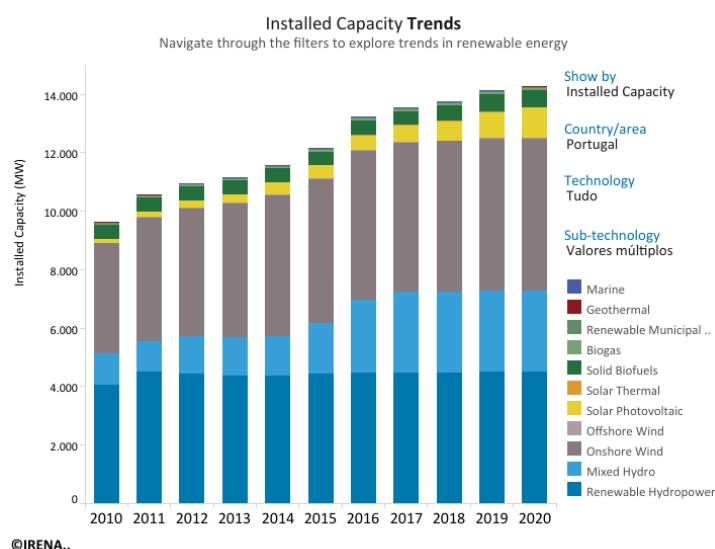


Figura 1: Capacidade instalada em Portugal de energias renováveis [3].

A exploração da energia solar fotovoltaica em Portugal tem aumentado significativamente, como se pode comprovar através da Figura 2. No ano de 2010, Portugal tinha uma capacidade instalada de 134 MW. Entretanto, em 2020 este número alcançou 1025 MW. Em 2021 foram gerados 42403 GWh de eletricidade em Portugal Continental, dos quais 64,8% foram provenientes de energias renováveis. Em Novembro de 2021 a percentagem de geração de eletricidade através de fontes de energia renovável foi de 58,0%(2310 GWh). Por outro lado, no que toca aos eletroprodutores térmicos fósseis representam, neste momento, uma minoria de 38,3% (1526 GWh) [4].

Relativamente às ilhas, atualmente, todas as ilhas habitadas produzem energia elétrica majoritariamente a partir de fontes renováveis. Para o caso das ilhas, é favorável a combinação de armazenamento de energia com a aplicação de micro-rede. A inclusão do sistema de armazenamento pode proporcionar a regularização da frequência e da tensão da rede elétrica da ilha, sendo que é acompanhada pelo conversor, resultando na melhoria da estabilidade.

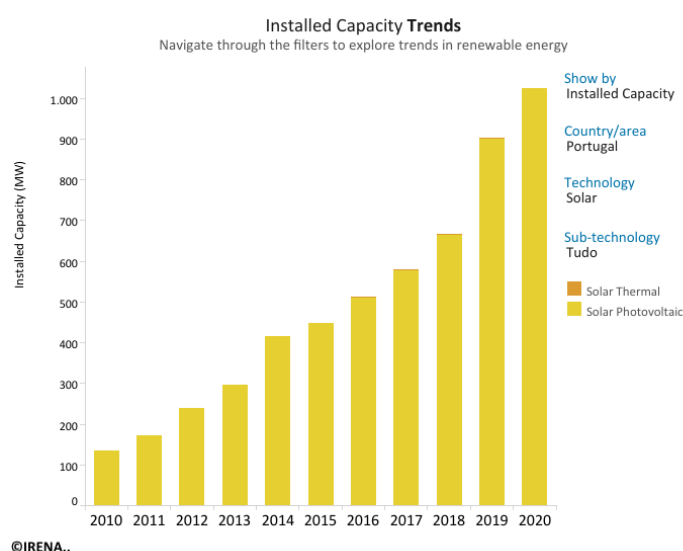


Figura 2: Capacidade Instalada de Energia Solar em Portugal [3].

1.3 Influência de energia solar fotovoltaica no Mundo

Nos últimos anos é notório o aumento da produção de energia renovável e em particular a energia solar fotovoltaica. Tendo em vista o aumento dos preços do petróleo nas últimas décadas, aumentaram os apoios em termos governamentais e de instituições financeiras.

Em maio de 2021, os Estados Unidos da América foi o país que apresentou o *Renewable Energy Country Attractiveness Index* (RECAI) mais alto, segundo a *Ernest & Young* na 57^a edição. Tendo como objetivo afastar o país dos combustíveis fósseis e reativar do acordo Paris. Nesta lista, Portugal encontra-se no 21^o lugar, o que é um resultado satisfatório.

Apesar do impacto económico causado pelo COVID-19, as metas de meio ambiente, sustentabilidade e governança são cada vez mais relevantes para os investidores. Os investimentos em energia renovável aumentaram cerca de 2% mundialmente, somando os 303,5 mil milhões de dólares [5], [6].

Quanto à energia solar fotovoltaica, mundialmente, o crescimento é muito notório. Se em 2010 a capacidade instalada era de 40.334 MW, em 2020 o valor apresentado é de 709.674 MW. Estes números podem ser justificados pela evolução da tecnologia que proporcionou a produção de produtos mais fiáveis

e de maior durabilidade. Em geral, os painéis solares fotovoltaicos duram cerca de 30 anos, o que se pode tornar um tempo suficiente para compensar o investimento inicial realizado. O desenvolvimento tecnológico também proporcionou uma diminuição no custo dos painéis solares fotovoltaicos, tornando esta forma de obter energia uma das mais baratas e atrativas para a população.

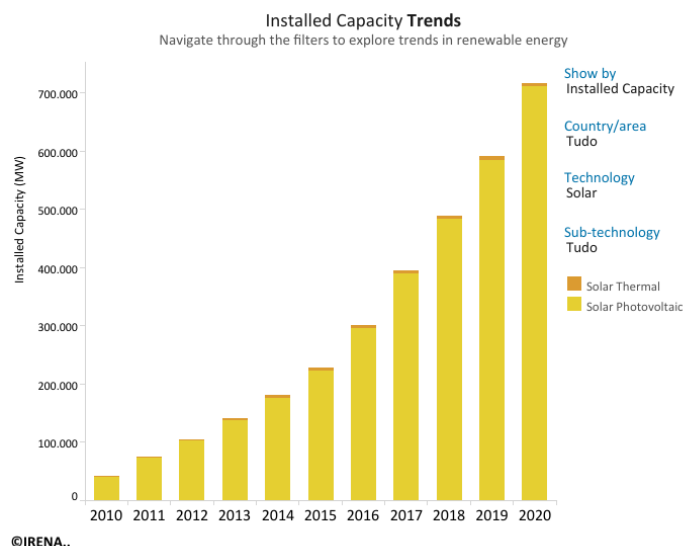


Figura 3: Capacidade Instalada de Energia Solar no Mundo [3].

1.4 Investimentos anuais

As energias renováveis tornaram-se num bom recurso de investimento. O investimento nas energias renováveis cresceu de menos de 50 mil milhões de dólares por ano em 2004 para cerca de 300 mil milhões de dólares por ano nos últimos anos, excedendo os investimentos nos combustíveis fósseis por um fator de 3 em 2018. Considera-se que, os investimentos nas energias renováveis estão abaixo do seu potencial.

Entre os anos 2013 e 2018 a parte principal dos investimentos foram realizados pelo setor privado que engloba mais de 80% e consiste nos desenvolvedores de projeto, instituições financeiras e comerciais. Os investimentos domésticos e individuais somam uma percentagem de 11 % em média.

Como se pode verificar na Figura 4, entre os anos 2013 e 2018 os investimentos feitos na energia solar fotovoltaica são predominantes, representando uma média de 46% dos investimentos totais. Tornando, desde modo, a energia solar fotovoltaica num dos investimentos mais relevantes da atualidade.

Existe uma previsão de investimentos para o ano de 2030, em Portugal, que pretendem criar a riqueza e bem-estar social que beneficiem a redução de emissões, promovam a transição energética, a mobilidade sustentável e a economia.

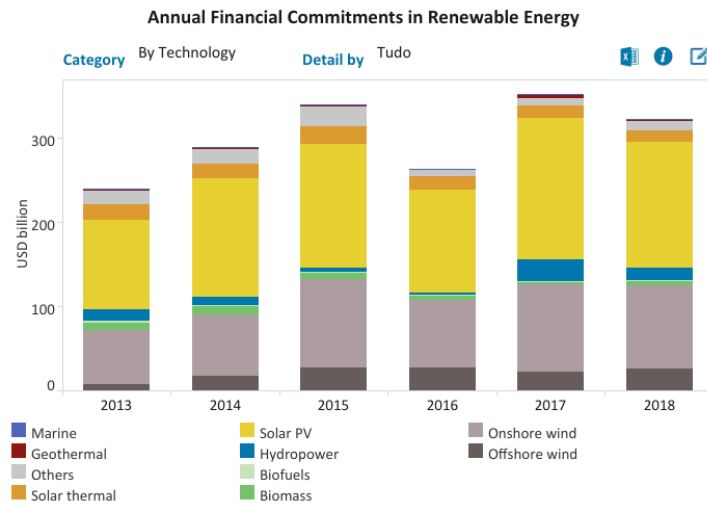


Figura 4: Investimentos realizados mundialmente em diversos setores de energia renovável [3].

As metas gerais consistem em vários pontos importantes, dentro dos quais podemos destacar a redução das emissões de gases de efeito estufa em 45% ou 55% até 2030. A diminuição de 35% do consumo de energia primária, por via de melhoria da eficiência energética, e o consumo final bruto de fontes de energia renovável, tem que consistir em 47%. O reforço de produção de Energia está orientado para reforçar a aposta nas energias renováveis. Diversificar as fontes de energia através de uma utilização crescente e sustentável de recursos endógenos, desenvolver a produção, distribuição e utilização do hidrogénio e outros gases renováveis e reduzir a dependência energética do exterior.

A renovação energética e descarbonização do parque de edifícios também é uma meta importante. Deve-se fomentar a renovação energética dos edifícios, privilegiando a eficiência energética numa perspetiva ampla e promovendo a energia de fontes renováveis, contribuindo para a sua descarbonização. Deve-se promover a instalação de bombas de calor e outros equipamentos que utilizem energia de fontes renováveis [3].

1.5 Enquadramento e motivações

A procura de energias renováveis cresceu exponencialmente nas últimas décadas, assim, o desenvolvimento desta dissertação tem como intuito melhorar o aproveitamento energético produzido por parte dos painéis solares fotovoltaicos com o recurso ao conversor *Triple Active Bridge*(TAB).

O conversor de eletrónica de potência TAB permite uma maior modularidade do sistema, é composto por três conversores de eletrónica de potência CC-CA de ponte completa. Por sua vez, o transformador de alta-frequência proporciona o desenvolvimento de uma solução compacta e energeticamente eficiente. Por outro lado, permite também uma *interface* simples entre os enrolamentos constituintes e com diferentes amplitudes de tensão.

Por outro lado, é possível a descentralização do local de produção de energia elétrica, introduzindo o conceito de *prosumers*, este conceito consiste no produtor e consumidor da própria energia elétrica.

1.6 Objetivos

O objetivo desta dissertação consiste no desenvolvimento de uma tecnologia nova que possa servir de base para trabalhos futuros e irá contribuir com o estudo de diversos conceitos, dentro dos quais se pode destacar a técnica de *phase-shift*, o projeto e desenvolvimento do transformador e as técnicas de controlo. Apesar de ser projetado um cenário de estudo que envolve a interface de painéis solares fotovoltaicos com baterias e a rede elétrica, o foco deste trabalho é no conversor *Triple Active Bridge*, ficando, o conversor CC-CA de interface à rede elétrica fora dos objetivos da dissertação.

1.6.1 Realização de simulações

Com a realização das simulações é expectável validar os seguintes tópicos:

- Validação do conversor *Double Active Bridge*(DAB);
- Validação do algoritmo de MPPT;
- Algoritmo de *phase-shift*;
- Controlo em malha fechada;
- Validação do sistema completo, ou seja, o TAB.

1.6.2 Implementação do Conversor

Esta etapa consiste na implementação do *hardware* indispensável para a realização do prototipo, como o desenvolvimento de circuitos de potência, circuitos de *drive*, o acondicionamento de sinal e os circuitos de medição.

1.7 Organização do Documento

Esta secção apresenta a estrutura do trabalho presente, isto é, os capítulos, os seus conteúdos e o seu propósito. A estrutura do documento é a seguinte:

1. **Introdução** (capítulo atual): consiste na introdução e motivações que levaram à realização desta dissertação, a sua perspetiva e importância de inclusão no mercado face às alterações das necessidades do lado dos consumidores.

2. **Células Solares Fotovoltaicas e Armazenamento de Energia:** estuda os diversos tipos de painéis solares fotovoltaicos e sistemas de armazenamento de energia.
3. **Conversores de Eletrónica de Potência e Técnicas de Controlo:** aborda as principais topologias de conversores que realizam *interface* com fontes de energias renováveis, incluindo a topologia a ser implementada e as suas aplicabilidades. Também são apresentadas as diferentes técnicas de controlo possíveis para realizar a gestão de energia do sistema.
4. **Simulação da topologia proposta:** apresenta a simulação implementada no *software* PSIM, comprovando o funcionamento dos algoritmos de *phase-shift* e MPPT. Ainda neste capítulo, é realizado o estudo e validação da técnica de sintonização com a rede PLL.
5. **Implementação da topologia proposta:** descreve todos os constituintes do protótipo implementado no laboratório do Grupo de Eletronica de Potência e Energia (GEPE), inclusive todas as PCBs utilizadas e desenvolvidas. Dentro das quais se pode destacar a plataforma para a DSC, o ADC externo e condicionamento de sinal, as pontes-H e os circuitos de *driver*. De seguida, é estudado e dimensionado o transformador de alta frequência.
6. **Resultados experimentais:** apresenta a validação dos resultados experimentais, abordando os passos de aprovação da topologia. Numa primeira fase, é realizada a validação no modo de funcionamento DAB, testando de forma isolada as transferências de energia entre os conversores. Posteriormente, procedeu-se à validação do TAB e foi possível observar a troca de energia entre as três pontes. Por fim, foram validados os algoritmos de *phase-shift* e MPPT experimentalmente.
7. **Conclusões:** proporciona um sumário e a conclusão daquilo que foi implementado acompanhado com as sugestões de trabalhos futuros para melhorar a extração de energia proveniente dos painéis solares fotovoltaicos.

1.8 Conclusão

No decorrer deste Capítulo foi possível abordar os problemas energéticos existentes e as alterações efetuadas para combater os problemas principais e os objetivos futuros que estão estabelecidos. Em particular, é de extrema preocupação os consumos energéticos mundialmente, o aquecimento global e a transição energética.

As energias renováveis tomam cada vez mais terreno no mercado energético e ajudam a satisfazer o aumento do consumo de energia. Com a relevância para esta dissertação, pode ser destacado o aumento de exploração e investimentos no ramo da energia solar fotovoltaica em Portugal e no Mundo.

Por fim, foram abordadas as motivações que levaram o desenvolvimento desta dissertação, os objetivos e a organização do documento.

Células Solares Fotovoltaicas e Armazenamento de Energia

2.1 Introdução

Este capítulo aborda as diversas tecnologias e materiais utilizados para o fabrico das células solares fotovoltaicas e, por fim, o papel indispensável do armazenamento de energia para o desenvolvimento desta dissertação.

2.2 Categorias de células solares fotovoltaicas

Presentemente, as células solares fotovoltaicas podem ser classificadas em quatro tipos, que dependem dos materiais e processos de fabrico, como ilustrado na Figura 5. O tipo mais comum de células solares fotovoltaicas consiste nas de primeira geração que engloba as células solares de silício monocristalino e policristalino. A segunda geração das células solares fotovoltaicas consiste no uso expansivo de materiais e um custo inferior de fabrico [7].

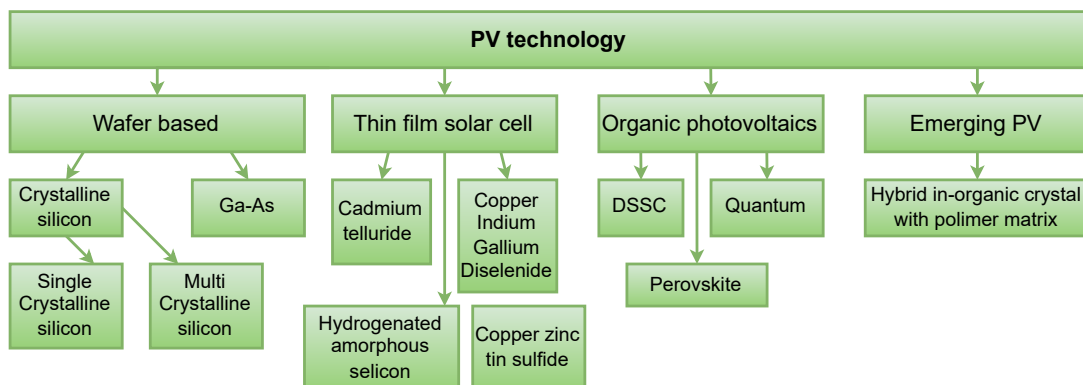


Figura 5: Diferentes categorias de painéis solares fotovoltaicos.

2.2.1 Painel solar fotovoltaico de silício monocristalino

A tecnologia monocristalina é a mais antiga entre as células fotovoltaicas da primeira geração e possui a eficiência mais alta. A aparência dos painéis solares fotovoltaicos de silício monocristalino (mono-Si) é de uma cor azul escura ou quase preta uniforme (com antirreflexo) e cinza ou azul acinzentado (sem antirreflexo), outra característica são os cantos arredondados. Durante o processo de fabrico utiliza-se a técnica de Czochralski. Os painéis fotovoltaicos fabricados com esta tecnologia apresentam uma eficiência média de 15–22%.

Uma das vantagens da produção desta categoria de painéis solares é a eficiência alta de entre as tecnologias comercialmente exploradas e viáveis. Outra vantagem é ocuparem um espaço reduzido. A vida útil dos painéis solares monocristalinos é superior a 30 anos e a garantia para esta tecnologia é de 25 anos, o que pode ser um fator determinante no ato do investimento por parte do consumidor. Em condições de pouca exposição solar funcionam melhor do que os painéis solares policristalinos. O painel solar de silício monocristalino também possui melhor comportamento em climas frios, com a presença de chuva ou nevoeiro, a célula absorve melhor a radiação.

Entre algumas das desvantagens pode ser destacado o preço mais elevado, no processo de Czochralski, que resulta em grandes lingotes cilíndricos, os quatro lados são cortados para fazer as laminais de silício, ou seja, há uma quantidade de silício desperdiçada e uma longa duração do processo de fabrico.

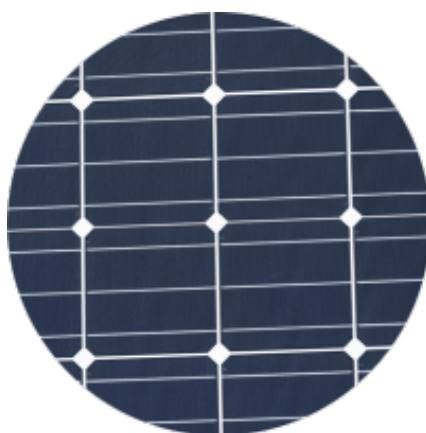


Figura 6: Painel solar monocristalino [8].

2.2.2 Painel solar fotovoltaico de silício policristalino

Os primeiros painéis solares fotovoltaicos feitos à base de silício policristalino, que também são conhecidos como polisilício (p-Si) e silício multicristalino (mc-Si), foram introduzidos no mercado em 1981. A diferença entre o silício monocristalino e policristalino consiste no método utilizado para fundir os cristais. No caso do silício policristalino usa-se a técnica de fundição de polisilício por aquecimento em forma, os cristais são fundidos em bloco, preservando a formação de múltiplos cristais. Este processo de produção

torna-se mais simples do que a produção do silício monocristalino. A eficiência energética destes painéis solares varia em média entre 14–20%.

Entre as vantagens da utilização destes painéis solares pode ser destacado o menor desperdício de silício durante a produção comparativamente com a produção do silício monocristalino e, ainda, o tempo de produção inferior. O preço destes painéis solares é relativamente mais reduzido. Igualados aos painéis solares de silício monocristalino, a vida útil destes painéis é superior a 30 anos, possuindo uma garantia de 25 anos.

Quanto às desvantagens, é possível referir que a eficiência dos painéis solares fotovoltaicos fabricados com silício policristalino é inferior aos painéis de silício monocristalino, que se deve a menor pureza do silício. Outra desvantagem relevante é o maior espaço ocupado para gerar a mesma quantidade de energia elétrica.

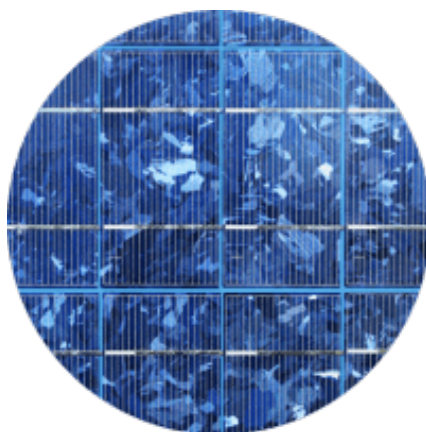


Figura 7: Painel solar policristalino [8].

2.3 Armazenamento de energia

Os sistemas fotovoltaicos consistem em sistemas ligados à rede elétrica e em sistemas autónomos. No que se deve aos sistemas autónomos, a energia produzida tem que se ajustar às necessidades energéticas. Isto deve-se ao facto de, maioritariamente, as horas de melhor produtividade energética não são as de maior procura do consumidor. Este fator leva à necessidade de um sistema de armazenamento.

É de notar que, os sistemas autónomos tomam um papel importante no desenvolvimento da tecnologia solar fotovoltaica, sendo que, podem ajudar a estabelecer melhor qualidade de vida em áreas habitáveis com difícil ou inexistente acesso à eletricidade. Por outro lado, é notório que há dias com fraca exposição solar e estes períodos precisam de ser compensados com sistemas de armazenamento de forma a aproveitar melhor a energia extraída dos painéis solares fotovoltaicos. Deste modo, é possível descentralizar a produção e consumo de energia.

Embora o armazenamento da energia solar possa não ser a opção ideal para todos os projetos de energia elétrica, a sua versatilidade torna-o ideal para muitas instalações, incluindo as que se encontram em áreas urbanas e residenciais com pouco espaço disponível. Algumas instalações como escolas, centros comunitários, centros de terceira idade, habitações de férias ou habitações distanciadas da rede elétrica podem ser pioneiras em adaptar esta topologia.

Nos últimos anos, as baterias de íões de lítio são a melhor forma de armazenar energia proveniente de fontes de energia renováveis, sendo que o lítio tem um grande potencial eletroquímico e pode acumular grandes quantidades de energia. São adaptáveis a uma gama de temperaturas bastante ampla (-20 °C a 70 °C), tem um tempo de vida consideravelmente longo, uma tensão quase constante durante a carga, são livres do efeito de memória e de materiais tóxicos. Porém, o custo elevado associado à produção e extração dos materiais ainda é um desafio. Outro fator relevante é a necessidade de incluir sistemas de controlo para evitar sobrecargas e sobreaquecimento [9], [10].

A BloombergNEF (BNEF) prevê uma redução até a metade dos custos das baterias de íões de lítio por kWh para 2030 dado ao aumento da mobilidade elétrica e necessidade de armazenamento estacionário.

A BNEF realizou um estudo que prevê a evolução das instalações de armazenamento de energia acumulada em todo o mundo que se pode verificar na Figura 8 [11].

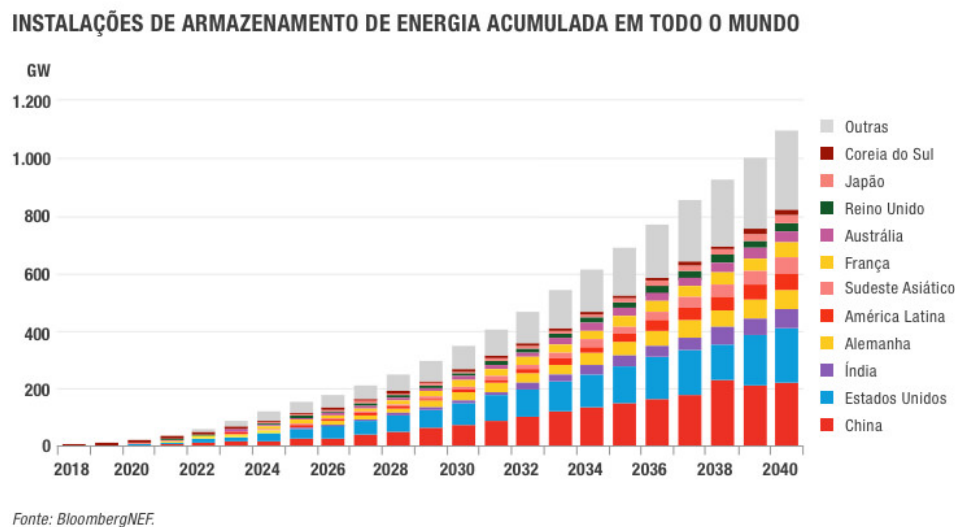


Figura 8: Evolução das instalações de armazenamento de energia acumulada em todo o mundo [11].

Para a escolha da melhor tecnologia de armazenamento de energia é necessário ter em conta vários parâmetros para realizar um estudo comparativo para a aplicação em causa. Entre estes parâmetros podem ser destacados os seguintes:

- **Capacidade de armazenamento (Ah)** — quantidade de energia que é possível armazenar após o sistema de armazenamento estar carregado.

- **Potência disponível** — constituição e dimensão do sistema de conversão da energia armazenada, estando geralmente relacionado com a potência máxima de carga ou descarga.
- **Estado de carga** — capacidade disponível num determinado instante em função da capacidade total disponível expressa em percentagem.
- **Durabilidade** — perda de desempenho das células em termos de vida útil que se baseia em função de cada ciclo de carga/descarga e ainda o tempo decorrido desde o fabrico das baterias. O principal fator de degradação deve-se ao aumento da impedância levando a uma redução da energia disponível da célula.
- **Tensão de corte** — tensão mínima, especificada pelo fabricante, até à qual a bateria pode ser descarregada sem ser danificada;
- **Efeito de memória** — Sem o devido cuidado nas cargas e descargas, as baterias que são mais propensas ao efeito, têm uma capacidade de carga cada vez menor. Quando não são descarregadas completamente até o limite inferior de tensão, nas descargas subsequentes perdem parte da sua capacidade. Este fator depende não só do tempo de armazenamento, como também da temperatura de utilização das células e está relacionado com as formações químicas no interior das baterias.

ocorre em algumas baterias mais antigas como as níquel cádmio (NiCd), enquanto em outros tipos não, como é o caso das de íon lítio. Sem o devido cuidado nas recargas, as baterias que são propensas ao efeito, parecem adquirir uma capacidade de carga cada vez menor.

Apesar de apresentarem níveis de segurança elevados, as baterias de *lithium-ion* podem apresentar perigo caso sejam usadas fora da sua faixa de operação segura, principalmente no que toca a baterias maiores. Além da necessidade de seguir os parâmetros mencionados anteriormente, existem outros critérios que tem que ser respeitados para uma utilização segura das baterias:

- **Sobrecarga** — ocorre quando uma célula é carregada para um estado de carga superior a 100%. A tensão da célula aumenta rapidamente e pode exceder os limites permitidos do dispositivo. Este fenómeno pode proporcionar a degradação das células ou até falhas energéticas. As células em causa podem ser sobrecarregadas por taxas de corrente de carga muito baixas. A sobrecarga pode levar a uma fuga térmica ou inchaço das células. Para a maioria das células a sobrecarga começa a ocorrer quando a tensão é excedida, entre 3,75 V e 4,2 V.
- **Sobredescarga** — acontece quando uma célula é descarregada para além dos 100% da profundidade da descarga. A descarga excessiva pode causar danos significativos nas células internas, tal como a dissolução da folha do ânodo. O carregamento de uma célula que foi sobredescarregada repetidamente pode levar a riscos de segurança. A tensão de descarga permitida varia entre os 1,8 V e 2,5 V por célula.

- **Temperatura elevada** — quando as células são expostas a altas temperaturas podem ocorrer várias consequências, entre as quais a degradação das células, falha do isolamento térmico, inclusive podem ser provocadas reações químicas nas células, explosões e incêndios. A maioria das células inicia o processo de degradação quando as temperaturas chegam ao intervalo de 44 °C à 55 °C, sendo as limitações de segurança estabelecidas entre os 60 °C e 100 °C.
- **Temperatura baixa** — as baterias *lithium-ion* tem um desempenho limitado, especialmente no que toca a carga em temperaturas baixas, podendo causar um curto-circuito interno. A descarga da bateria também fica limitada dado a uma alta impedância.
- **Sobrecorrente** — correntes de carga e descarga elevadas podem causar sobrecargas ou sobredescargas localizadas. As correntes elevadas também aumentam a temperatura interna. As correntes máximas permitidas variam conforme o tipo de célula, que geralmente difere para carga e descarga.
- **Idade** — a maioria das falhas associadas as baterias de *lithium-ion* aumenta com o tempo de uso. A sua durabilidade pode situar-se nos 15 anos.

Modelo elétrico de uma bateria

Os processos químicos e físicos que ocorrem nas células da bateria levam a um conjunto de comportamentos possíveis de observar. Estes fenómenos possíveis de observar existem devido à relação entre a tensão e a corrente. Para diversas aplicações é muito útil representar este sistema através de um circuito elétrico equivalente.

O modelo simplificado da bateria baseia-se numa fonte de tensão ideal para representar o circuito aberto da tensão da bateria, como ilustrado na Figura 9. A resistência interna da bateria representa o *State Of Charge* (SOC) e a temperatura e o valor da resistência interna varia conforme o carregamento em termos do mesmo SOC.

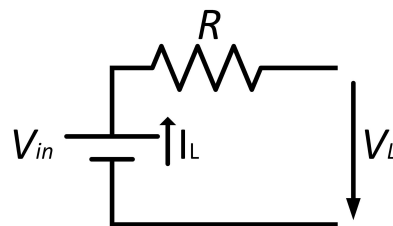


Figura 9: Circuito equivalente do modelo de uma bateria.

A Figura 10 representa o circuito mais comum de equivalente de Thevenin, tendo em consideração as características da capacidade e resistência de uma bateria. O modelo consiste numa fonte de tensão ideal U_{in} com a finalidade de representar o circuito aberto em tensão da bateria e a resistência R_2 . O condensador C_1 e a resistência R em paralelo descrevem a sobretensão da bateria. Em muitas das

aplicações a bateria é usada para taxas de carga ou descarga elevadas. Nesses casos, assumir uma fonte de tensão ideal não é o adequado. Quando a bateria opera em condições de corrente elevada, a resistência interna das células é tida em consideração. Deste modo, a tensão aos terminais deste circuito equivalente deixa de ser constante, ficando dependente da corrente da bateria. Na realidade, esta representação não é o suficiente para modelar todas as relações entre a tensão e a corrente em diversas condições.

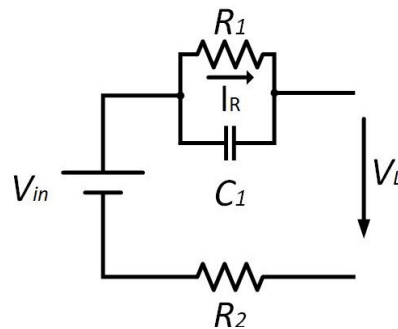


Figura 10: Circuito de Thevenin equivalente do modelo de uma bateria.

2.4 Conclusão

Este Capítulo começa por descrever essencialmente as diferentes categorias de células solares fotovoltaicas. Sendo que, nas existentes destaca-se o painel solar fotovoltaico de silício monocristalino e de silício policristalino, cada um com as suas vantagens e desvantagens. No caso do silício monocristalino, tem um melhor desempenho em condições meteorológicas menos favoráveis, mas um preço de produção mais elevado. No que toca aos painéis solares constituídos por células fotovoltaicas de silício policristalino, nas vantagens está o menor desperdício de silício e tempo de produção, uma desvantagem é o espaço ocupado superior para gerar a mesma quantidade de energia.

Posteriormente, foi abordada a evolução das instalações de armazenamento de energia mundialmente e os principais tipos de baterias utilizadas. Visto que, para a escolha da melhor tecnologia é preciso ter em conta vários parâmetros, como a capacidade de armazenamento, a potência disponível, o estado da carga e outros. Não menos importante, são os fenómenos que podem comprometer o correto funcionamento das baterias e os critérios que devem ser respeitados durante a sua utilização.

Por fim, foi possível compreender o modelo elétrico equivalente de uma bateria. Em particular, o circuito equivalente de Thevenin que serve como base para o dimensionamento do modelo de simulação da bateria.

Conversores de Eletrónica de Potência e Técnicas de Controlo

3.1 Introdução

Nos últimos anos as energias renováveis e os veículos elétricos tiveram uma grande evolução. Os painéis solares fotovoltaicos incluídos nas habitações são a fonte de energia renovável mais essencial para as cargas residenciais. As baterias ou supercondensadores são usados para adaptar a rápida resposta nos veículos elétricos e outras aplicações. Os veículos elétricos usam, maioritariamente, baterias de iões de lítio, supercondensadores, *fuel cell*, ou a sua combinação para otimizar a densidade de fluxo de energia. Conectando diferentes tipos de fontes de energia e armazenamento, os sistemas elétricos tornam-se em *Integrated Energy Systems* (IES), servindo de exemplo, os painéis solares, os veículos elétricos e um sistema de armazenamento.

Neste sentido, para garantir a integridade e correto funcionamento dos sistemas, o uso dos conversores de Eletrónica de Potência é indispensável. Tendo em conta que existem diversas topologias de conversores, é necessário realizar o estudo de algumas configurações e dos possíveis objetivos de uso. Não obstante, tem que ser efetuada a análise das técnicas de controlo associadas aos conversores.

3.2 Inversor de ponte completa

Como ilustrado na Figura 11, o inversor de ponte completa é constituído por quatro semicondutores para realizar a produção, nos terminais da carga, uma onda retangular com uma dada frequência de comutação. Como tal, uma tensão positiva é aplicada à carga quando S_1 e S_4 conduzem e, contrariamente, uma tensão negativa é aplicada quando S_3 e S_2 se encontram em condução. Este tipo de modulação não permite o controlo da amplitude nem do valor eficaz da tensão de saída. Para conseguir uma corrente sinusoidal é necessário ter um acoplamento indutivo. Ademais, os condutores de cada braço da ponte nunca podem entrar em condução simultaneamente, pois, caso se confirme, resulta num curto-circuito no barramento CC, danificando os componentes envolvidos.

Comparativamente com outras estruturas de inversores para as mesmas aplicações, esta apresenta diversas vantagens, nomeadamente, nos níveis baixos de stresse de corrente e tensão dos semicondutores. A principal desvantagem dessa estrutura consiste na utilização de quatro semicondutores [12].

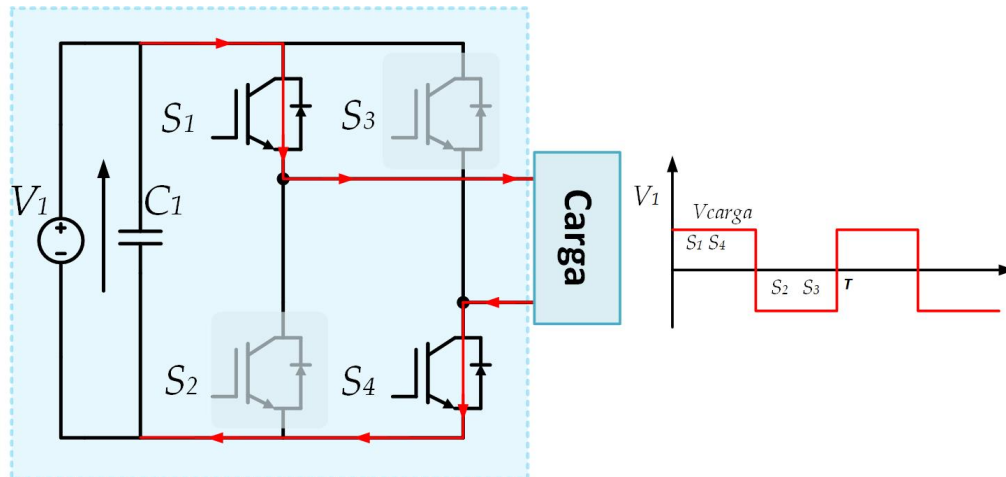


Figura 11: Circuito de um inversor de ponte completa.

Pode concluir-se, que a tensão de saída do inversor V_{carga} depende do estado de operação, confirmando-se a existência de quatro estados possíveis como representado na Tabela 1.

Tabela 1: Tabela de estados do inversor de ponte completa.

Estado	S1	S2	S3	S4	Vcarga
1	ON	OFF	OFF	ON	V1
2	ON	OFF	ON	OFF	0
3	OFF	ON	ON	OFF	-V1
4	OFF	ON	OFF	ON	0

3.3 Double Active Bridge

O conversor DAB é um tipo de conversor CC-CC que usa um transformador como um enrolamento no primário e outro no secundário, como ilustrado na Figura 12. Em cada uma das extremidades tem uma ponte completa para conectar as duas pontas de uma bateria ou fonte de alimentação CC para uma carga.

O conversor DAB apresenta vantagens como o fluxo bidirecional de energia, stresse dos componentes reduzido, conversão de energia isolada galvanicamente, elevada eficiência e o uso da reatância de fuga como o elemento de transferência de energia. Este conversor tem-se tornado relevante em centros de dados, veículos elétricos, interface de eletrônica de potência para futuros sistemas baseados em tecnologias *smart grids*.

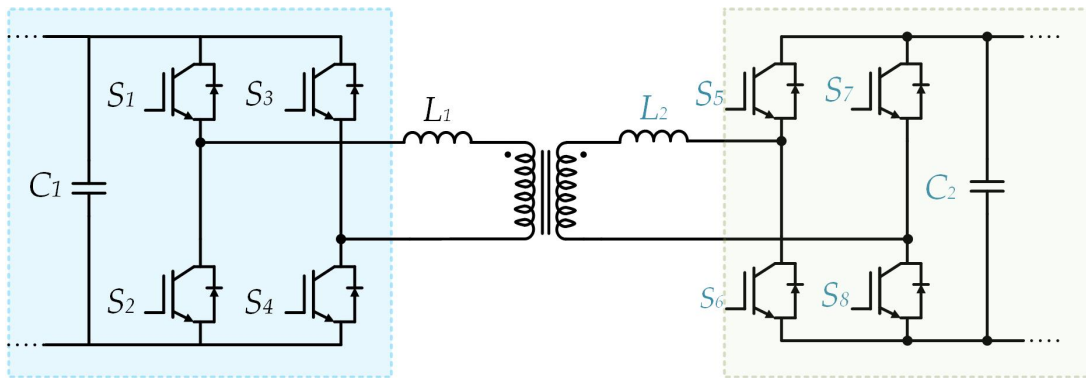


Figura 12: Esquema geral do DAB.

Usando modulação *phase-shift* singular, o conversor DAB consegue atingir elevada eficiência quando opera em condições de comutação suave. Porém, em modo de operação de pouca carga, a comutação suave é perdida e é reduzida a eficiência. Foram feitos estudos para contornar este problema recorrendo à *Zero Voltage Switching* (ZVS). Contudo, estas aplicações não conseguem satisfazer a necessidade no caso de uma tensão de entrada variada.

Para alargar a gama de ZVS, a indutância de magnetização do transformador pode ser reduzida ou então adiciona-se uma indutância externa em paralelo. Como consequência, a redução da indutância de *shunt* resulta numa corrente de circulação mais elevada. Em particular, para cargas elevadas, as perdas por condução aumentam significativamente. Para contornar este problema são usadas indutâncias reguláveis. Portanto, a indutância variável é projetada de modo a apresentar indutância reduzida para cargas maiores reduzindo a corrente de circulação, enquanto, para uma carga menor, a indutância tem que tomar um valor grande para estender a gama de ZVS. Apesar de tudo, este método tem pouca flexibilidade nos controlos e requer comutadores adicionais.

3.4 Triple Active Bridge

O TAB é um tipo de conversor CC-CC que utiliza um transformador com um enrolamento no primário e dois enrolamentos no secundário, como ilustrado na Figura 13. Este conversor é usado em aplicações que requerem alta potência, como sistemas de geração de energia, carregadores de bateria e conversores CC-CA.

Esta topologia é de elevado interesse para a aplicação em estudo, pois, o objetivo é efetuar a interface entre painéis solares fotovoltaicos, um sistema de armazenamento e uma rede doméstica.

Comparativamente com o conversor DAB há um aumento do número de dispositivos, porém, os dispositivos de comutação do lado do primário só precisam de metade da corrente. Permitindo, deste modo, um TAB ser implementado com a mesma área de semicondutores [13].

Com a adição de uma ponte adicional é possível obter ZVS para a inteira gama de carga com apenas

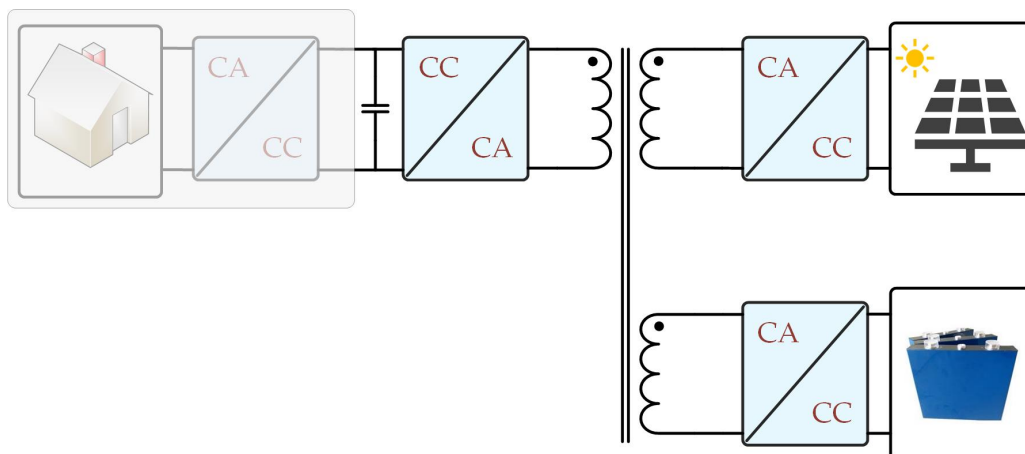


Figura 13: Esquema geral do TAB.

a técnica de controlo *phase-shift* de todas as pontes. Sendo que, ajustando o *phase-shift* entre as pontes, todos os semicondutores conseguem manter o ZVS devido à corrente de circulação controlada.

O conversor proporciona troca de energia e isolamento total entre os três portos, conseguindo operar com diferentes níveis de tensão.

A modulação por PWM básica com *duty cycle* de 50% é aplicada nas três pontes, sendo usada a técnica de *phase-shift* para realizar a transferência de energia entre os portos. A técnica de *phase-shift* consiste no desfaseamento dos PWM entre os três portos. Para esta topologia são necessários três PWM e os seus complementares.

3.4.1 Aplicação do TAB

3.4.1.1 Microgrid

Para garantir um consumo de energia autossuficiente e prevenir as alterações climáticas, pode-se recorrer às *microgrids* autónomas CC ou CA. As *microgrids* tem a função de promover a geração de energia no local de consumo. A construção da *microgrid* precisa de ser de fácil realização e com baixo custo de manutenção. Para tal, pode ser usado um TAB e conversores CC-CA que podem ser conectados aos portos do conversor como ilustrado na Figura 14. Deste modo, diversas aplicabilidades podem ser conectadas entre si, tal como uma rede doméstica, a rede elétrica, um conjunto de painéis solares fotovoltaicos, um sistema de carregamento destinado à mobilidade elétrica, entre outros. Neste caso, é feita uma conexão de dois TAB. Assim sendo, é preciso realizar um controlo do barramento CC que pode ser efetuado através do controlo por tensão. Enquanto um dos TAB realiza o controlo de tensão, o outro está disponível para realizar o controlo de corrente, ficando assim a transferência de energia totalmente controlada dentro da *microgrid* [14].

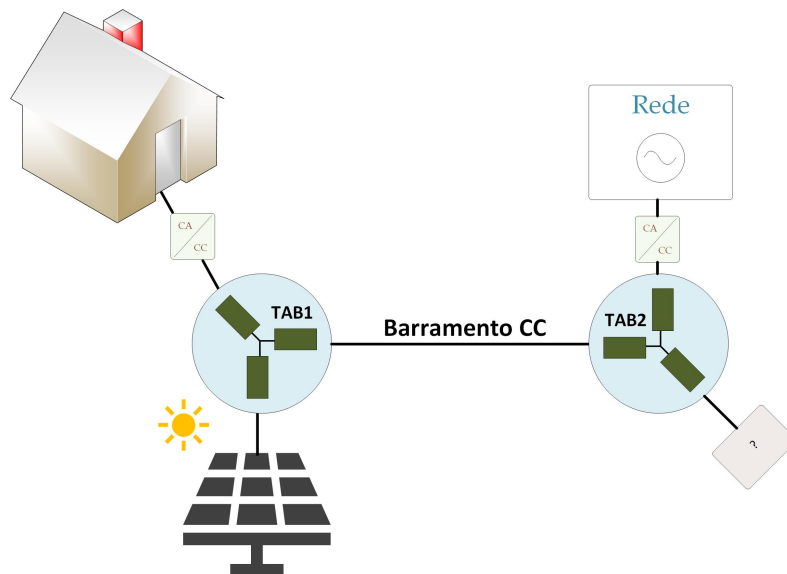


Figura 14: Aplicação do TAB numa *microgrid*.

3.4.1.2 Indústria Aeronáutica

Em termos de mobilidade, além dos veículos elétricos, os aviões podem ser mais eletrificados, como ilustrado na Figura 15. Os sistemas elétricos incorporados nos aviões requerem um aumento da eficiência, segurança e redução de custo de fabrico.

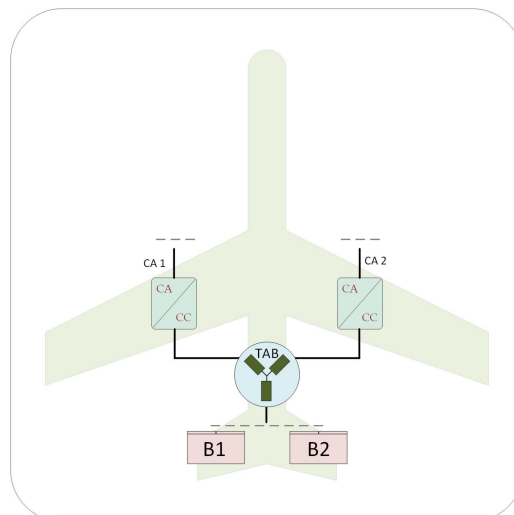


Figura 15: Aplicação do TAB num avião

O sistema elétrico é constituído por tensões CA de 230V e tensões CC de 28V e 270V. A unidade de potência auxiliar é indispensável para o caso onde o avião ainda se encontra no solo, podendo consistir numa bateria (B_1 e B_2) e célula de combustível de tensões CC de 270V ou 540V. Este sistema de

armazenamento também pode ser utilizado para situações de emergência, para poupar energia quando a carga é leve e para ajudar no gasto de energia para cargas maiores. As duas tensões CC e a tensão proveniente do sistema de armazenamento é interligado através do TAB com controlo centralizado do sistema. A energia entre os três elementos é interligada sempre e é possível obter um nível de segurança elevado. Porém, as correntes altas e potências elevadas e o controlo é desafiante para estas aplicações. Possivelmente haverá mais pesquisa e desenvolvimento neste ramo [15], [16].

3.4.1.3 TAB para aplicação UPS

Um conversor TAB foi proposto para utilização em sistemas de UPS. O principal objetivo de uma UPS é garantir que a alimentação dos equipamentos, com os quais tem uma ligação estabelecida, não sejam interrompidos, fornecendo energia, por um *Battery Energy Storage System* (BESS) [17].

Como ilustrado na Figura 16, a fonte (entrada do circuito azul), a carga (saída do circuito verde) e o BESS (circuito roxo) ficam conectadas através do TAB, onde é de notar, para o correto funcionamento dos equipamentos, a necessidade de utilização de uma frequência nominal de 50 Hz.

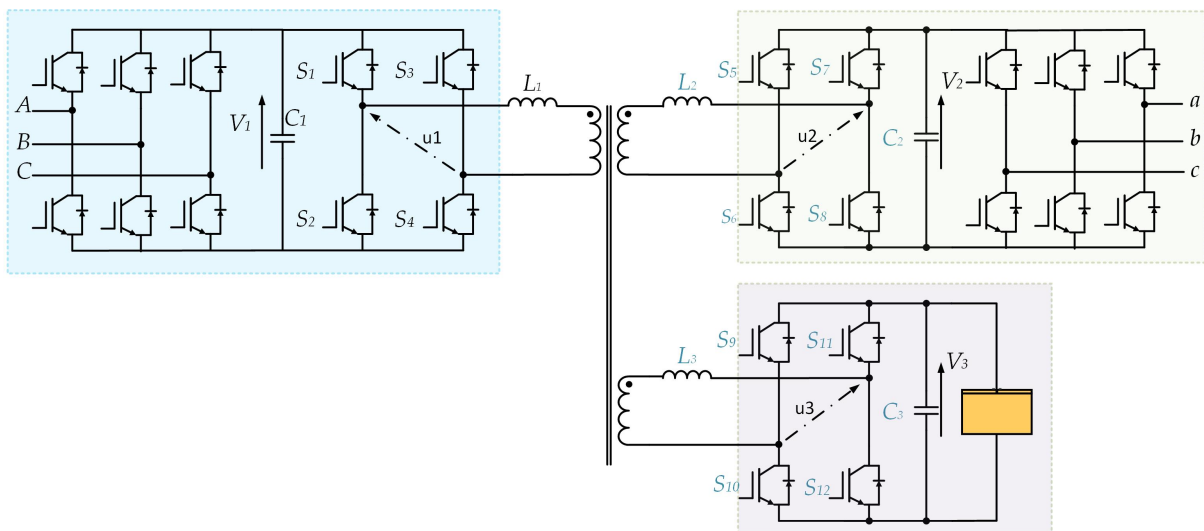


Figura 16: Aplicação do TAB numa UPS.

O princípio de funcionamento deste sistema, é funcionar no modo 1:1, havendo uma transferência de energia da fonte para a carga. Em situações anormais de falha de energia, onde a fonte deixa de fornecer energia ao sistema, o circuito do BESS suporta a transferência energética durante um tempo limitado, esperando que a fonte retome o fornecimento.

Utilizando um conversor TAB nesta aplicação com um transformador de alta frequência, a segurança do sistema é aumentada. A operação do sistema é flexível e requer um controlo simples recorrendo à técnica *phase-shift* [18].

Esta implementação requer 24 semicondutores. Como vantagem adicional, é de apontar a forma contínua da entrada e saída das correntes, do desacoplamento da rede e da carga em relação a flutuações de energia e tensão, pois os condensadores C_1 e C_2 podem compensar as necessidades do retificador/inversor.

Uma aplicabilidade prática é em *Data Centers*, uma vez que, a segurança é um requisito fundamental nos *Data Centers*, uma falha energética pode causar prejuízos em grande escala. A ligação de um BESS com o TAB desempenha o papel de um sistema UPS, cujo objetivo, como mencionado anteriormente, é suportar os níveis energéticos quando ocorre uma falha. O número de conversores pode ser reduzido utilizando um sistema de armazenamento partilhado, reduzindo os custos de produção [19], [20].

Algumas linhas de um *Data Center* podem requerer um nível energético superior a outras, usando um TAB este problema pode ser contornado, pois pode haver transferência de energia entre as linhas, como representado na Figura 17.

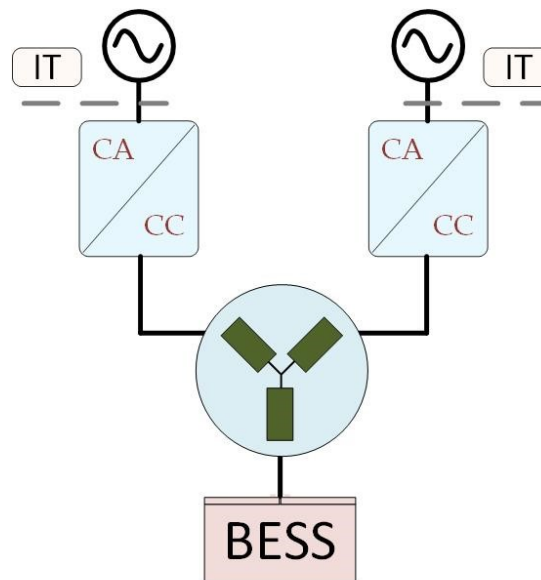


Figura 17: Aplicação do TAB *Data Center*.

3.4.2 Configurações modulares do conversor TAB

Os módulos do inversor podem ser conectados entre si modularmente com o propósito de aumentar a tensão ou a potência conforme os requerimentos do sistema. Os portos dos submódulos podem ser conectados em série para um aumento de tensão ou em paralelo para distribuir a corrente.

A Figura 18 representa uma ligação modular do conversor de modo a manter a conexão individual, os módulos dos painéis solares, ligação paralela para as baterias e ligação à rede em série. A Figura 19 difere da anterior em ligação independente do módulo das baterias.

Nestes dois casos os painéis solares fotovoltaicos podiam ser controlados através de um MPPT local para cada submódulo, permitindo um melhor aproveitamento de energia [21].

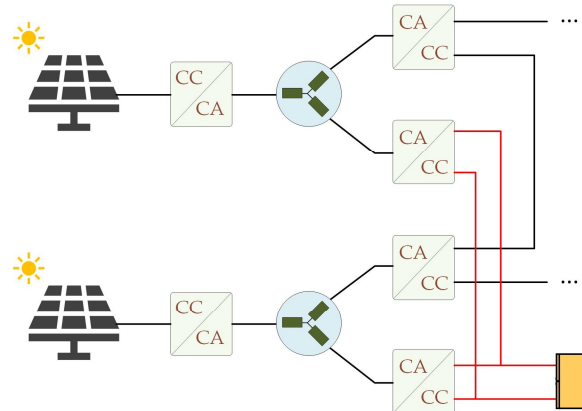


Figura 18: Ligação modular com ligação do sistema de baterias em paralelo.

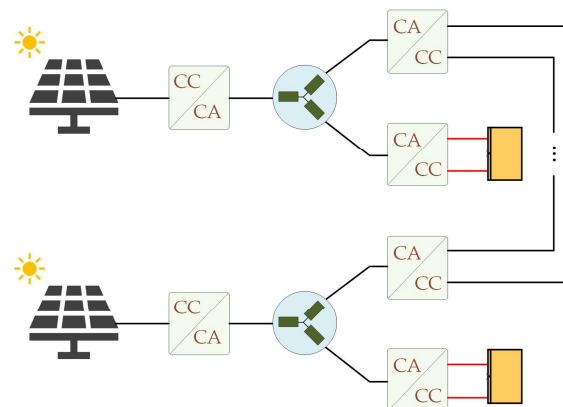


Figura 19: Ligação modular com ligação do sistema de baterias independente.

3.5 Conversor bidirecional de meias pontes de três portas

Como ilustrado na Figura 21, o transformador de três enrolamentos consegue fornecer o isolamento e estabelece a ligação entre as três meias pontes. As indutâncias de fuga L_2 e L_3 funcionam como elementos de transferência de energia. O fluxo de energia entre as pontes é bidirecional.

Cada ponte gera um ângulo de fase controlado pela tensão de alta frequência sendo aplicado ao enrolamento correspondente do transformador.

Esta topologia é extremamente vantajosa para realizar *interface* com portas de entrada de tensão muito baixa. A comutação suave é possível por seleção apropriada dos parâmetros do circuito [22].

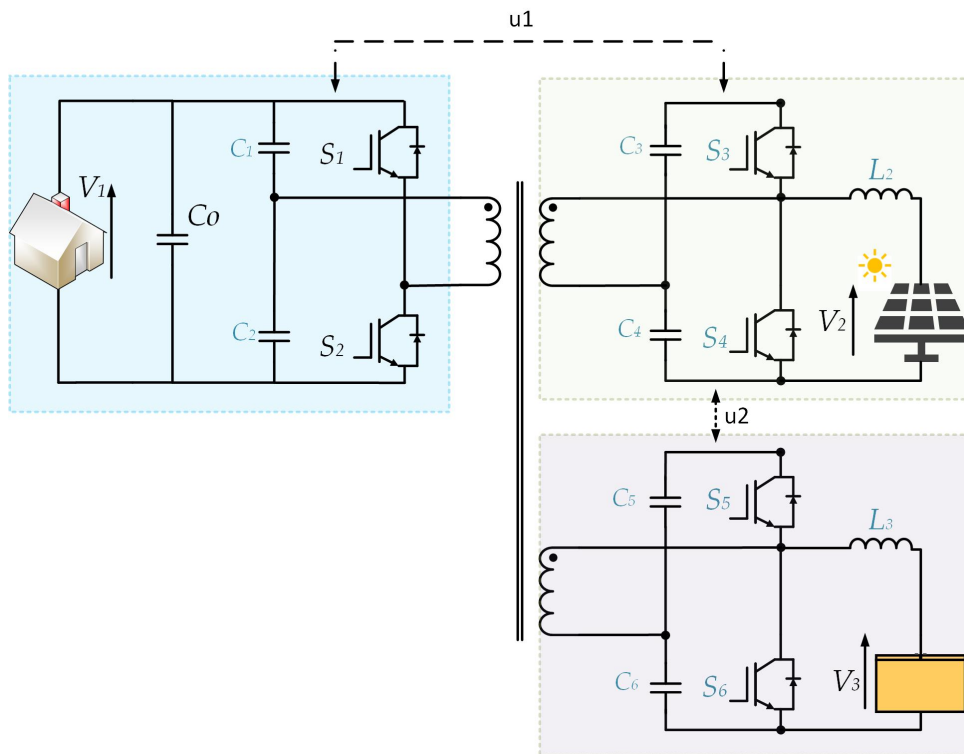


Figura 20: Esquemático do conversor bidirecional de meias pontes de três portas.

3.6 Neutral Point Clamped TAB

O NPC TAB é um tipo de conversor utilizado em aplicações de alta potência, como veículos elétricos e sistemas de energia renovável. É constituído por três pontes ativas, cada uma composta por dispositivos semicondutores de potência, como IGBT ou *Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor* (MOSFET), para controlar o fluxo de energia entre a fonte e a carga. O ponto neutro do circuito é regulado para um nível de tensão fixo, permitindo uma operação mais eficiente, reduzindo o *stress* dos componentes ao nível de tensão e melhora a qualidade de energia em comparação com outras topologias de conversores. É uma topologia muito complexa e requer técnicas de controlo avançadas para operar eficazmente. Esta topologia, permite um número inferior de células e também reduzir o número de componentes. Uma rede de condensadores é usada para criar o ponto neutro e fornecer a tensão necessária para o inversor operar [23].

Recorrendo à topologia TAB é possível contemplar três tensões diferentes quanto a magnitude e a fase aos seus terminais. Do lado do primário é utilizada uma configuração de ponte completa e do lado do secundário são utilizadas meias pontes, proporcionando uma relação de 2:1 nos enrolamentos do transformador, resultando na mesma intensidade de corrente para todos os semicondutores do módulo [24].

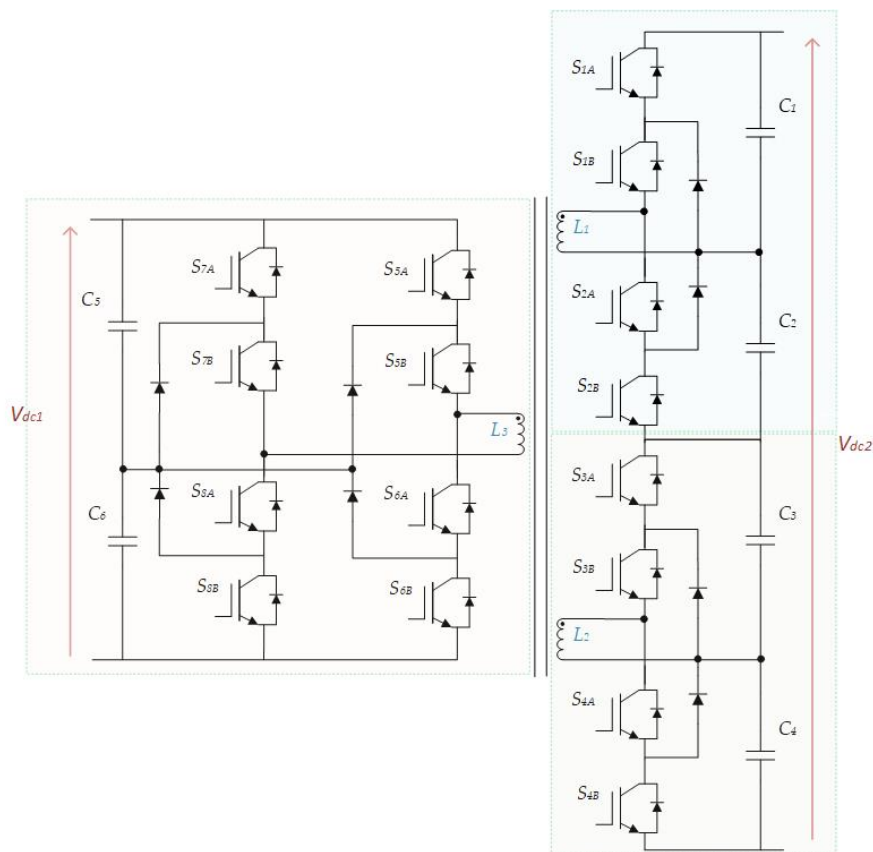


Figura 21: Exemplo da configuração de um NPC TAB.

3.7 Tipos de isolamento nos conversores de três portas

Dependendo da conexão através dos portos, os conversores CC-CC podem ser classificados em não isolados, parcialmente isolados e isolados. Estes conversores conseguem compensar os problemas produzidos pela natureza intermitente das fontes de energias renováveis e comportamento imprevisível da carga devido à incorporação de mais um porto destinado ao armazenamento de energia.

A Figura 22 mostra a configuração de um conversor não isolado de três portos. Como se verifica, todos os portos estão conectados de forma direta e sem isolamento galvânico, o que pode originar um sistema de tamanho pequeno e grande densidade de potência. Algumas tipologias usam apenas uma

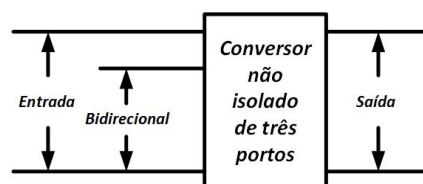


Figura 22: Conversor de três portos não isolado.

bobina para manter a densidade de fluxo e tamanho pequeno, outras utilizam 2 ou 3. Para implementar este género de conversor pode ser utilizado um conversor dos seis básicos: *boost*, *buck*, *buck-boost*, *cuk*, *sepic* e *zeta*, que será posteriormente derivado sistematicamente para obter o conversor não isolado de três portas. Este processo implica a adição de uma nova variável de controlo e um caminho adicional para o fluxo de energia.

Na Figura 23 está representada a configuração do conversor de três portas parcialmente isolado. Está configuração recorre ao uso de um transformador de alta frequência para conseguir o isolamento entre diferentes portas. Tipicamente, este conversor contém dois dos três portas conectados diretamente.

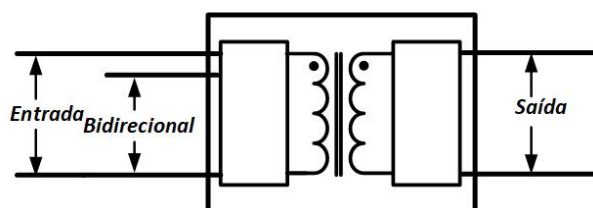


Figura 23: Conversor de três portas parcialmente isolado.

Por fim, a Figura 24 representa o conversor de três portas com isolamento galvânico. Tal como o conversor parcialmente isolado, este conversor também precisa da integração de um transformador de alta frequência, mas de três enrolamentos.

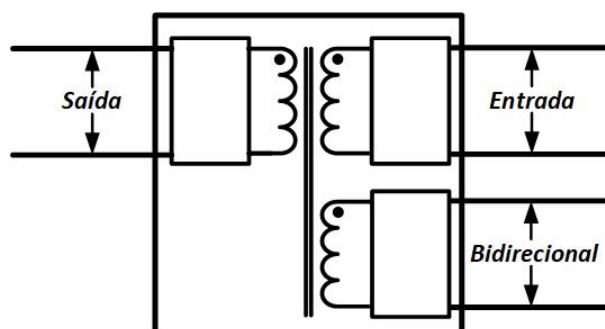


Figura 24: Conversor de três portas com isolamento [25].

O uso do transformador proporciona um aumento de volume do sistema e reduz a densidade de fluxo e eficiência do conversor. Porém, com técnicas de modulação PWM e estratégias de controlo, é a melhor opção para satisfazer as necessidades de determinadas aplicações. Ao contrário dos casos anteriores, não pode haver troca de componentes entre os portas. A maioria dos conversores isolados de três portas são constituídos por conversores de pontes completas ou meias pontes tradicionais [25].

3.8 Técnicas de Modulação

As técnicas de modulação são essenciais para o funcionamento de qualquer conversor de eletrônica de potência, pois os semicondutores constituintes necessitam que os sinais de comando sejam acionadas de forma rápida. Esses sinais de comando precisam de comutar seguramente e com o intuito de controlar o funcionamento do conversor. Esta modulação consiste numa comparação entre a onda modeladora que apresenta o sinal desejado e a onda triangular portadora.

3.8.1 Sinusoidal Pulse Width Modulation Bipolar

Um sinal sinusoidal com frequência fundamental é comprada com uma onda triangular portadora com a frequência desejada. A tensão de saída resultante desta comparação. Na Figura 25 são apresentados os sinais que constituem a lógica para gerar os sinais de controlo: o sinal de referência V_{ref} , o sinal da onda portadora triangular V_{tri} , o sinal do comparador V_{pwm1} e o seu complementar. Esta técnica pode ser facilmente empregue no conversor de ponte completa representado na Figura 11. Podendo-se assim estabelecer a seguinte relação entre o valor de saída e o valor de comparação entre a onda de referência e a portadora. Assim:

$$V_{carga} = \begin{cases} +V_1, & \text{se } V_{ref} > V_{tri} \\ -V_1, & \text{se } V_{ref} < V_{tri} \end{cases} \quad (3.1)$$

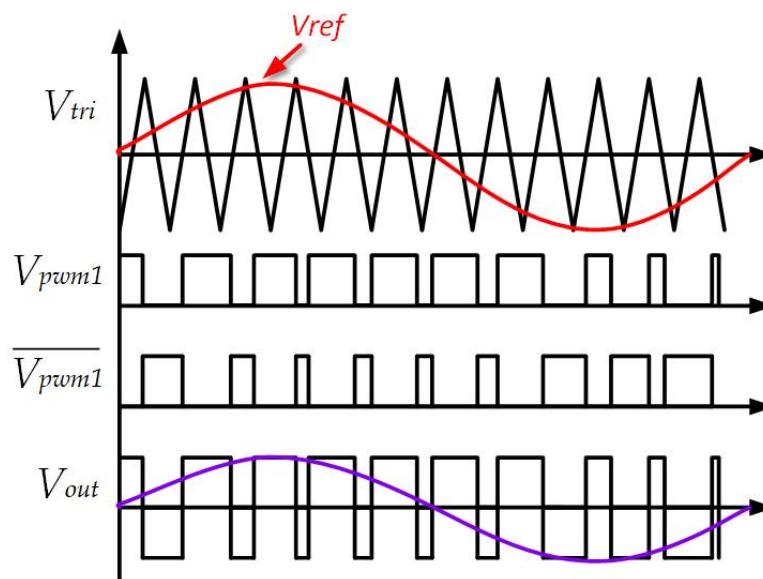


Figura 25: Possível aplicação da modulação de PWM.

3.8.2 Phase-shift PWM

Neste caso, são utilizadas três ondas dente de serra V_{tri1} , V_{tri2} e V_{tri3} e três ondas contínuas de igual amplitude V_{ref} que tem metade da amplitude das ondas triangulares, para garantir um *duty-cycle* de 50%.

Através da Figura 26 pode ser verificado o funcionamento desta técnica. Em particular, o desfasamento δ_1 entre o sinal de referência V_{pwm1} e o sinal V_{pwm2} . E o desfasamento δ_2 entre o sinal de referência V_{pwm1} e o sinal V_{pwm3} . Para a aplicação em causa, são também utilizados os sinais complementares dos sinais V_{pwm1} , V_{pwm2} e V_{pwm3} .

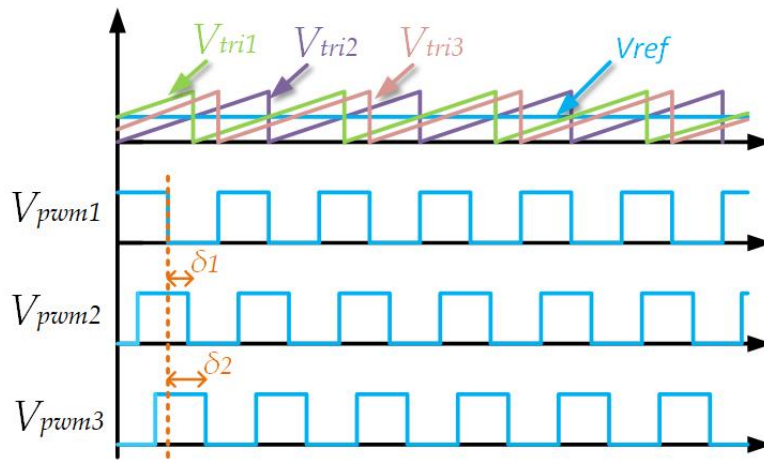


Figura 26: Princípio de funcionamento da modulação *phase-shift*.

As equações seguintes consistem na relação entre as potências dos três portos, P_1 , P_2 e P_3 . Onde, δ_2 e δ_3 correspondem aos desfasamentos entre a referência e os outros dois portos. L_1 , L_2 e L_3 são as indutâncias auxiliares e V_1 , V_2 e V_3 são as tensões nos barramentos.

$$P_1 = -(P_2 + P_3) \quad (3.2)$$

$$P_2 = \frac{\delta_2(\pi - |\delta_2|)V_1V_2L_3 + (\delta_2 - \delta_3)(\pi - |\delta_2 - \delta_3|)V_2V_3L_1}{2\pi^2 f_{sw}A} \quad (3.3)$$

$$P_3 = \frac{\delta_3(\pi - |\delta_3|)V_1V_3L_2 + (\delta_3 - \delta_2)(\pi - |\delta_3 - \delta_2|)V_2V_3L_1}{2\pi^2 f_{sw}A} \quad (3.4)$$

Onde A é dado por:

$$A = L_1L_2 + L_2L_3 + L_3L_1 \quad (3.5)$$

3.9 Algoritmo de seguimento de ponto de potência máxima

A potência fornecida pelo painel solar fotovoltaico depende das condições climáticas e da carga a que está sujeito. Tendo em conta que as condições climáticas não podem ser controladas, a gestão eficiente de energia que se pode extrair do painel é essencial. Assim, o conversor associado ao painel solar e a técnica de controlo que lhe é atribuída é o que dita a quantidade de energia que será extraída [26].

A potência máxima que um painel solar consegue fornecer depende da característica V-I onde o produto de tensão pela corrente tem o valor máximo. Sujeito a boas condições de irradiação, o painel solar fotovoltaico consegue gerar a máxima potência eficientemente quando acompanhado por um algoritmo de MPPT eficaz no sistema.

Foram desenvolvidos muitos algoritmos de MPPT, dentro dos quais pode-se destacar a perturbação e observação, condutância incremental e circuito aberto.

A eficiência de uma instalação fotovoltaica depende maioritariamente de três fatores: a eficiência do painel solar, a eficiência do inversor e a eficiência do algoritmo de extração de máxima potência.

Nos algoritmos mencionados, perturbação e observação e de condutância incremental são os mais comumente utilizados, sendo que são os mais simples de implementação [27]

3.9.1 Algoritmo de perturbação e observação

O algoritmo de perturbação e observação é amplamente utilizado, possui uma estrutura de *feedback* simplificada e parâmetros que precisam de ser ajustados. Este método consiste na perturbação periódica da variável de referência e observação da potência de saída do módulo fotovoltaico como resposta a essa perturbação. Caso se confirme um aumento da potência, resultante da perturbação, está continuará a aumentar. Caso se confirme o oposto, a perturbação periódica da variável de referência irá diminuir.

Na execução do algoritmo começa por ser feita a aquisição da tensão e corrente à saída do módulo fotovoltaico, calculando a potência de saída atual. Seguidamente, é comparado com o valor de potência de saída anterior e conforme o valor de potência atual seja maior ou menor que o anterior, é definido o sentido da próxima perturbação, como está representado no fluxograma da Figura 27. Com a utilização deste algoritmo o módulo fotovoltaico irá produzir uma potência de saída que estará continuamente a oscilar em torno do ponto de máxima potência.

Esse método opera “perturbando” a tensão de saída do módulo periodicamente. Para cada novo valor de tensão é calculada a potência de saída, sendo então comparada com o valor anteriormente armazenado. Caso a potência aumente, o sistema de controle continuará a atuar naquele sentido. Caso contrário, o sistema atuará no sentido oposto. Quando o ponto de máxima potência é alcançado, a tensão do módulo oscila continuamente em torno deste. O passo de variação da tensão é um parâmetro que deve ser ajustado para possibilitar o balanço entre a resposta mais rápida com a menor oscilação em regime permanente [28].

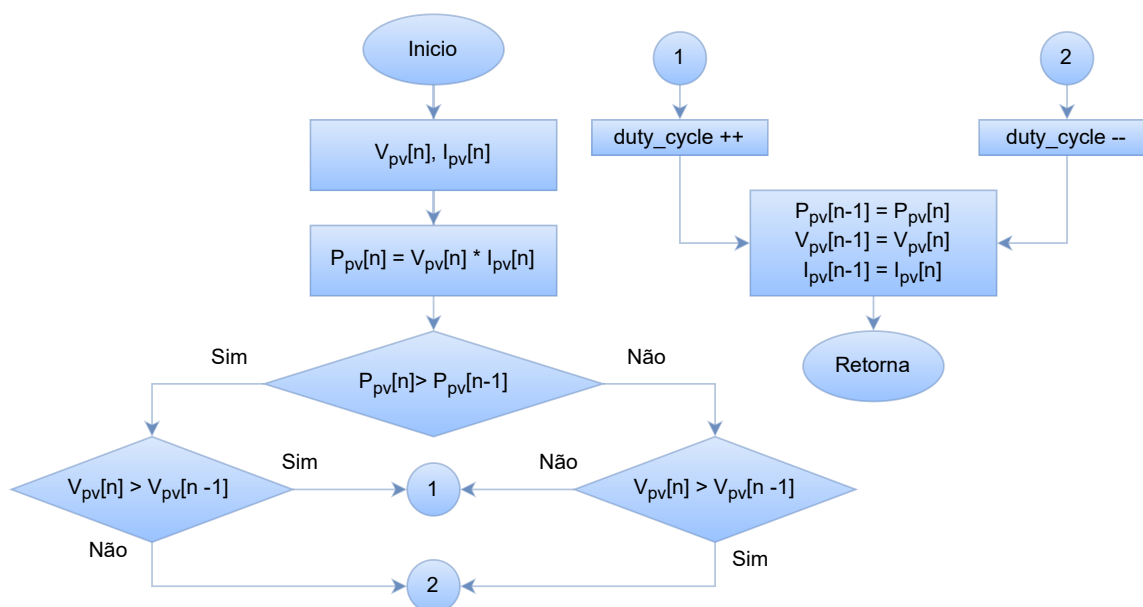


Figura 27: Fluxograma do algoritmo de MPPT de perturbação e observação.

Relativamente às vantagens da implementação deste algoritmo pode-se destacar o facto de ser simples de implementar. Porém, também apresenta algumas limitações que podem reduzir a eficiência do algoritmo, pois quando a incidência solar diminui a curva P-V sofre algumas variações. Outra desvantagem que este algoritmo apresenta é o facto da instabilidade relacionada com as alterações atmosféricas bruscas da temperatura e radiação incidente, uma vez que o algoritmo oscila em torno do *Maximum Power Point* (MPP).

3.9.2 Algoritmo de condutância incremental

Este algoritmo é baseado na derivação da potência de saída do painel solar relativamente à tensão.

Semelhante ao algoritmo de perturbação e observação, o algoritmo de condutância incremental tem uma boa eficiência e é de simples implementação.

O método de condutância incremental (controlo pela tensão) ou impedância incremental (controlo pela corrente) também se trata de um método de perturbação e observação que possibilita obter uma taxa de convergência mais rápida e menores variações próximas do MPP quando comparado ao algoritmo de perturbação e observação [29], [30], [31].

As seguintes equações traduzem o comportamento do sistema conforme o ponto de operação:

- $I + V \times \frac{\Delta I}{\Delta V} = 0$, ocorre quando há extração de máxima potência.
- $I + V \times \frac{\Delta I}{\Delta V} > 0$, o ponto de operação está à esquerda do ponto de máxima potência.
- $I + V \times \frac{\Delta I}{\Delta V} < 0$, o ponto de operação está à direita do ponto de máxima potência.

Com base nos resultados destas comparações, o algoritmo determina se o valor precisa de ser incrementado, decrementado ou permanecer no valor da referência que lhe foi facultada, como está representado no fluxograma da Figura 28.

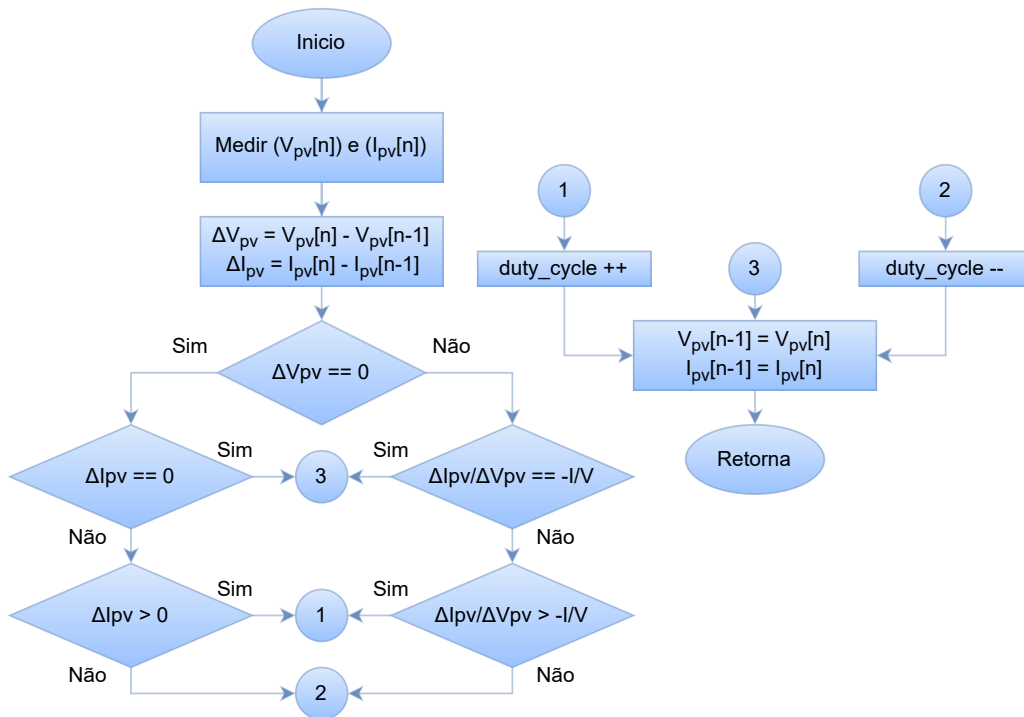


Figura 28: Fluxograma do algoritmo de MPPT para condutância incremental

3.9.3 Algoritmo de circuito aberto

O algoritmo de tensão constante é de simples implementação nos algoritmos de MPPT, consistindo na utilização de uma tensão de referência V_{ref} para o ponto de tensão de potência máxima V_{mpp} que se obtém em condições de teste habituais de um painel solar (radiação de 1000 W/m_2 , temperatura ambiental das células (25°C)). A tensão tem que ser medida para realizar o controlo da tensão dos painéis solares fotovoltaicos como tensão de referência. Sabendo que o MPP dos painéis solares varia conforme a temperatura e a radiação solar, como este método utiliza uma tensão de referência fixa para uma radiação e temperatura específica, não é possível obter precisamente o MPP.

A Figura 29 mostra o fluxograma do algoritmo descrito, em que são medidos os valores de corrente e tensão nos painéis solares. De seguida, esses valores são comparados com tensão de referência para diminuir/aumentar o valor da tensão de referência [32], [33], [34].

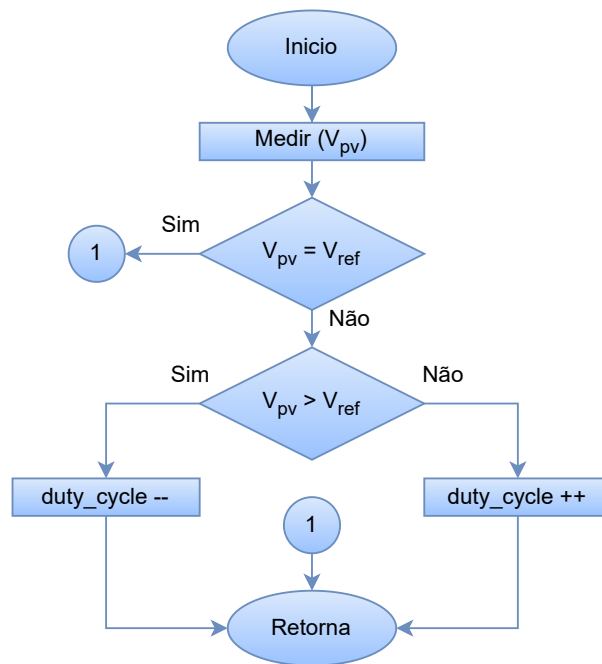


Figura 29: Fluxograma do algoritmo de MPPT para tensão constante.

3.10 Conclusão

Ao longo deste Capítulo, foi possível aprofundar os conhecimentos relativamente aos Conversores de Eletrônica de Potência e técnicas de controlo para os mesmos. Sendo o Inversor de Ponte Completa e o DAB os fundamentos para compreender, posteriormente, o funcionamento do TAB.

Tendo em conta que se realiza uma interface entre uma rede doméstica, um conjunto de painéis solares fotovoltaicos e um sistema de armazenamento, foi possível verificar que o conversor mais adequado é o TAB. O conversor TAB destaca-se dado ao isolamento galvânico que proporciona entre os três portos e a técnica de controlo acessível. Posto isto, foi notável que o TAB pode ser aplicado não só no contexto de exploração de energia renovável, mas também em outras aplicações como *microgrids*, indústria aeronáutica e aplicações UPS. Seguidamente, foram estudadas as configurações modulares do conversor TAB, o que é visto como mais uma vantagem desta topologia.

Por fim, nas técnicas de modulação conclui-se que *phase-shift* é a técnica mais adequada e simples de implementar para o conversor TAB. Por sua vez, o algoritmo de perturbação e observação é o algoritmo de MPPT mais pertinente para ser implementado nesta topologia, tendo em conta a sua simplicidade e eficiência em comparação com outros algoritmos.

Simulação da topologia TAB

4.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada uma análise e feita a seleção da topologia TAB. Seguidamente, é realizado um estudo e validação computacional da topologia, tendo em vista ser o mais aproximado do sistema real, com recurso ao *software* de simulação PSIM. Durante o processo de simulação são implementadas e validadas as técnicas de controlo necessárias para o funcionamento do protótipo.

Esta fase é crucial para um desenvolvimento rápido e sem erros na fase da implementação do protótipo, visto que, um sistema com uma simulação realista previne gastos desnecessários nas falhas dos dimensionamentos dos componentes reais e validação dos ganhos dos algoritmos de controlo. Outra grande vantagem é os resultados simulados servirem como base de comparação e orientação, no que toca aos resultados experimentais retirados do protótipo.

4.2 Princípio de funcionamento

O principal objetivo do conversor TAB é servir de *interface* entre três integrantes do sistema: uma rede doméstica, um conjunto de dois painéis solares fotovoltaicos e um sistema de armazenamento de energia.

Esta metodologia pressupõe que as horas de maior produção de energia, por parte dos painéis solares fotovoltaicos, podem não coincidir com as necessidades por parte da habitação. Por isso, o excedente de energia produzida nesse instante é armazenada nas baterias. Por outro lado, caso os painéis fotovoltaicos não consigam satisfazer as necessidades de maior consumo da habitação, será utilizada a energia armazenada nas baterias.

A topologia tida como estudo está representada na Figura 30 composta por três pontes completas, um transformador e as indutâncias auxiliares e condensadores nos barramentos para garantir estabilidade. O fluxo de energia entre estes três elementos é controlado, principalmente, ajustando o ângulo de desfasamento entre as pontes. O sentido e a energia transferida é controlada por cada porto através da técnica de *phase-shift*. O sinal do porto do lado do primário mantém-se a zero servindo como referência,

enquanto os sinais do secundário e terciário mudam de defasamento relativamente à referência. As tensões V_1 , V_2 e V_3 são as amplitudes de tensão à saída das pontes, enquanto, u_1 , u_2 e u_3 são as tensões entre cada braço da ponte.

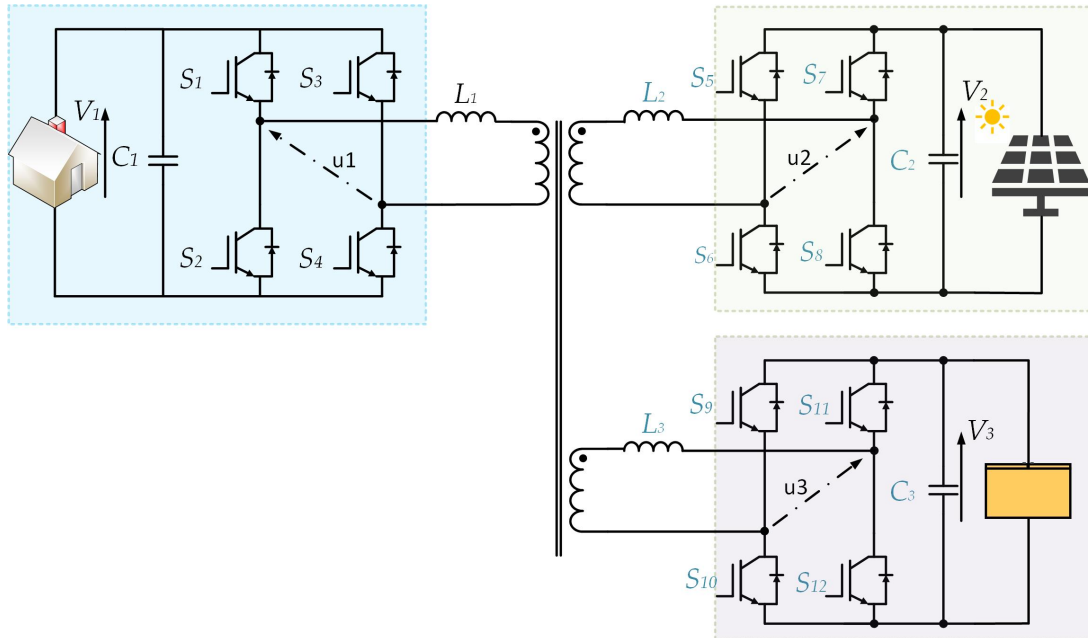


Figura 30: Esquemático de um TAB.

Seguidamente, na Figura 31 são representadas as formas de onda para diversos casos operacionais possíveis do inversor em estudo. É de notar que u_1 serve como referência para os defasamentos das ondas u_2 e u_3 . A quantidade de energia requerida por parte da rede doméstica tem que ser assegurada através das trocas de energia que dependem dos defasamentos entre essas ondas. A onda u_2 apenas fornece energia, então está sempre adiantada relativamente à referência, tendo em conta que se refere aos painéis solares fotovoltaicos, pois estes são apenas fornecedores de energia.

Modos de operação:

- 1 — A ponte referente ao u_1 e a ponte referente ao u_2 operam em modo síncrono, fornecendo energia para a ponte referente ao u_1 . O defasamento das ondas u_2 e u_3 relativamente à referência u_1 é idêntico.
- 2 — A ponte referente ao u_3 fornece mais energia do que a referente u_2 .
- 3 — A ponte referente ao u_2 e a ponte referente ao u_3 tem formas de ondas opostas, funcionando paralelamente. Para este caso, tanto u_1 como u_3 recebem energia.

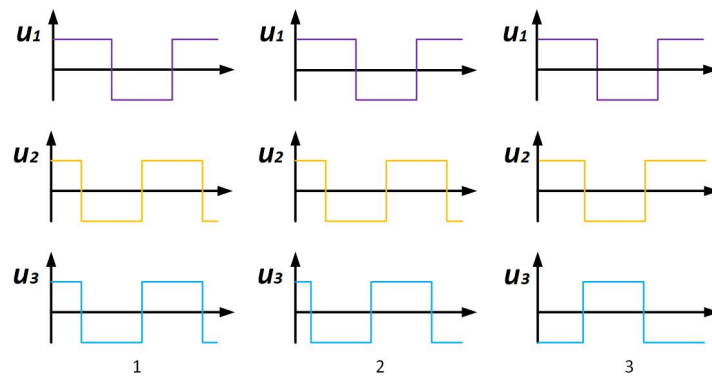


Figura 31: Formas de onda dos modos de operação do TAB.

4.3 Simulação da topologia proposta

Na Figura 32 está representado o esquemático do sistema no PSIM, que serviu como base para validação da topologia proposta. Do lado esquerdo (1) encontra-se o enrolamento que corresponde à rede doméstica. Do lado direito estão os dois enrolamentos do secundário. O enrolamento de cima (2), corresponde ao esquema que comporta o painel solar fotovoltaico e o enrolamento de baixo (3), tem o esquema que comporta as baterias. Por fim, esquema 4 corresponde ao bloco C, onde é efetuada a programação e o controlo do sistema completo.

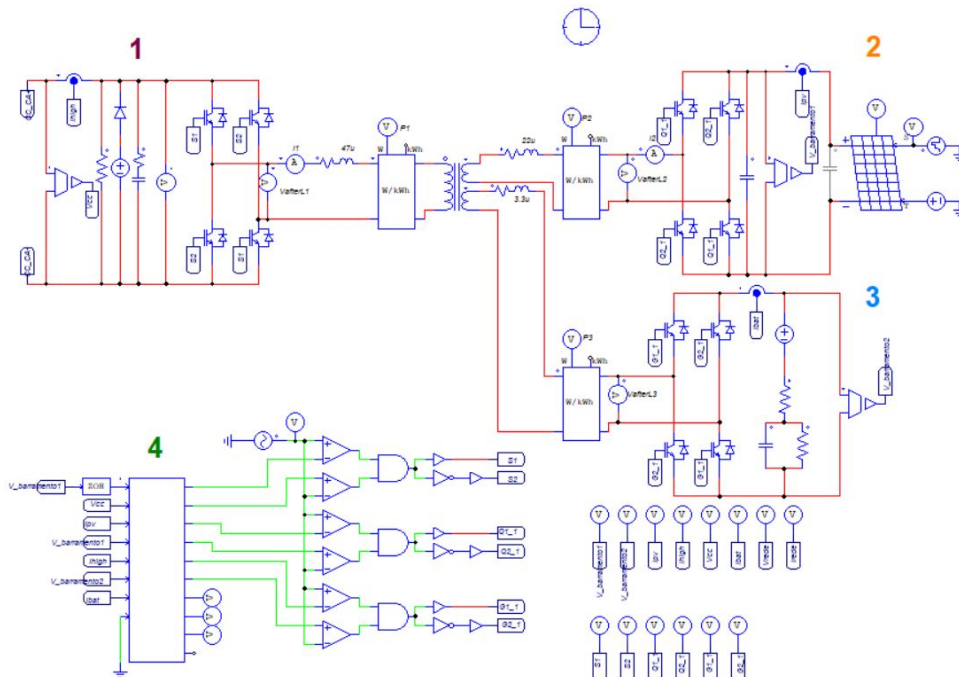


Figura 32: Esquemático em PSIM do TAB.

Para a implementação do sistema foram utilizados três conversores CC-CA de ponte completa interligados por meio de um transformador com um primário e dois secundários. Os blocos C utilizados durante a simulação serviram como base para validação dos algoritmos implementados em linguagem C.

4.4 Painel solar fotovoltaico

Para realizar a validação dos conceitos necessários durante o processo de simulação, foi usado um modelo equivalente do painel solar fotovoltaico que será incluído no sistema. O painel solar escolhido é da marca KYOCERA modelo KC200GHT-2 com uma potência máxima de 200 W [35]. Cada módulo é consistido por 54 células de silício policristalino.

Para a aplicação em causa são necessários dois painéis solares fotovoltaicos em série, formando assim 400 W totais de potência máxima disponível e 52,6 V na saída para a máxima potência de extração. Outra característica importante é a corrente para a potência de extração máxima de 7,61 A e a corrente de curto-circuito de 8,21 A.

Assim sendo, como se pode verificar na Figura 33, foi possível ajustar diversos parâmetros para simular um modelo que se assemelha à realidade.

Parameter	Value	Display
Name	SCP1	<input type="checkbox"/>
Number of Cells Ns	54*2	<input type="checkbox"/>
Standard Light Intensity S0	1000	<input type="checkbox"/>
Ref. Temperature Tref	25	<input type="checkbox"/>
Series Resistance Rs	0.0001	<input type="checkbox"/>
Shunt Resistance Rsh	1000	<input type="checkbox"/>
Short Circuit Current Isc0	8.41	<input type="checkbox"/>
Saturation Current Is0	5.92e-5	<input type="checkbox"/>
Band Energy Eg	1.12	<input type="checkbox"/>
Ideality Factor A	2	<input type="checkbox"/>
Temperature Coefficient Ct	0.00318	<input type="checkbox"/>
Coefficient Ks	0	<input type="checkbox"/>

Figura 33: Características do módulo KC200GHT-2 utilizado no modelo de simulação do PSIM.

4.5 Dimensionamento do banco de baterias

Para uma melhor aproximação da simulação às condições reais de funcionamento, foi dimensionado um banco de baterias para uma aplicação específica, por exemplo, satisfazer as necessidades básicas

dos eletrodomésticos de uma casa estipulando um consumo de 120 Wh.

O dimensionamento do banco de baterias tem que satisfazer o critério de uma profundidade de descarga p de 25-30 % por 10h de funcionamento diário [36].

Assim, para uma bateria com uma capacidade de 50 Ah, o valor do condensador para o modelo elétrico linear equivalente é obtido através da seguinte equação:

$$Capacidade = \frac{Consumo(Wh) \times Autonomia(h)}{V_{bat} \times p(\%)} = \frac{120(Wh) \times 10(h)}{12 \times 0,25} = 51Ah \quad (4.1)$$

No laboratório do GEPE, é possível satisfazer esse critério utilizando 5 baterias em série, obtendo 250 Wh.

Para o sistema de armazenamento foi projetado com o uso de 5 baterias *lithium-ion* IFP 45120146 de 50 Ah da marca Wina em série formando um total de 18,5 V [37].

Para a realização das simulações de um modelo elétrico linear equivalente às baterias é utilizada uma resistência em série com uma malha RC, onde a resistência estabelece a resistência interna da bateria e a malha RC tem o propósito representar o comportamento da bateria durante fenômenos transitórios.

4.6 Técnica de controlo de sintonização com a rede - PLL

Tendo em conta que as necessidades energéticas têm sofrido alterações mundialmente e são cada vez mais vastas, há uma procura maior no que toca às capacidades elétricas e na eficiência da rede elétrica. O número maior de equipamentos conectados à rede elétrica, as *microgrids*, os postos de carregamentos dos carros elétricos, a descentralização do sistema de produção de energia e o crescimento das indústrias são alguns dos pontos fulcrais no maior consumo e destabilização da rede. Com base nisto, existe também uma maior procura de equipamentos e técnicas de sintonização e controlo da rede.

Não menos importante é que toda a energia produzida, cumpra os requisitos da rede elétrica [38].

O método de sintonização PLL consiste na sintonização da fase e da amplitude da tensão da rede elétrica de forma a criar uma onda sinusoidal que serve como referência para o controlo dos conversores.

O ângulo de fase da tensão, θ , serve para obter um controlo independente da potência ativa e reativa entre o lado do conversor e da rede. Em caso de erro do ângulo de fase, pode levar a diversos problemas, nomeadamente na tensão de saída do conversor e no erro entre a potência de referência e a potência injetada na rede [39].

Na Figura 34 encontra-se representado o diagrama de blocos do algoritmo de PLL, composto pelo detetor de fase, pelo filtro passa-baixo e pelo oscilador que pode ser controlado por tensão ou corrente. O detetor de fase recebe um sinal de entrada e simultaneamente fornece um sinal sinusoidal e , cuja amplitude é A e a componente fundamental y . A função principal do detetor de fase é medir o desfasamento entre o sinal de entrada e o sinal de saída gerado. Posteriormente, o erro é filtrado, por exemplo, por um filtro passa-baixo seguindo para o oscilador onde o sinal é gerado. É de notar que existem duas categorias

distintas entre os métodos de sintonização, sendo estas em malha aberta e malha fechada, diferindo essencialmente na utilização ou não do filtro [40].

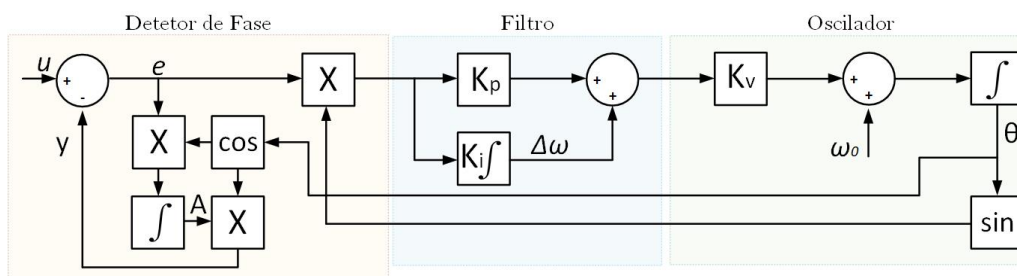


Figura 34: Diagrama de blocos do algoritmo da PLL.

Durante o processo de simulação foi realizada a sintonização com a rede elétrica como se pode constatar através da Figura 35. Na Figura 37 (a) está representada uma simulação das componentes da PLL sem introdução de harmónicos e na Figura 37 (b) está representada uma simulação com a componente harmónica, ou seja, mais perto da real.

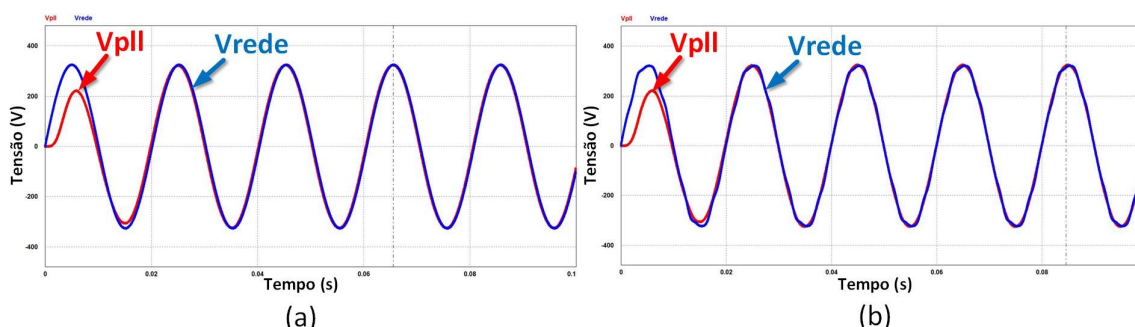


Figura 35: Resultado da simulação da PLL : (a) sem distorção da rede elétrica; (b) com distorção.

Em Portugal, está em vigor a norma NP EN50160 que estabelece os valores dos principais parâmetros da tensão de alimentação, entre eles o valor eficaz da tensão e a frequência da fundamental. Segundo esta norma, em condições normais de exploração, o valor médio da frequência fundamental, medido em intervalos de 10s deve situar-se entre os seguintes valores [41]:

- 49,5 e 50,5 Hz (-1% e +1% de 50 Hz), durante 99,5% do tempo de medição durante uma semana;
- 47 e 52 Hz (-6% e +4% de 50 Hz), durante 100% do tempo de medição durante uma semana.

Posto isto, tendo em conta que a frequência da rede elétrica deve ser 50 Hz, mas isso nem sempre é possível dada a sua instabilidade, foi simulado o comportamento da PLL para uma frequência de 49,5 Hz e 50,5 Hz. Pode-se concluir através da Figura 36 que algoritmo de PLL implementado acompanha as variações da rede elétrica, gerando um sinal de referência adequado.

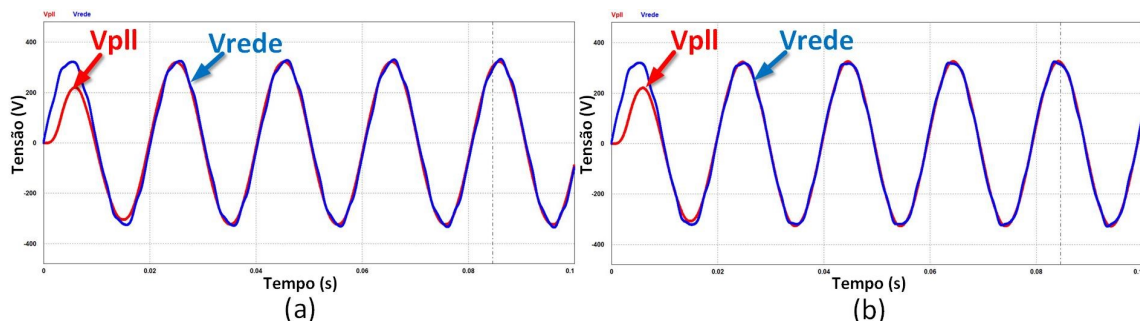


Figura 36: Tensão de saída da PLL e da rede elétrica: (a): frequência fundamental de 49,5 Hz; (b) frequência fundamental de 50,5 Hz.

4.7 Simulação do algoritmo de MPPT

Uma vez apresentados e analisados, no Capítulo 3, os diversos algoritmos de MPPT, foi decidido utilizar o algoritmo de perturbação e observação para a implementação da simulação.

Numa fase inicial, para validação do algoritmo MPPT foi utilizado um conversor *step-up* em conjunto com dois painéis solares fotovoltaicos em série. O circuito equivalente está representado na Figura 37. Para a realização do controlo foi necessário usar a leitura das variáveis i_{pv} e v_{pv} , visando calcular a potência medida pelos sensores. Posteriormente, é aplicado o controlo de MPPT usando o algoritmo de perturbação e observação, em que, no final do algoritmo, a potência e a tensão anterior toma o valor da potência e da tensão atual, respetivamente.

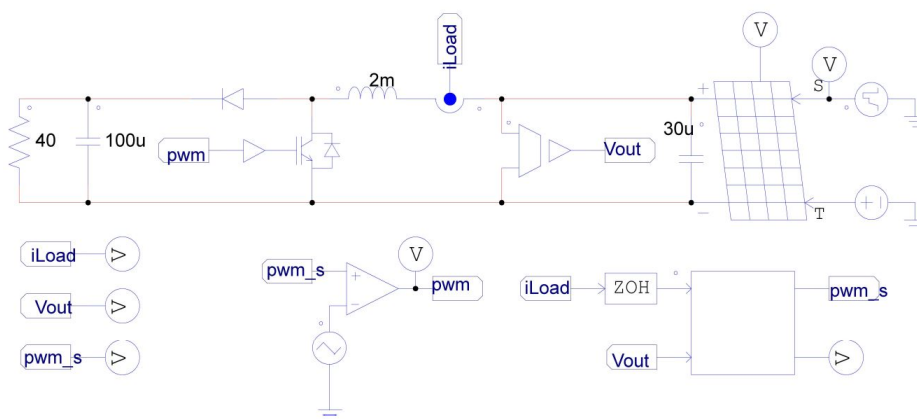


Figura 37: Implementação do algoritmo de MPPT recorrendo ao conversor *step-up*.

Através dos resultados da simulação da Figura 38 pode-se observar que o algoritmo de MPPT segue a potência máxima que o painel fornece. Onde a onda a vermelho é a potência extraída com o algoritmo de MPPT e a onda azul é a potência disponível no painel solar fotovoltaico.

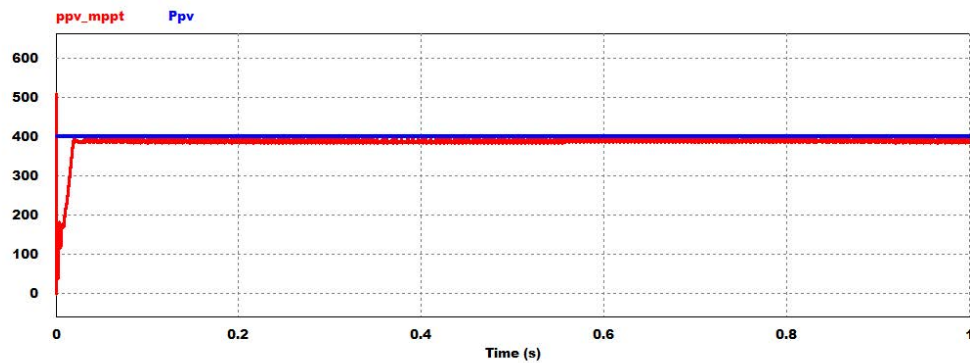


Figura 38: Resposta do algoritmo de MPPT implementado no conversor *Step-up*.

Seguidamente, foi implementado o TAB com todas as integrantes do sistema, conforme o esquemático apresentado anteriormente através da Figura 32.

A Figura 39 demonstra o comportamento do algoritmo de MPPT, implementado no sistema completo, com perturbação no módulo dos painéis solares fotovoltaicos. No instante de tempo inicial e até aos 0.1 s o painel solar permaneceu no modo de funcionamento máximo. Posteriormente, a partir dos 0.1 s foi introduzida uma perturbação, em que essa incidência diminuiu gradualmente. A perturbação foi introduzida de modo a obter metade da potência inicial fornecida pelos painéis solares fotovoltaicos, assim sendo, inicialmente verifica-se uma potência de 401 W e, passado alguns instantes de tempo, essa potência diminui até 206 W. No gráfico a forma de onda vermelha demonstra a potência máxima disponível pelo painel solar fotovoltaico e a azul demonstra o algoritmo de MPPT. Assim, pode-se comprovar que o algoritmo de MPPT acompanha a potência disponível no painel.

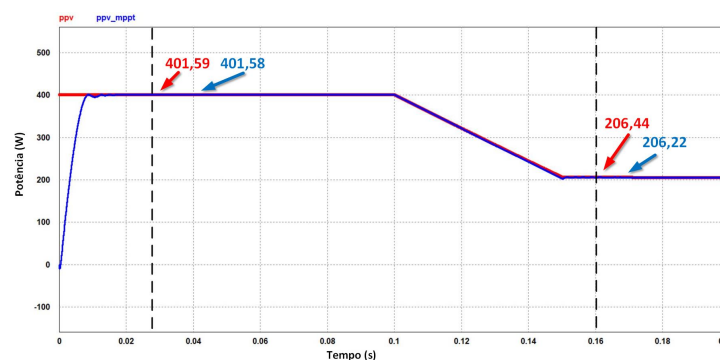


Figura 39: Potência disponível no painel solar fotovoltaico vs Potência extraída com o algoritmo de MPPT.

Através da figura 40 é possível observar a potência disponível nos painéis solares fotovoltaicos que corresponde a onda a vermelho e a potência transferida através do enrolamento do transformador para o enrolamento primário, onda azul.

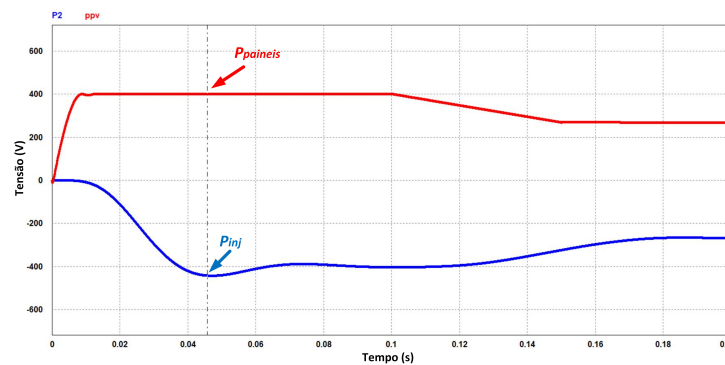


Figura 40: Potência disponível nos painéis solares vs Potência transferida.

A Figura 41 representa a resposta do ângulo de defasamento, para conseguir o melhor aproveitamento de energia. Em que, a vermelho é o defasamento entre a referência, ou seja, o enrolamento do primário e o enrolamento correspondente aos painéis solares fotovoltaicos e a azul é o defasamento entre a referência e o enrolamento correspondente ao sistema de armazenamento. Nas condições anteriores é de notar que o sistema é iniciado com o barramento CC a 350 V, obtiveram-se os seguintes ângulos para os defasamentos. Desde modo, é observado a modificação e adaptação do algoritmo em torno da procura do melhor ângulo para a extração da potência necessária.

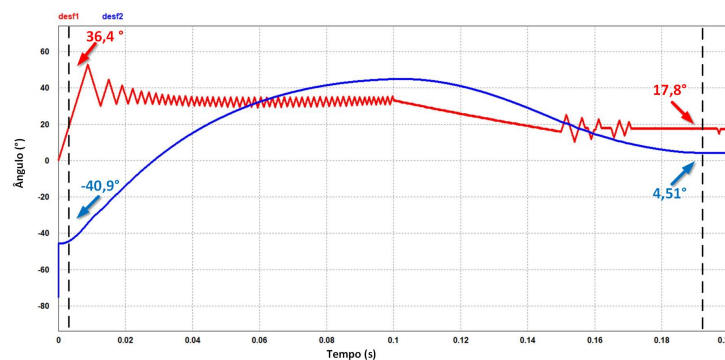


Figura 41: Ângulos de defasamento.

4.8 Algoritmo de *Phase-Shift*

Numa fase inicial, o controlo dos painéis solares e do sistema de armazenamento realizava-se através do algoritmo de *phase-shift*. Depois da validação dessa topologia foi introduzido o algoritmo de MPPT nos painéis solares.

O algoritmo de *phase-shift* consiste em estabelecer a transferência de energia entre os três barramentos existentes no sistema. Como ilustrado na Figura 42, o sinal a vermelho é a onda portadora e refere-se

à rede doméstica, o sinal azul corresponde aos dos painéis solares fotovoltaicos e o sinal a verde é do sistema de armazenamento. O desfasamento pode ser variado entre a onda portadora e as restantes duas para reagir às necessidades do sistema. O intuito do sistema é agir conforme as necessidades energéticas da rede doméstica. Assim, a tensão do barramento da rede doméstica é sempre examinada. Para o caso de não haver necessidade de consumo de energia proveniente dos painéis solares pela rede, essa energia pode ser armazenada no sistema de armazenamento e ser utilizada posteriormente. Por outro lado, caso o fornecimento de energia seja comprometida por parte dos painéis solares, as baterias podem compensar essa necessidade.

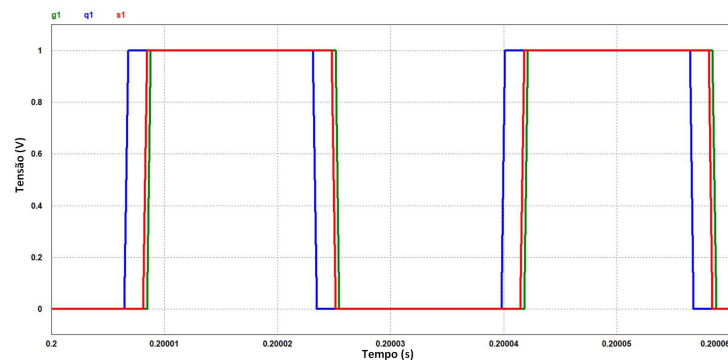


Figura 42: Ondas de PWM que acionam os semicondutores.

O algoritmo de *phase-shift* é acompanhado por controlo PI com os ganhos K_P e K_I ajudados. Inicialmente, é calculado o erro entre a tensão do lado da rede medido e o valor de referência, ou seja, 400 V. Após estas verificações, é calculado um desfasamento relativamente à onda de referência. O desfasamento negativo ou positivo visa fornecer, ou absorver energia, respetivamente.

Na Figura 43, é comprovado o seu correto funcionamento tendo em conta os desfasamentos entre as tensões de saída dos conversores CC-CA, sendo a onda vermelha da rede doméstica a de referência, a onda azul dos painéis solares fotovoltaicos e a onda verde do sistema de armazenamento.

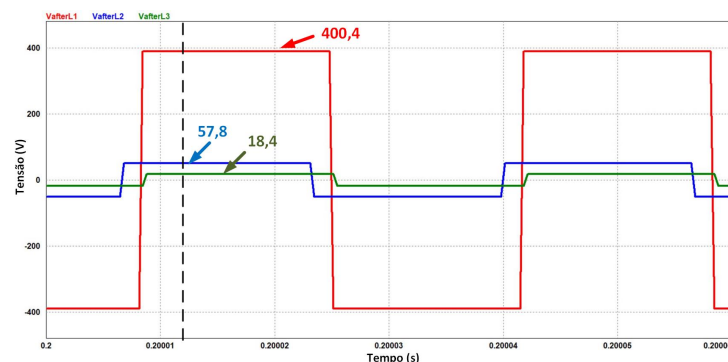


Figura 43: Ondas na saída dos conversores CC-CA.

A Figura 44 representa os sinais referentes aos painéis solares fotovoltaicos na saída do conversor CC-CA. Verificando-se assim que a corrente no seu ponto máximo corresponde ao valor máximo estipulado, ocorrendo extração de energia.

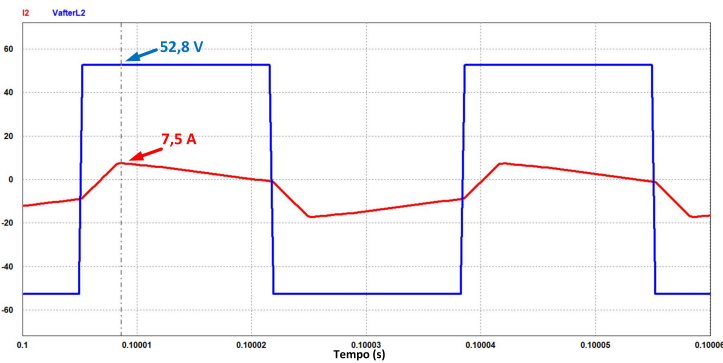


Figura 44: Tensão e corrente a saída do conversor CC-CA no enrolamento dos painéis solares fotovoltaicos.

4.9 Conclusões

Neste capítulo foi possível validar a topologia proposta e o seu princípio de funcionamento. Os resultados da simulação permitiram validar os diversos conceitos apresentados ao longo deste capítulo, essenciais para a implementação do protótipo.

A topologia proposta na simulação permite validar a técnica de controlo *phase-shift* que é mais vantajosa comparativamente com outras técnicas de controlo existentes. Durante a validação deste conceito foi possível observar a distribuição de energia conforme o pretendido entre as três pontes do sistema. Assim sendo, a energia é aproveitada de forma mais eficiente. Seguidamente, foi possível validar o algoritmo de MPPT que também apresenta uma grande relevância no sistema.

Implementação da topologia TAB

5.1 Introdução

Após a seleção da topologia proposta do conversor TAB e da sua validação através da ferramenta de simulação PSIM, é possível proceder ao desenvolvimento do protótipo. Nesse sentido, este capítulo descreve o estudo e desenvolvimento de todos os constituintes do protótipo. Inicialmente, são abrangidas as diversas parcelas de desenvolvimento de *hardware*. Terminando com o estudo de ferramentas de implementação do controlo necessário para o funcionamento do protótipo.

Para uma análise e validação gradual do conversor, optou-se por desenvolver os constituintes de *hardware* de forma estrutural e modular. Assim, vão ser apresentadas diversas placas como a plataforma base para a DSC, o ADC externo, as Pontes-H e o circuito de *drive*.

5.2 Parâmetros do sistema

Para o correto funcionamento do conversor e do protótipo realizado, é necessário estabelecer os parâmetros de operação do sistema. Este passo é essencial para o dimensionamento e escolha correta dos constituintes do protótipo e dos componentes a utilizar. Deste modo, na Tabela 2 são apresentados os parâmetros mais importantes do sistema:

Tabela 2: Parâmetros de funcionamento do protótipo.

Potencia nominal	500 W
Razão de transformação	60:10:3
Tensão no enrolamento do primário	400 V
Tensão no enrolamento do secundário	70 V
Tensão no enrolamento do terciário	18,5 V
Indutâncias de fuga	33 μ H, 22 μ H, 3,3 μ H
Frequência de comutação	30 kHz

A Figura 45 representa o protótipo laboratorial implementado no laboratório do GEPE. Sendo assim constituído pelos seguintes elementos:

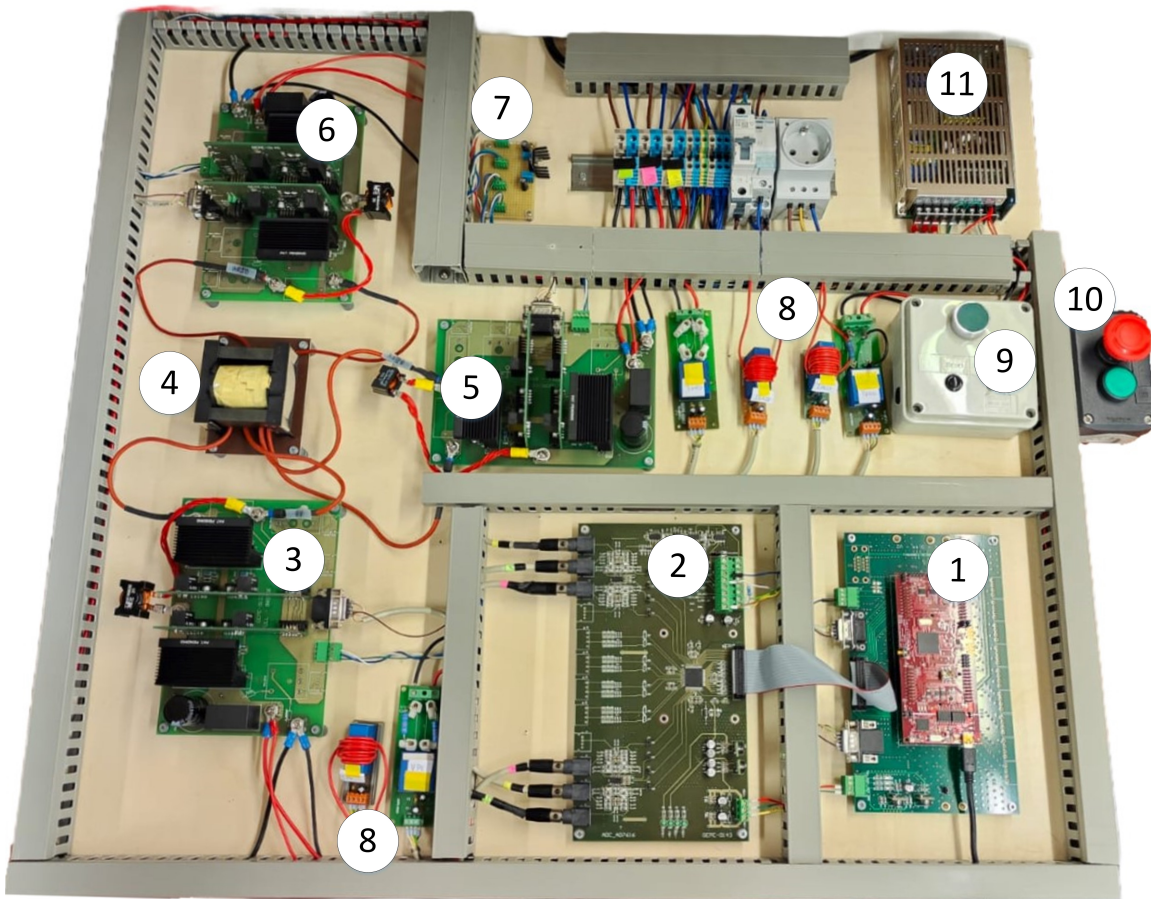


Figura 45: Protótipo final do TAB.

1. Plataforma base para a DSC;
2. ADC externo;
3. Submódulo do painel solar fotovoltaico;
4. Transformador de alta frequência;
5. Submódulo do sistema de armazenamento;
6. Submódulo da rede domestica;
7. Regulador de tensão de 12V;
8. Sensores de tensão e de corrente;

9. Interface com o utilizador;
10. Paragem de emergência;
11. Fonte de alimentação;

5.3 Dimensionamento do transformador

O circuito equivalente de um transformador de três enrolamentos pode ser representado em malha ou em estrela, a representação mais comum é em estrela que é a que será usada para a análise do circuito. A Figura 46 representa o circuito equivalente de um transformador de três enrolamentos, sendo representada uma topologia tipo Y. Nesta topologia, as tensões, correntes e indutâncias dos enrolamentos do secundário estão representadas relativamente ao primário. A corrente de magnetização tem de ser desprezada.

A reatância de fuga de um transformador de três enrolamentos tem que ser calculado diferentemente do transformador de dois enrolamentos, pois é assumido que cada enrolamento tem a sua própria reatância de fuga. A reatância de fuga percentual entre pares de enrolamentos pode ser expressa em termos das suas reatâncias de fuga percentuais individuais (todas expressas numa base comum de volt-ampere).

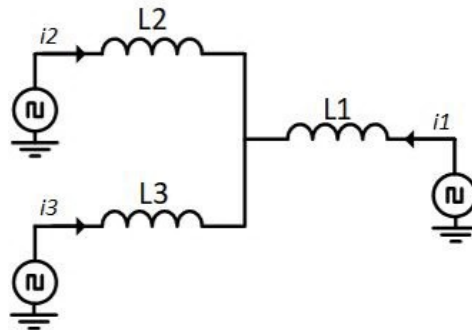


Figura 46: Circuito equivalente do transformador na topologia de TAB.

Utilizando o núcleo de ferrite ETD-59 disponível no GEPE, cuja densidade de fluxo da corrente máxima é de 320 mT e uma área de secção efetiva de $3,677 \text{ cm}^2$, é possível calcular o número de espiras do lado do primário através da equação:

$$N_p = \frac{V_{in} \times 10^4}{K_f \times B_{ac} \times f A_c} \quad (5.1)$$

Onde:

- N_p – número de espiras do primário
- K_f – coeficiente da forma de onda ($K_f = 4$, para o caso de uma onda quadrada)

- B_{ac} – densidade de fluxo da corrente [T]
- f – frequência de comutação induzida no transformador
- A_c – área efetiva da secção (cm^2)

$$N_p = \frac{400 \times 10^4}{4 \times 0,15 \times 30k \times 3,677} = 60,43 \quad (5.2)$$

Após o cálculo do número de espiras do primário é possível calcular o número de espiras dos secundários [42]:

$$\frac{V_1}{N_1} = \frac{V_2}{N_2} \Leftrightarrow \frac{400}{60,43} = \frac{70}{N_2} \Leftrightarrow N_2 = 10,575 \quad (5.3)$$

$$\frac{V_1}{N_1} = \frac{V_3}{N_3} \Leftrightarrow \frac{400}{60,43} = \frac{18}{N_3} \Leftrightarrow N_3 = 2,719 \quad (5.4)$$

5.3.1 Efeito de corpo

O efeito de corpo acontece quando a razão entre a resistência efetiva da corrente alternada e a corrente contínua é maior que unidade. A magnitude deste efeito ao operar a alta frequência, a permeabilidade e a indutância é o suficiente para considerar o tamanho dos condutores.

Tendo em conta que o transformador dimensionado é de alta frequência, o efeito pelicular será menos intenso se forem utilizados vários condutores em paralelo. Desta forma, é possível obter uma eficiência melhor.

$$\epsilon = \frac{6,62}{\sqrt{f}} \times K \quad (5.5)$$

Onde:

- ϵ – efeito pelicular
- f - frequência (Hz)
- K - equivale a 1 para o cobre

$$\epsilon = \frac{6,62}{\sqrt{30k}} \Leftrightarrow \epsilon = 0,382 \text{ mm} \quad (5.6)$$

5.3.2 Secção do fio

O diâmetro do fio D_{AWG} máximo para uma frequência de 30 kHz, para o qual o efeito pelicular é inexistente, é dado através da seguinte equação:

$$D_{AWG} = 2(\epsilon) \Leftrightarrow D_{AWG} = 2(0,0382) \Leftrightarrow D_{AWG} = 0,764 \text{ mm} \quad (5.7)$$

A secção de cada enrolamento depende da densidade máxima de corrente, que geralmente é de 3 A/mm^2 . Considerando a corrente do lado do primário de 1,92 A e do lado do secundário de 5 A, tanto para as baterias como para os painéis solares. Tendo em conta, a disponibilidade, no GEPE do fio AWG #25 cuja área do fio com enrolamento é de $0,16 \text{ mm}^2$. Para o caso do enrolamento do primário serão necessários 4 condutores em paralelo. Relativamente ao secundário, os dois enrolamentos serão constituídos por 10 condutores em paralelo [43].

Para a implementação prática do transformador foi necessário calcular o comprimento do fio para cada enrolamento. Assumindo que cada enrolamento gasta 11,5 m de fio, tendo já em consideração o *Mean Length per Turn* (MLT) e que ainda é preciso deixar um comprimento de cerca de 20 cm para realizar as ligações. Assim sendo, para o enrolamento do primário é necessário 7,1 m, para um dos lados do secundário são precisos 1,35 m e para e para o outro 0,545 m.

A Figura 47 mostra o transformador já implementado conforme o respetivo dimensionamento.

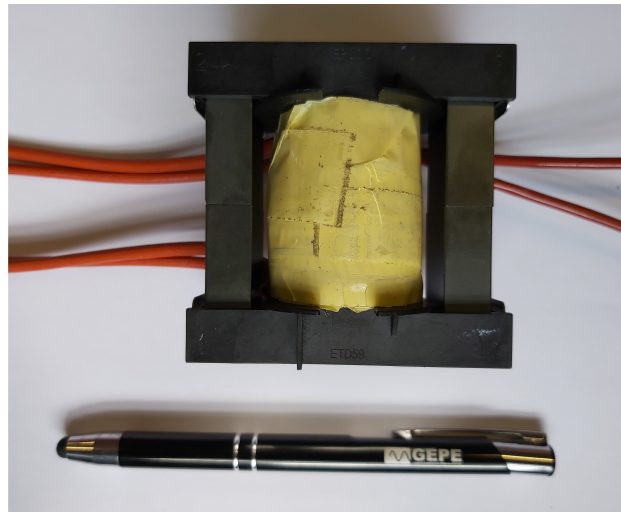


Figura 47: Transformador implementado.

5.3.3 Teste ao Transformador

Para confirmar a razão de transformação do transformador implementado, foi realizado um teste para validar o correto funcionamento do transformador, aplicando uma tensão no primário, e posteriormente,

verificando se as tensões nos secundários correspondem às esperadas, segundo a razão de transformação. Em que, no enrolamento do primário é de 60 e nos enrolamentos do secundário é de 10 e de 3. Para o lado do primário foi aplicada uma tensão de 6 V, então, segundo as razões de transformação representadas anteriormente, a tensão esperada num enrolamento do secundário é de 1 V e no outro enrolamento é de 333 mV. Ainda é possível confirmar a frequência de funcionamento do transformador, projetado para operar a 30 kHz. Conforme a Figura 48 pode-se observar a razão de transformação do transformador implementado, sendo então possível confirmar a razão de transformação do mesmo e também a frequência de funcionamento,

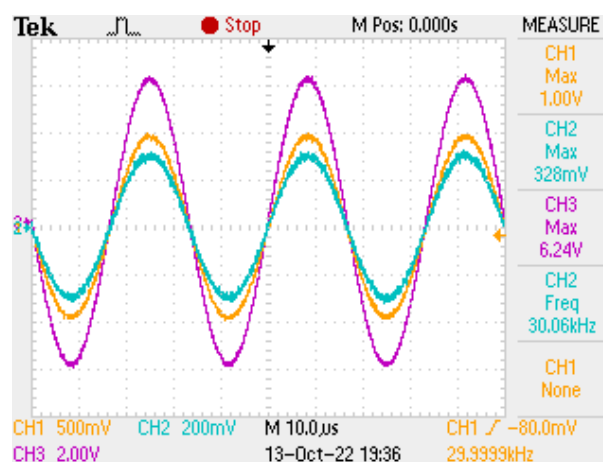


Figura 48: Tensão nos três enrolamentos do transformador de alta frequência.

Para realizar os testes ao transformador foi necessário recorrer à ponte RLC e ao multímetro digital de precisão. Ao utilizar o multímetro digital de precisão foi recolhida uma amostra de 20 valores. O multímetro possibilita a medição de valores instantâneos, máximo, médio e mínimo. Para o estudo em causa foi de interesse o valor médio. Para a realização dos testes foi utilizada uma frequência de 30 kHz e uma tensão de 5 V.

Numa primeira fase foi medida a resistência em corrente contínua de cada enrolamento. Sendo assim, o valor da resistência medida no enrolamento do primário de 174 m Ω . O valor da resistência de um dos secundários que se deve às baterias corresponde a 14 m Ω e, por fim, o valor da resistência do outro enrolamento do secundário que corresponde aos painéis solares é de 20 m Ω .

A tabela 3 é constituída pelos valores possíveis de medir através da ponte RLC. O que se pode verificar através da sua análise é que os valores obtidos estão consoante o esperado. No caso das medições efetuadas em circuito aberto e fechado, o valor do θ está muito próximo aos 90°, o que é um resultado excelente, sendo que se traduz na minimização de perdas.

Tabela 3: Resultado dos testes ao transformador recorrendo à ponte RLC.

	Aberto				Fechado			
	Ls (μH)	θ	Rs ($\text{m}\Omega$)	Z(Ω)	Ls (μH)	θ	Rs(Ω)	Z(Ω)
GRID	19709	89,58	27,125	3714,8	33,344	80,55	1,045	6,3708
BESS	51,973	89,1	153,78	9,798	0,4665	82,73	0,0112	0,0887
PV	586,76	88,92	2,087	110,8	0,9704	81,42	0,0276	0,185

5.4 Proteções

O circuito de proteção foi projetado para satisfazer alguns requisitos dentro dos quais se destaca realizar uma paragem de emergência do sistema com um único botão e sinalizar que o sistema se encontra com as alimentações ligadas recorrendo a uma lâmpada.

O disjuntor cuja função principal consiste na segurança e proteção de circuitos, mas também podendo ser utilizado como um elemento para ligar/desligar circuitos, ou cargas. Tendo em conta essas características, o disjuntor tem uma vantagem relativamente aos fusíveis cuja função é semelhante no que toca a proteção de circuitos. Além disso, contrariamente aos fusíveis, os disjuntores não são descartados quando queimados, podendo ser rearmados [44]. A principal função do disjuntor é proteger o circuito contra curto-circuitos ou sobrecargas. O disjuntor ao detetar um pico de corrente ou um curto-circuito que eleva a corrente acima do limite suportado, interrompe o circuito, deixando os restantes constituintes do circuito intactos.

Foi utilizada a botoeira com dois botões, como ilustrada na Figura 49. O botão vermelho é um botão de emergência que desliga todo o sistema de potência, sendo esse um botão de encravamento e desencravamento. Por sua vez, o botão verde tem a finalidade de induzir o sistema em funcionamento, sendo um botão de pressão.



Figura 49: Botoeira utilizada no circuito de proteção.

A caixa de controlo, representado na Figura 50, serve para o acionamento mecânico para permitir a saída dos sinais PWM, pondo assim o circuito de potência em funcionamento. Esta caixa é ligada ao ADC

externo. O botão de *reset* é ligado aos pinos *User_reset* e GND, sendo este um botão de pressão. O botão *enable/disable* é ligado entre o *User_Enable* e 5 V. A posição de *enable* é com a posição do interruptor para cima e a posição de *disable* é com a posição do botão para baixo.

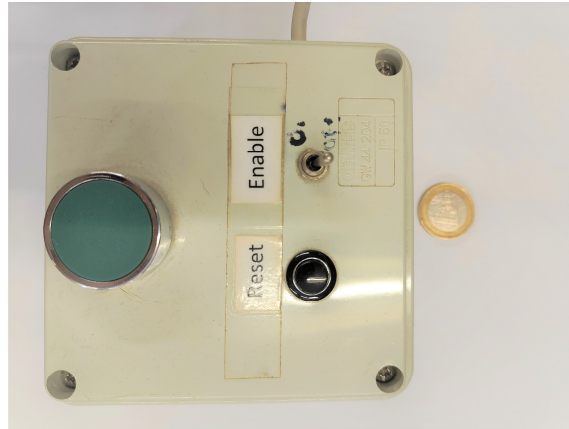


Figura 50: Caixa de controlo dos PWM e do *reset* do sistema.

5.5 Sensores de tensão e de corrente

Foi necessário realizar o dimensionamento dos sensores para a leitura das tensões e das correntes que fazem parte do controlo do sistema e dos algoritmos implementados. Assim sendo, foram projetados 3 sensores de tensão e 3 sensores de corrente.

5.5.1 Sensor de tensão

O sensor selecionado foi o CYHVS5/25A, representado na Figura 51, fabricado por ChenYang Technologies GmbH & Co. KG que têm uma precisão de 0,8 % e abrange uma gama até 2000 V. Este sensor é baseado no ciclo fechado de efeito de Hall e uma compensação magnética. O sensor pode ser usado em corrente contínua e corrente alternada para medição de diferentes formas de onda. Por último, este sensor tem isolamento elétrico.

A Figura 52 representa o esquemático do sensor de tensão. Um campo magnético é gerado pela corrente I_p , quando a tensão $(V_p - V_m)$ é aplicada aos terminais de entrada do sensor através da resistência R_i . Este campo magnético é compensado pelo campo magnético inverso causado pela corrente I_s que passa na bobine secundária. O restante campo magnético, após as compensações, pode ser detetado pelo elemento de efeito de Hall, obtendo a seguinte equação quando o fluxo é zero:

$$N_p I_p = N_s I_s \quad (5.8)$$

Onde:

- I_p – corrente no primário;
- I_s – corrente no secundário;
- N_p – número de espiras do enrolamento primário;
- N_s – número de espiras do enrolamento secundário.

São necessários três sensores para tensões diferentes, a relação da tensão para o valor da resistência é de 500 V para 100 Ω , portanto as resistências R_1 e R_2 terão que ser calculadas em função dessa proporção. A Tabela 4 representa as resistências usadas para os sensores de tensão para a rede doméstica, o sistema de armazenamento e os painéis solares fotovoltaicos.

Tabela 4: Resistências utilizadas nos sensores de tensão.

	Tensão (V)	R_1 ($k\Omega$)	R_2 ($k\Omega$)
GRID	400	39	39
BESS	22	0	4,7
PhotoVoltaics (PV)	175	15	15



Figura 51: Sensor de tensão CYHVS5/25A.

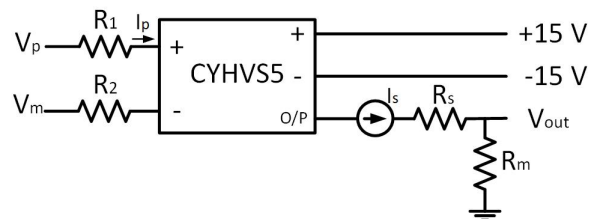


Figura 52: Esquemático do sensor de tensão.

5.5.2 Sensor de corrente

Foi utilizado o sensor de corrente da LEM 100-P representado na Figura 53. É um transdutor de corrente em malha fechada que recorre ao uso do efeito de Hall. As características que mais se destacam deste sensor são as seguintes: tem uma excelente precisão, ótima linearidade, tempo de resposta otimizado, resistente as perturbações do meio e consegue suportar sobrecargas de corrente. Por fim, é apropriado para medição de correntes CC, CA e pulsadas, com isolamento galvânico entre o circuito primário e secundário.

O sensor de corrente possui uma corrente nominal de 100 A, tendo uma proporção de 1 para 2000 para os enrolamentos do primário para o secundário. O número das espiras do primário dependem da aplicação e da corrente máxima a ser medida, para se obter melhor precisão. Para a aplicação em causa foram efetuadas 12 espiras tanto para as medições das correntes dos painéis solares como para as medições das correntes das baterias e 15 espiras para a medição do lado da rede.

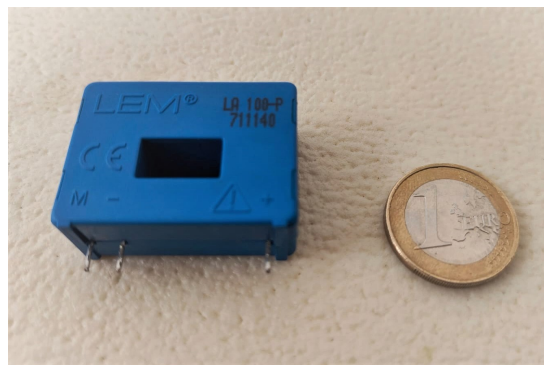


Figura 53: Sensor de corrente LA 100-P.

5.6 Regulador de Tensão 12 V

Dado que, os circuitos de drive dos IGBTs da Ponte H são alimentados a 12 V e a fonte usada em questão fornece 15 V, foi necessário implementar um circuito que realiza essa regulação. Para tal, foi escolhido o regulador de tensão L78S12CV. Comparativamente com outros reguladores idênticos como o LM7812CV, este tem a vantagem de fornecer corrente de saída de 2 A, algo que é relevante para consumos de corrente mais elevados. Para a realização do circuito ilustrado na Figura 54 foram utilizados condensadores C_1 de $0,33 \mu\text{F}$ e C_3 de $0,1 \mu\text{F}$ em paralelo com os condensadores de desacoplamento C_2 e C_4 de $100 \mu\text{F}$. Foi, deste modo, implementado o circuito denominado como regulador de saída fixo, cujo circuito equivalente está representado na Figura 55.

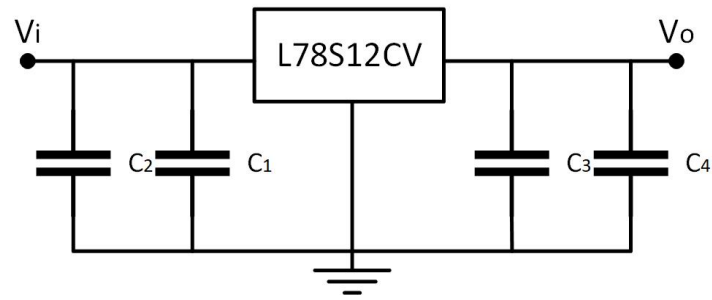


Figura 54: Esquemático do regulador de tensão de 12 V.

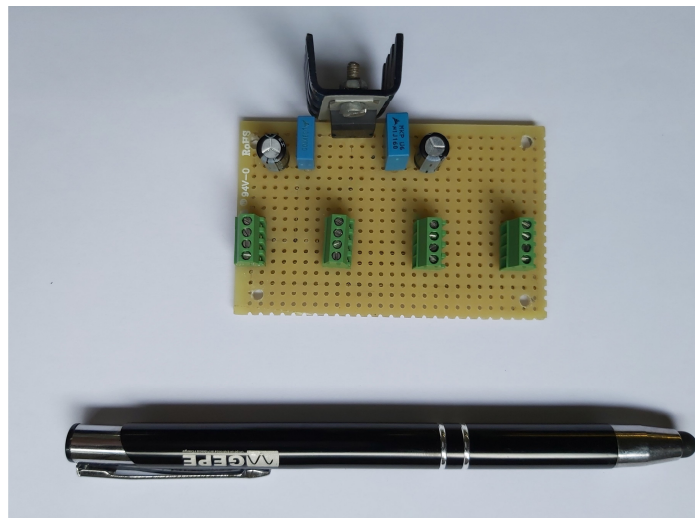


Figura 55: Circuito do regulador de tensão de 12 V.

Tabela 5: Comparação dos IGBTs - IKW40N120H3 (Infineon) e IXFH42N50P2 (IXIS).

Características	IKW40N120H3 (Infineon)	IXFH42N50P2 (IXIS)
V_{CE}	1200 V	500 V
$V_{GE(th)}$	6,5 V (max)	4,5 V (max)
I_{CE}	250 μA	100 μA
Temperatura de junção máxima	175 °C	150 °C

5.7 Pontes H e circuito de drive

Um dos principais desafios iniciou-se com a escolha dos semicondutores. A Tabela 5 faz a comparação entre os valores em condições de operação entre dois IGBTs diferentes com potencialidade de serem utilizados nas pontes H. Os IGBTs mencionados são o IKW40N120H3 fabricado pela Infineon e o IXFH42N50P2 fabricado pela IXIS [45], [46].

O que se pode concluir, através da Tabela, é mais vantajosa a utilização do IGBT da Infineon, ou seja, o IKW40N120H3. Por fim, tendo em conta as comutações efetuadas, é habitual que este tipo de

semicondutores venham acompanhadas por dissipadores de calor.

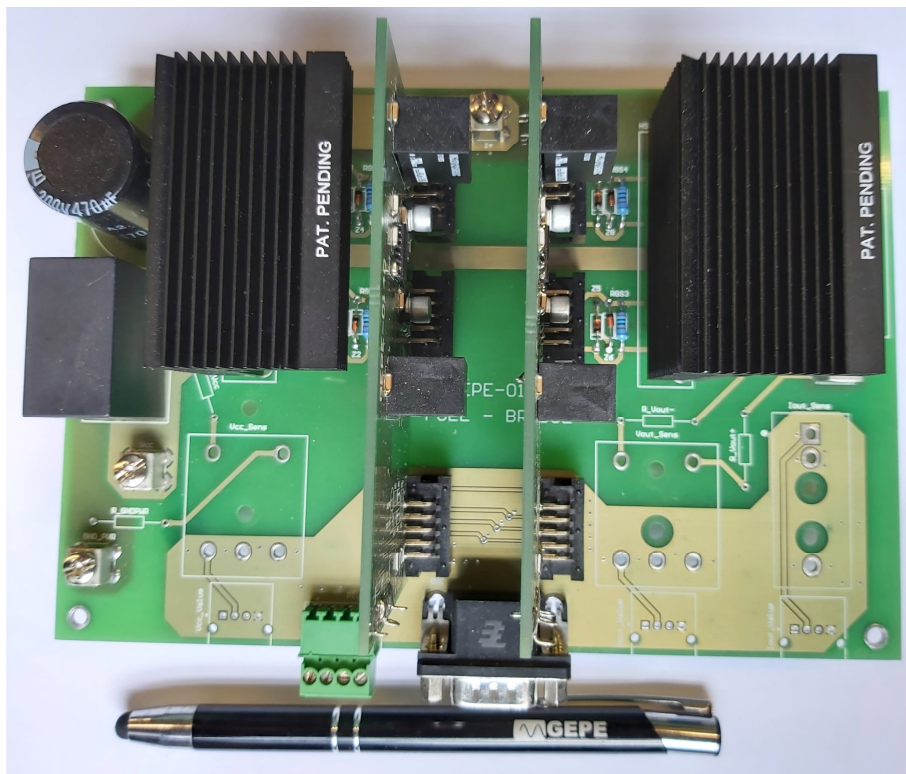


Figura 56: Integração da Ponte H e do circuito de *drive*.

Os sinais PWM de 3,3 V de pico são controlados e enviados pela DSC, sendo recebidos, nas placas da ponte H, pelos conectores DB9. Assim, a placa de *drive* irá realizar a *interface* entre os sinais de 3,3 V e os 15 V de lógica *Complementary Metal–Oxide–Semiconductor* (CMOS) das *gates* dos IGBTs de potência. Existe também um pino de *disable*, quando este se encontra num nível lógico alto, não é habilitada a condução dos IGBTs. A reação do sinal de *disable* é aproximadamente igual a um *delay* de propagação. Para acionar a ponte completa, são necessários dois circuitos de *drive*.

O *driver* escolhido é o ADuM3223. Este *driver* é visto como um dos mais rápidos e seguros no que toca aos *drivers* da *gate* da meia ponte isolados. Conseguindo ser quatro vezes mais rápido comparativamente com as tecnologias de acopladores óticos, com um ciclo de vida cerca de 50 anos. Tendo uma frequência de operação máxima de 1 MHz e intervalo de tensão de saída do *driver* entre 4,5 V e 18 V. Com dois canais isolados, os *driver* ADuM3223 tem tensão de alimentação que varia de 3 a 5,5 V. Estas novas topologias de *drivers* são projetadas para aumentar a eficiência dos conversores CA-CC e CC-CC, inclusive são usados em aplicações de inversores de energia solar fotovoltaica e controlo de motores. Uma das características importantes é o isolamento galvânico entre a saída que permite tensões mais altas e a saída que permite tensões mais baixas, podendo ir até 700 V de pico, evitando conduções cruzadas, aumentando a segurança do equipamento.

Assim, o driver ADuM3223 fornece um controlo eficiente no que toca às características de comutação das configurações dos IGBTs/MOSFETs.

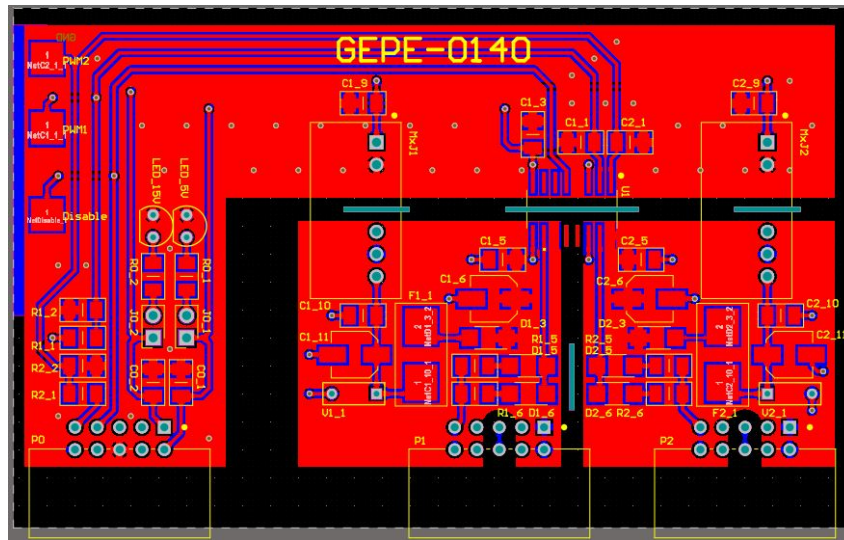


Figura 57: Layout da PCB do circuito de drive no Altium PCB Designer.

Na Figura 58 estão representados os sinais de PWM de uma das pontes em estudo. Para este caso, foi estudada uma ponte individualmente. Assim, os sinais de PWM comutam um IGBT de cada braço. Consegue-se notar que existe um período de *dead-time*, que foi programado entre as comutações dos sinais, o que permite evitar comutações sobrepostas dos IGBTs de cada braço da ponte.

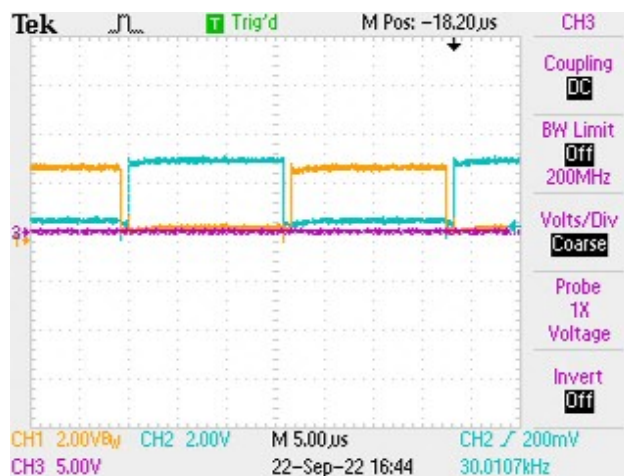


Figura 58: Sinais de PWM para controlo de um braço da ponte H.

Na Figura 59 foi introduzida uma resistência de $4\ \Omega$ à saída ponte H. Esta carga suporta uma tensão de 19,6 V e 3,72 A, proporcionando a potência de 72,9 W. A ponte H foi alimentada com 30 V. A onda azul e a laranja representam os sinais de PWMs e a onda roxa representa a saída da ponte H.

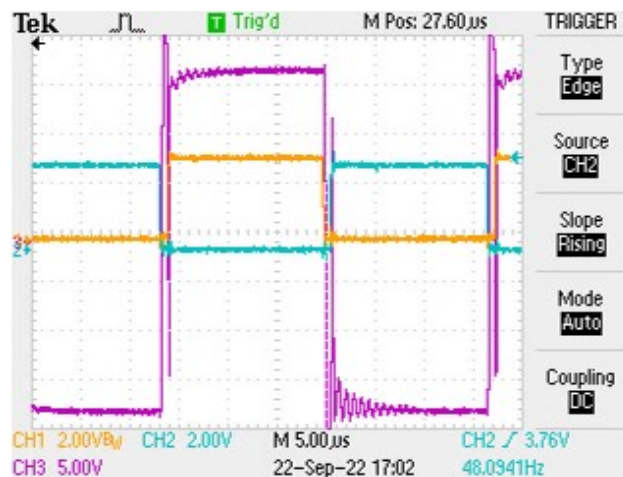


Figura 59: Desempenho de uma ponte H com a carga ligada.

5.8 ADC externo

O ADC externo com oito canais foi projetado recorrendo à ferramenta *Altium PCB Designer*. O propósito do ADC consiste na leitura de sinais analógicos para estes serem convertidos em sinais digitais, a serem usados nas leituras do DSC.

Para a aplicação em causa é necessário realizar a medição de seis sinais. Os sinais medidos são os provenientes dos sensores de tensão e corrente. Os sinais medidos pelos sensores de tensão são para medir a tensão nos painéis solares, no sistema de armazenamento e no barramento CC. Relativamente aos sensores de corrente, estes medem os sinais de corrente nos painéis solares fotovoltaicos, no sistema de armazenamento e no barramento CC.

As Figuras 60 - 63 representam as camadas que constituem o ADC externo. Sendo, a primeira camada engloba os circuitos de sinal e é a camada superior da placa, onde também se encontram os componentes soldados. A segunda camada é referente ao plano GND, necessário para executar as ligações do GND existentes no circuito. A terceira camada é de alimentação composta por diversos polígonos que formam meios de interligar de forma mais isolada e com menor interferência as alimentações de +15 V, -15 V, 5,5 V e 3,3 V, desta forma o circuito de sinal fica mais isolado do circuito de alimentações, permitindo maior segurança na propagação do sinal e também melhor organização e gestão do espaço na placa. Por fim, a última camada é GND e possuindo também na sua implementação componentes soldados.

A Figura 64 representa a Figura em 3D da placa desenvolvida.

A Figura 65 representa o ADC externo impresso desenvolvido no *Altium PCB Designer*, já com os componentes soldados.

Dimensionamento do condicionamento de sinal e proteção do circuito do ADC externo

Partindo do princípio que é necessário efetuar a leitura e controlo dos sinais de tensão ou corrente de diversos pontos do protótipo para efetuar o controlo do sistema, mais precisamente a transferência de

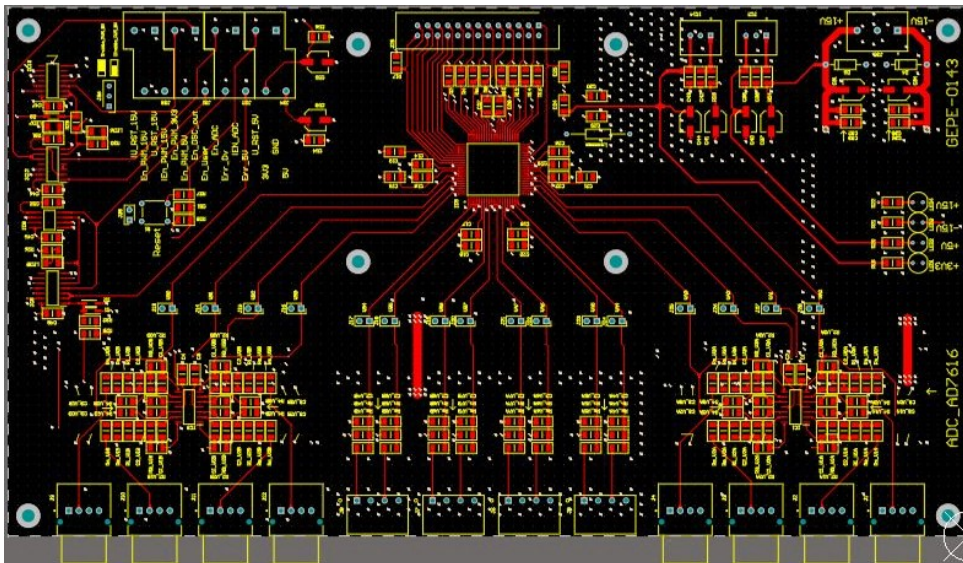


Figura 60: Primeira camada de sinal do ADC externo no Altium PCB Designer.

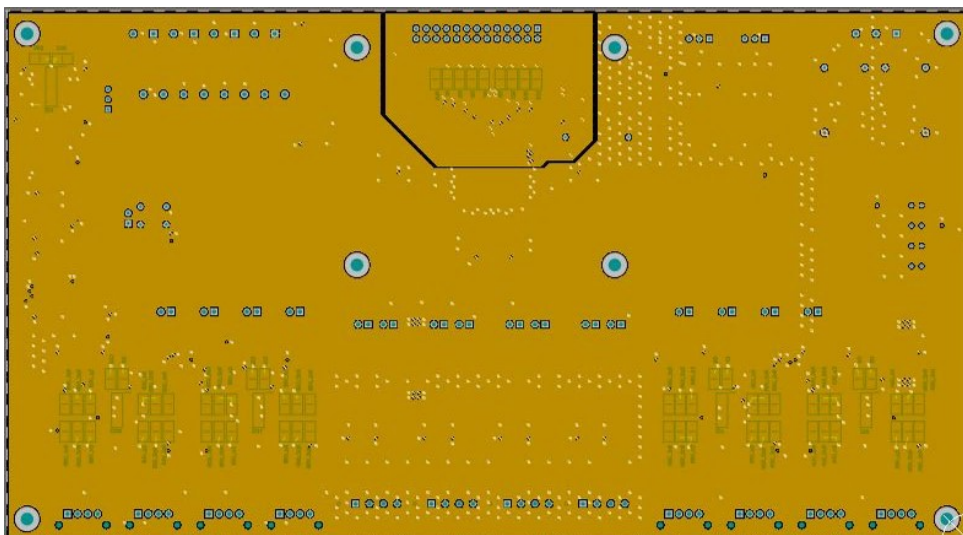


Figura 61: Segunda camada GND do ADC externo no Altium PCB Designer.

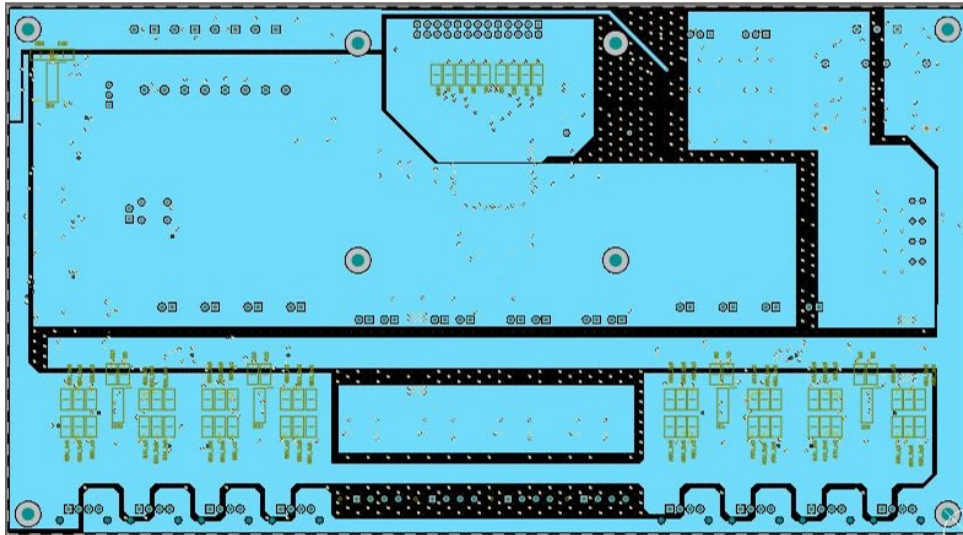


Figura 62: Terceira camada de Potência do ADC externo no Altium PCB Designer.

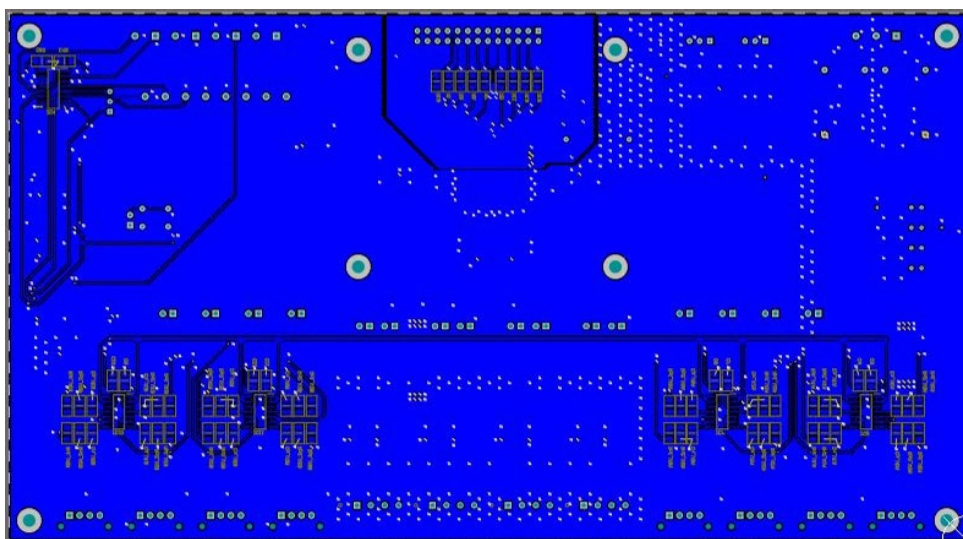


Figura 63: Quarta camada GND do ADC externo no Altium PCB Designer.

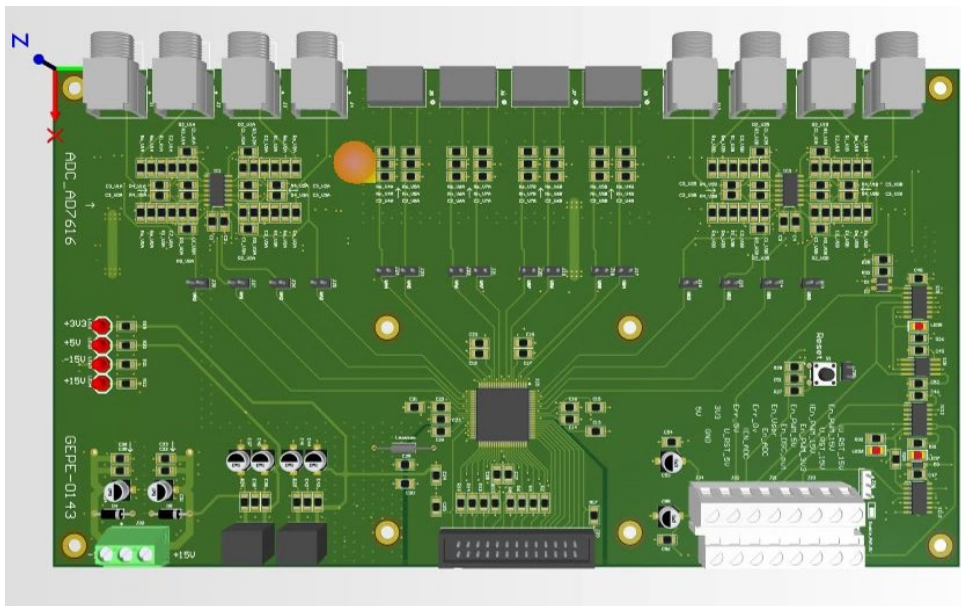


Figura 64: Modelo 3D ADC externo do ADC externo no Altium PCB Designer.

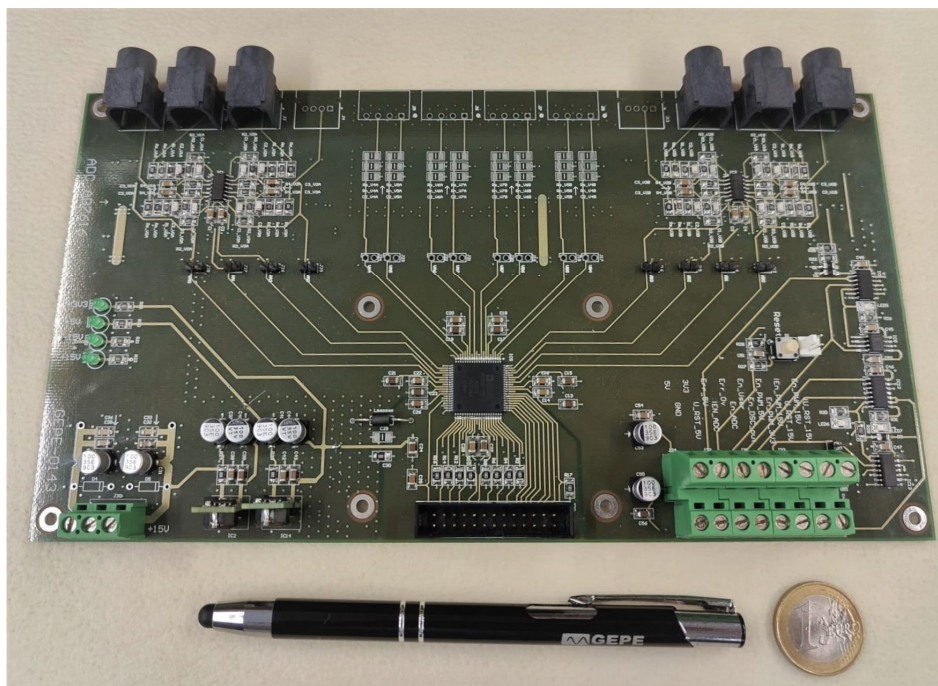


Figura 65: PCB final do ADC externo.

energia de modo controlado entre os submódulos. Tendo em conta que a DSC só consegue receber valores entre 0 e 3,3 V, sem que a placa seja danificada, os sinais lidos e convertidos tem que se situar entre os 0 e 3,3 V. Isto só é possível se for implementado um condicionamento de sinal nos sinais recebidos pelo ADC.

Foi escolhido o ADC AD7616 de 16 bits e 16 canais, fabricado pela *Analog Devices* [47]. Para diminuir significativamente o ruído que pode chegar ao DSC, obtendo um controlo mais estável, foi introduzido um filtro passa-baixo de segunda ordem conforme a Figura 66. O dimensionamento dos filtros foi efetuado com a ajuda da ferramenta desenvolvida pela *OKAWA* [48]. A frequência de corte para os filtros que correspondem aos sensores de tensão foi de 6,3 kHz e para os filtros de corrente a frequência de corte foi de 43 kHz. Foi feita uma conjugação entre os valores das resistências e dos condensadores para manter a atenuação do ruído de comutação e de manter a fase na frequência fundamental aproximadamente em 180° , evitando assim atrasos entre o valor real e o valor lido através do ADC.

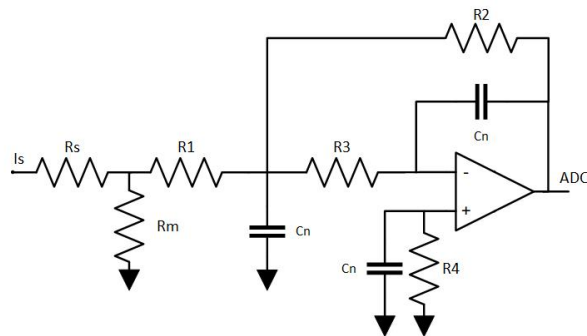


Figura 66: Esquemático do filtro passa-baixo de segunda ordem.

Na Figura 67 está representado o circuito comparador cuja função é realizar a deteção de erros e criar uma resposta rápida para proteger a integridade dos componentes envolvidos. A função deste circuito consiste na comparação de um sinal filtrado lido através do sensor com dois valores de referência, um positivo e outro negativo. O valor das resistências define o intervalo dos valores operacionais para cada sinal.

Caso o valor seja superior ao valor positivo máximo, ou inferior ao valor mínimo permitido, o valor do comparador passa ao nível lógico positivo e gera um sinal de erro. A função do comparador é realizada através do comparador de baixo consumo LM339 da Texas Instruments e contém quatro comparadores [49]. Para a placa foram projetados oito detetores de erro, o que foi possível implementar com quatro circuitos integrados LM339.

Foi realizado um mecanismo de memorização de erro, quando a variável controlada voltar ao valor estabelecido. Para tal, foi utilizado um circuito integrado NE555, fabricado pela Texas Instruments [50]. Operando por base de uma lógica de *set* e *reset*. Assim, após a deteção do erro, para a saída do estado de erro, é preciso que o botão *reset* seja acionado, o sistema saia do erro e o *set* também fique ativo.

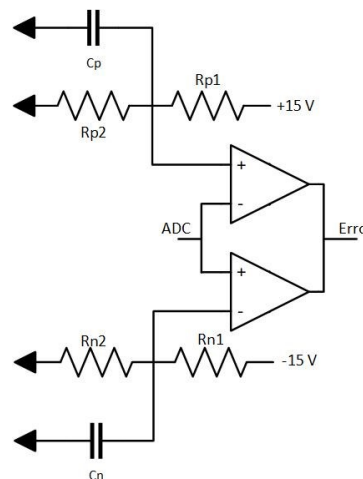


Figura 67: Esquemático do circuito de detecção de erro.

Para manter o estado do conversor seguro, o acionamento dos semicondutores só ocorre quando três sinais de *enable* diferentes estão ativos. Para isso, foram utilizadas duas portas lógicas AND. Portanto, os dois primeiros sinais de *enable* são dados através do acionamento do botão físico pelo utilizador e por um comando da DSC. O terceiro sinal de *enable* é dado quando não existe nenhum erro no ADC, este sinal é conjugado com o nível lógico resultado da saída anterior. A Tabela 6 apresenta o intervalo de valores da tensão sem detetar erro.

Tabela 6: Valores máximos para as variáveis de controlo.

Variável	Valor máximo positivo (V)	Valor máximo negativo (V)
V_{GRID}	450	0
V_{BESS}	26	0
V_{PV}	210	0
I_{GRID}	3,6	0
I_{BESS}	8,4	0
I_{PV}	8,4	0

5.9 Plataforma para o DSC

Para a realização do controlo digital presente na maioria dos sistemas existentes, é necessário realizar a aquisição e processamento de dados. O controlo necessário para o funcionamento do TAB será efetuado por meio de um DSC TMS320F28379D da Texas Instruments [51]. Dentro das suas características destacam-se: arquitetura *dual-core*, 200 MHz de frequência de *clock* e disposição de 169 *General Purpose Input/Output* (GPIO) pins, 24 canais de PWM com 16 bit de resolução com um complementar interno gerado com *dead-time* programado, etc.

Foi realizado um estudo dos periféricos que o DSC possui e dos sinais que seriam necessários para

realizar o controlo do conversor. Esta PCB torna-se indispensável, pois possibilita a conexão ao ADC externo através de uma *flat cable* o que dispensa as conexões de fios que seriam necessárias e torna a implementação mais organizada. Outra funcionalidade a ter em conta são os canais de PWM pois, para a elaboração do protótipo são necessários 6 canais de PWM, isto é, três PWM e os seus complementares para acionar os IGBTs. Porém, foram projetados 8 canais de PWM, para trabalhos futuros ou para outras técnicas de controlo. Esta estação também possui conexões para realizar *interface* com um *Digital to Analog Converter* (DAC) externo através do protocolo de *Serial Peripheral Interface* (SPI), GPIOs dedicados para as conexões dos contactores e conectores para o ADC externo.

Posteriormente, foi elaborado no Altium PCB Designer o *layout*, ilustrado na Figura 68. Também foi extraído o modelo 3D para ter uma melhor percepção da distribuição dos componentes físicos, como representado na Figura 69. Na Figura 70 é apresentada a PCB impressa com os componentes soldados.

Para permitir boa fiabilidade e maior organização, a PCB foi elaborada com quatro camadas. A primeira e a terceira camada correspondem aos planos de cobre atribuídos ao GND, onde são conectados todas as ligações correspondentes a esse sinal. A segunda camada é conectada aos sinais de potência fornecidos pelos reguladores de tensão, constituída por dois polígonos de 3,3 e 5 V. Por fim, a quarta camada, contém as pistas necessárias.

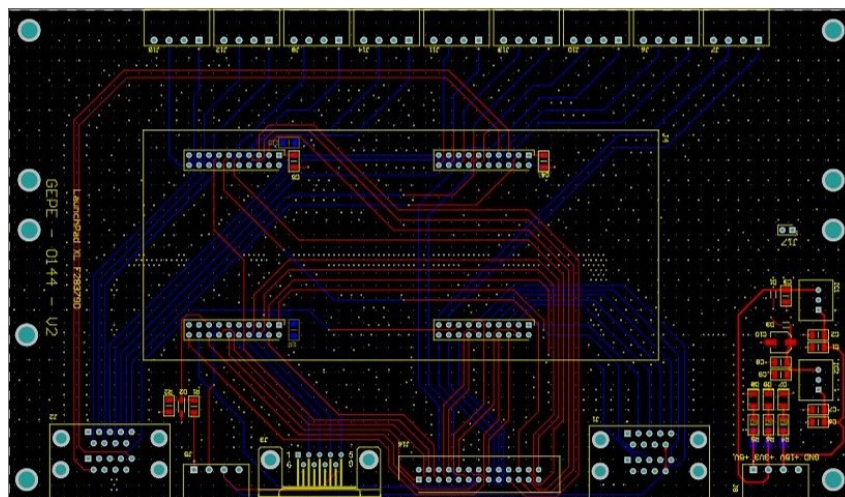


Figura 68: *Layout* da PCB da plataforma para a DSC no Altium PCB Designer.

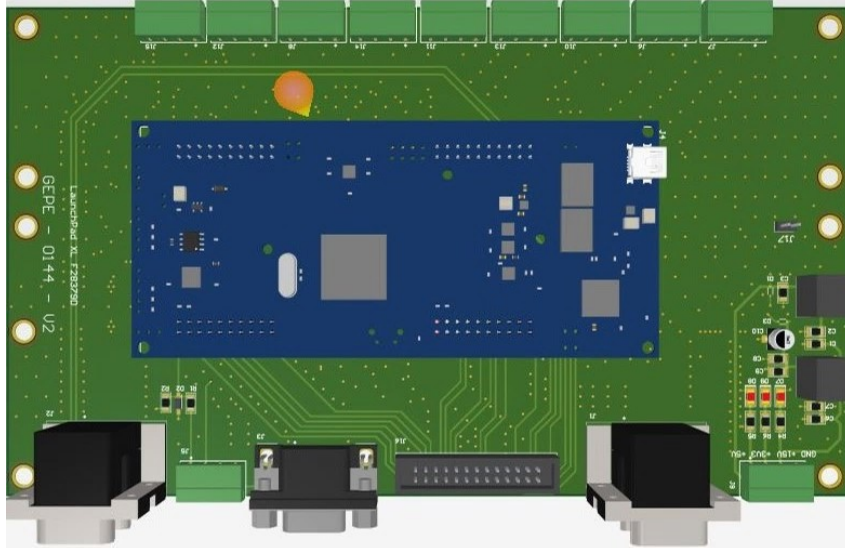


Figura 69: Visualização 3D da plataforma para a DSC no Altium PCB Designer.

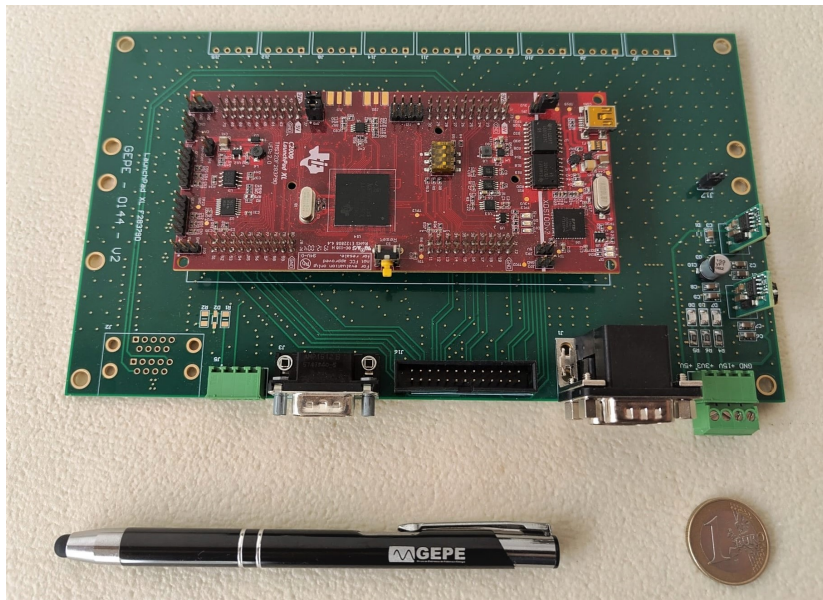


Figura 70: PCB da plataforma para a DSC.

5.10 Implementação do software

A utilização de um microcontrolador, neste caso TMS320F28379D, era indispensável para a realização do protótipo, pois executa os algoritmos de controlo necessários para o funcionamento do circuito. Ademais, adquire e processa os sinais de controlo permitindo a sua visualização direta através das variáveis selecionadas, aciona as pontes H gerando os sinais de PWM. A Figura 71 representa o ambiente de trabalho de programação do DSC - Code Composer Studio 10.1.1 da Texas Instruments. Para realizar a leitura dos valores de ADC pelo DSC é usada uma comunicação paralela, onde o DSC manda um sinal de inicialização e o ADC responde com o sinal *busy*, acionando uma interrupção externa onde os sinais são processados. Isto é efetuado a cada 20 μ s operando a uma frequência de amostragem de 50 kHz.

```

66 EPWM4Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_CLEAR; // set PWM1A on event A, up count
67 EPWM4Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_SET;
68
69 //Complementary PWM configs
70 EPWM4Regs.DBCTL.bit.OUT_MODE = DB_FULL_ENABLE;
71 EPWM4Regs.DBCTL.bit.POLSEL = DB_ACTV_NIC;
72 EPWM4Regs.DBRED.bit.DBFED = 80; //dead-time generation
73 EPWM4Regs.DBRED.bit.DBRD = 80;
74
75 //----- Pwm 6 -----
76 //----- Pwm 6 -----
77 //----- Pwm 6 -----
78
79 EPWM6Regs.TBPRD = Pwm_Period; // Set timer period
80 EPWM6Regs.CMPA.bit.CMPA = Pwm_Period/2; // Set duty 50%
81
82 EPWM6Regs.TBCTL.bit.PHSDIR = 0; //Control of the UP or DOWN
83
84 // EPwm3Regs.TBPHS.bit.TBPHS = Pwm_Period/2; // Phase is 90
85 EPwm3Regs.TBPHS.bit.TBPHS = Pwm_Period; // Phase is 180
86 //EPwm3Regs.TBPHS.bit.TBPHS = 0;
87 EPwm3Regs.TBCTR = EPwm3Regs.TBCTR;
88 EPwm6Regs.TBCTL.bit.SYNCOSEL = TB_SYNC_IN;
89 EPwm6Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UPDOWN; // Count up/down
90 EPwm6Regs.TBCTL.bit.PHSEN = TB_ENABLE; // Disable phase loading
91 EPwm6Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = TB_DIV1; // Clock ratio to SYSCLKOUT
92 EPwm6Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = TB_DIV1;
93
94 EPwm6Regs.CMPCTL.bit.SHOWMODE = CC_SHADOW; // Load registers every ZERO
95 EPwm6Regs.CMPCTL.bit.LOADMODE = CC_CTR_ZERO_PRD;
96 EPwm6Regs.CMPCTL.bit.SHOWMODE = CC_SHADOW; // Load registers every ZERO
97 EPwm6Regs.CMPCTL.bit.LOADMODE = CC_CTR_ZERO_PRD;
98
99 EPWM6Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_CLEAR; // set PWM1A on event A, up count

```

Figura 71: Ambiente de trabalho do Code Composer Studio.

O ADC manda 16 sinais de dados a cada leitura. Esses sinais são recebidos como entrada pela DSC e são mapeados em conjunto em grupos de quatro em cada registo do DSC, sendo que não é possível aceder aos 16 portos de uma vez num único registo. Assim, é efetuada a leitura dos quatro registos na íntegra e é aplicada uma lógica AND para guardar os dados dos portos pretendidos. Por fim, é feito um *shift* dos dados para organizar os 16 bits de dados do mais significativo para o menos significativo. Por fim, uma soma dos valores é efetuada e o valor é guardado no *array*. A Figura 72 representa os valores contidos no *array* no momento em que são realizadas leituras dos sensores.

Para usufruir de todas as funcionalidades do microcontrolador utilizado, foram usados os dois *Central Processing Unit* (CPU). Um deles é dedicado à aquisição de sinal e o outro é responsável pelos algoritmos de controlo e sinais de comando. Para conseguir a transferência de dados dos sinais adquiridos entre

Expression	Type	Value
reset	unknown	identifier not found: reset
V_A	int[4]	[4084,-7,2217,-10]
V_A [0]	int	4082
V_A [1]	int	-7
V_A [2]	int	2218
V_A [3]	int	-11
V_B	int[4]	[1691,1016,965,-16]
V_B [0]	int	1692
V_B [1]	int	997
V_B [2]	int	966
V_B [3]	int	-17

Figura 72: Demonstração dos valores de ADC lidos pelo DSC.

os dois CPU, é necessário armazenar os valores dos *arrays* e passar para o outro CPU por registos de memória partilhados.

A geração dos sinais de PWM é possível através da comparação de uma onda modular e uma onda portadora. A onda modular corresponde ao resultado dos cálculos. A onda portadora é configurada nos canais de PWM do DSC. Foram utilizados 3 canais de PWM e os seus respetivos complementares. Para realizar a geração da onda portadora é usada a técnica de modulação de *phase-shift*. Assim, a onda que serve como referência é posta em 90° , a onda do submodulo dos painéis solares é de 0° e a do submodulo das baterias é de 180° .

É de notar que, a variação do desfasamento e, por conseguinte, a variação da transferência de energia entre as três pontes, é manipulada variando os ângulos. Porém, em termos programáveis do DSC são utilizados valores digitais que correspondem aos respetivos ângulos. A Tabela 7 resume os intervalos correspondentes entre o ângulo e o valor digital.

Tabela 7: Valores digitais correspondentes aos respetivos ângulos.

Ângulo	Valor digital correspondente
$[-90^\circ; 0]$	[833; 1666]
0°	1666
$[0; 90]$	[1666; 2498]

Lógica para a implementação do *Phase-Shift* na DSC

Para realizar o algoritmo de controlo de transferência de energia entre as pontes-H foi necessário recorrer ao algoritmo de MPPT. Em primeiro lugar, é realizada a leitura do canal EPwm6Regs.TBPHS.bit.TBPHS e esse valor é guardado na variável phase3. Posteriormente, é realizada a leitura do canal de tensão e de corrente do painel solar fotovoltaico. Deste modo é efetuado o cálculo da potência que se pode extrair dos painéis solares fotovoltaicos. O algoritmo de MPPT recorre à lógica de *phase-shift*. O *phase-shift* vai determinar o desfasamento entre as ondas quadrangulares que atuam os IGBTs.

```
1 void phase_shift_calc(void) {
2     phase3 = EPwm6Regs.TBPHS.bit.TBPHS;
3     vpv = V_B[2];
4     ipv = V_A[2];
5     ppv = vpv * ipv;
6
7     // Algoritmo MPPT
8     if( ppv > ppv_ant ) {
9         if(vpv > vpv_ant)
10            phase3 = phase3 + inc;
11        else
12            phase3 = phase3 - inc;
13    }
14    else {
15        if( vpv > vpv_ant )
16            phase3 = phase3 - inc;
17        else
18            phase3 = phase3 + inc;
19    }
20    vpv_ant = vpv;
21    ppv_ant = ppv;
22    // Verifica os limites de funcionamento
23    if(phase3 >= 2359)
24        phase3 = 2359;
25    if(phase3 <= 1750)
26        phase3 = 1750;
27    // Carrega novamente os valores
28    EPwm6Regs.TBPHS.bit.TBPHS = phase3; // Phase is 180
29 }
```

Listing 1: Código C do algoritmo de MPPT.

5.11 Conclusão

Este Capítulo consistiu no desenvolvimento do protótipo no laboratório do GEPE. Foi possível dimensionar o transformador e executar os testes necessários para comprovar a sua robustez. Com a ferramenta Altium PCB Designer foi possível elaborar as PCBs necessárias como o ADC externo, as Pontes H, os circuitos de *drive* e a plataforma para o DSC.

Em conclusão, foi executado o código para realizar a transferência de energia entre os três portos do TAB com o recurso do *Code Composer Studio*.

Resultados experimentais

6.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados e validados os resultados experimentais obtidos com o protótipo desenvolvido no laboratório do GEPE. Os resultados experimentais são divididos em duas partes principais, tendo em vista a necessidade de validação individual dos submódulos. Assim, serão estudadas e validadas as transferências de energia do lado do primário para cada um dos secundários, isoladamente. Numa fase posterior, após a validação das componentes em separado, já se torna versátil interligar entre si os três enrolamentos. Como alvos de validação encontram-se principalmente os algoritmos de MPPT e *phase-shift*.

6.2 Linearização dos sensores

Para conseguir a conversão de um sinal analógico num sinal digital recorreu-se ao ADC externo, desse modo os sinais recebidos são convertidos num valor digital, para serem lidos e usados pelo DSC, fazendo a sua linearização e associação aos valores de tensão. Desde modo, foram introduzidas diferentes tensões nos sensores de tensão e o seu valor digital convertido. Podendo ser estabelecida a relação como, por exemplo, está representado na Figura 73 a linearização dos sensores de tensão contendo as respetivas funções linearizadas.

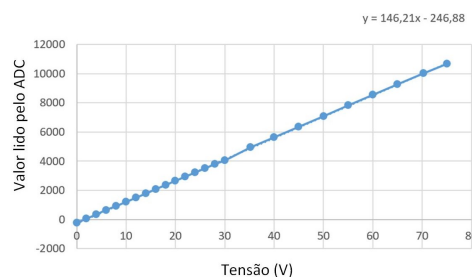


Figura 73: Linearização dos valores de tensão lidos em função do valor digital correspondente.

6.3 Funcionamento no modo *Double Active Bridge*

Os próximos testes representam os ensaios iniciais do sistema. Nesta fase é pretendido validar os conversores CC-CA em conjunto com o transformador isoladamente. Assim sendo, foram inicialmente testadas as componentes referentes à rede doméstica e às baterias, ou seja, o primário e um dos secundários. Para realizar a transferência de energia foram introduzidos valores que correspondem aos ângulos de defasamento entre as ondas.

A Figura 74 representa o esquemático do teste realizado. Em que o enrolamento do primário é alimentado com uma tensão V_1 e o enrolamento do secundário que de deve às baterias foi alimentado com V_2 . Utilizou-se também uma ponte retificadora e uma resistência no barramento de $4,4 \Omega$.

Deste modo, nas Figuras 75 - 78 podem ser verificadas três ondas. Onde a roxa é a tensão no enrolamento da *grid*, a azul a tensão no enrolamento das baterias e a onda a verde é a da corrente na saída das baterias. Neste ensaio o barramento da rede doméstica foi alimentada com 60 V e conforme a relação proporcional, o sistema de armazenamento do lado do secundário foi alimentado com 4 V.

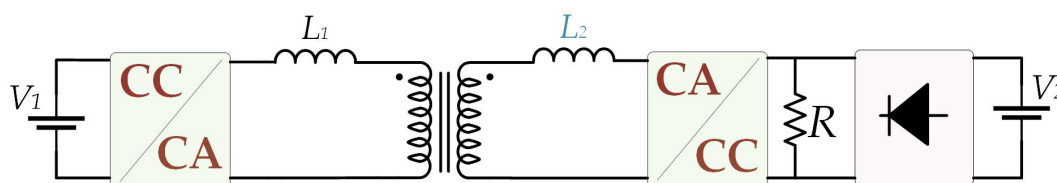


Figura 74: Esquemático do teste realizado no modo DAB.

Inicialmente foi introduzido um defasamento bastante pequeno, por volta de 15° . Ao longo dos ensaios foi sempre considerado o enrolamento do primário, que contém a rede doméstica, como o sinal de referência para realizar o algoritmo de *phase-shift*. Deste modo, obteve-se o resultado apresentado na Figura 75 e uma aproximação de escala na Figura 76. Podendo-se comprovar que ocorre defasamento entre os sinais de saída no transformador.

As Figuras 77 e 78 são o resultado experimental da introdução de um defasamento de 30° entre os enrolamentos. Verifica-se que a corrente comparativamente com um defasamento de 15° subiu o dobro, ou seja, a potência transferida também subiu.

As Figuras 79 e 80 correspondem ao ensaio entre o lado da rede doméstica e os painéis solares fotovoltaicos. Os valores das tensões nos barramentos foram de 80 V para a rede doméstica e na sua relação 13,5 V para os painéis solares fotovoltaicos. Como se pode comprovar, ocorre defasamento entre as duas pontes e a corrente medida no enrolamento dos painéis solares fotovoltaicos está consoante o pressuposto.

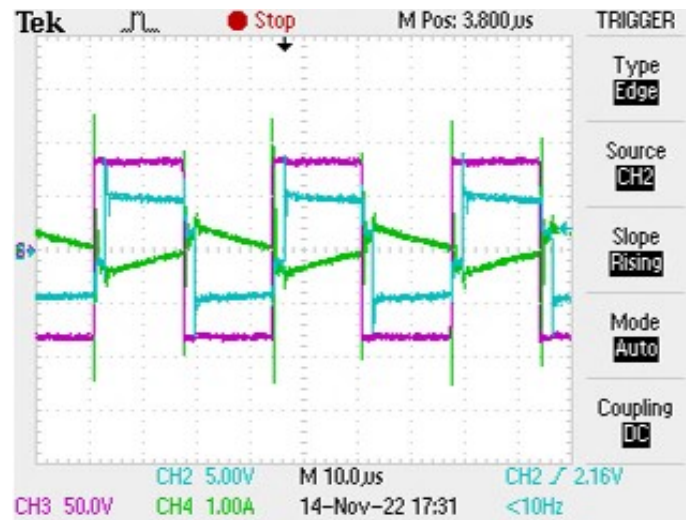


Figura 75: Resultado experimental no modo DAB entre a rede domestica e o sistema de armazenamento. Tensões a saída do conversor CC-CA e corrente de entrada do enrolamento do sistema de armazenamento.



Figura 76: Resultado experimental ampliado no modo DAB entre a rede domestica e o sistema de armazenamento com desfasamento de 15°. Tensões à saída do conversor CC-CA e corrente de entrada do enrolamento do sistema de armazenamento.

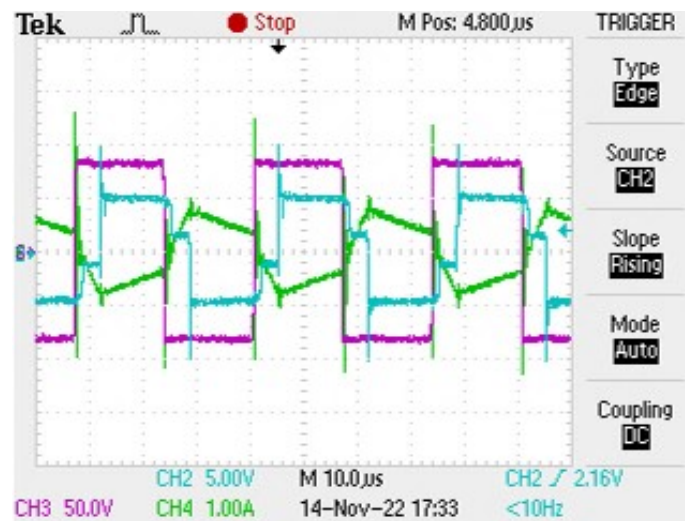


Figura 77: Resultado experimental no modo DAB entre a rede domestica e o sistema de armazenamento com desfasamento de 30° . Tensões à saída do conversor CC-CA e corrente de entrada do enrolamento do sistema de armazenamento.

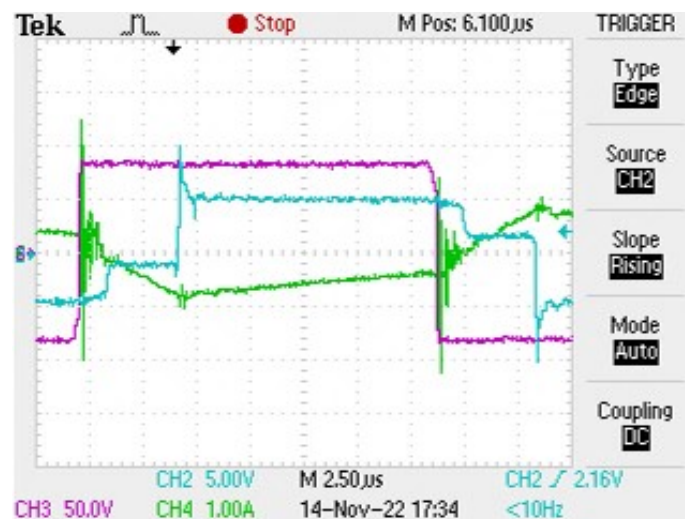


Figura 78: Resultado experimental ampliado no modo DAB entre a rede domestica e o sistema de armazenamento com desfasamento de 30° . Tensões à saída do conversor CC-CA e corrente de entrada do enrolamento do sistema de armazenamento.



Figura 79: Resultado experimental no modo DAB entre a rede domestica e o com desfasamento de 15° . Tensões à saída do conversor CC-CA e corrente de entrada do enrolamento do painel solar.

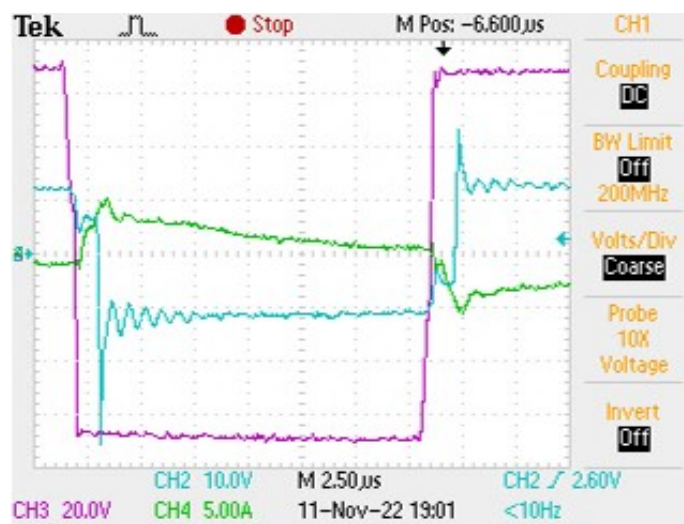


Figura 80: Resultado experimental ampliado no modo DAB entre a rede domestica e o com desfasamento de 15° . Tensões à saída do conversor CC-CA e corrente de entrada do enrolamento do painel solar.

6.4 Funcionamento no modo *Triple Active Bridge*

Nesta fase, após as validações dos dois modos possíveis do funcionamento do conversor DAB. Pode ser efetuado o ensaio do sistema na íntegra, ou seja, o conversor TAB pode ser implementado, interligando todos os enrolamentos por meio do transformador acompanhado pelas bobinas auxiliares para efetuar troca de energia entre as pontes constituintes do sistema. Numa primeira fase, os testes foram efetuados com as tensões de 60 V para o lado da rede doméstica, 10 V para os painéis solares fotovoltaicos e 3 V para o sistema de armazenamento. Sendo ainda incorporadas um conjunto de resistências com o valor de $2,3 \Omega$ servindo como carga no lado dos painéis solares fotovoltaicos e no sistema de armazenamento. Inicialmente, conforme se comprova na Figura 81 não ocorre transferência de energia e as tensões à saída dos enrolamentos estão conforme o estipulado. Sendo que, estas ondas são medidas na saída dos enrolamentos do transformador, a onda a roxo é do lado da rede doméstica, a onda amarela é do lado dos painéis solares fotovoltaicos, a onda a azul refere-se ao sistema de armazenamento e a onda a verde é a corrente do lado do enrolamento dos painéis solares fotovoltaicos.



Figura 81: Resultado experimental no modo TAB sem desfasamentos. Tensões à saída do conversor CC-CA e corrente de entrada do enrolamento do painel solar.

Na Figura 82 está representado o resultado do ensaio com introdução de desfasamentos. Assim, o ângulo de desfasamento entre o lado da rede doméstica e os painéis solares fotovoltaicos foi de 30° . Enquanto, o ângulo entre a rede doméstica e o sistema de armazenamento foi de 10° . Pode-se então comprovar que o algoritmo de *phase-shift* encontra-se em funcionamento para a topologia proposta.

6.5 Validação do algoritmo de MPPT

O princípio de funcionamento de um módulo solar fotovoltaico visando verificar o funcionamento do algoritmo MPPT está representado na Figura 83. Segundo a teoria da máxima transferência de potência,

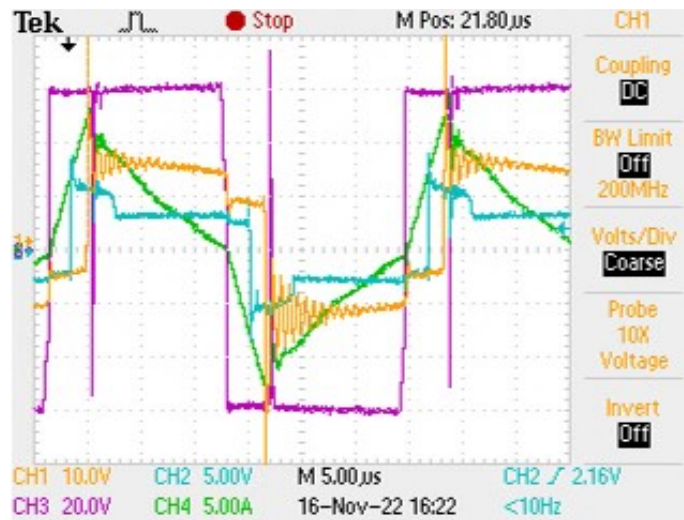


Figura 82: Resultado experimental ampliado no modo TAB com desfasamentos nos enrolamentos do secundário de 10° e 30° relativamente à referência. Tensões à saída do conversor CC-CA e corrente de entrada do enrolamento do painel solar.

quando a tensão de entrada V_{in} ficar distribuída equitativamente aos terminais do reóstato V_R e em V_L , o sistema fica a operar no ponto de potência máxima.

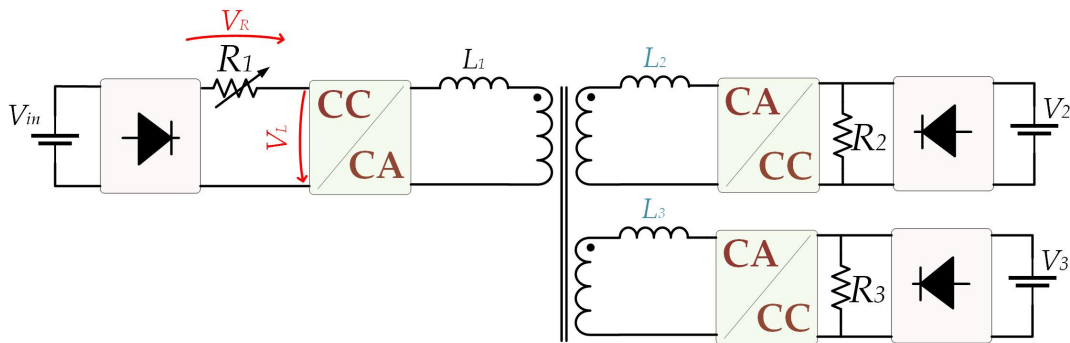


Figura 83: Esquemático para implementar o teste do algoritmo MPPT.

O algoritmo de MPPT efetua os ajustes necessários de forma dinâmica para conseguir chegar a essa condição. A fonte tem um valor de 30 V, e o reóstato 15 Ω . A Figura 84 confirma o correto funcionamento do algoritmo de MPPT, onde a onda representada a amarelo é a que se refere ao V_L e a onda representada a azul é a tensão aos terminais do reóstato V_R . No instante inicial, a tensão aos terminais do reóstato tem o valor nulo e a tensão aos terminais da fonte tem 28 V. Após alguns instantes desde o início do funcionamento do sistema, o algoritmo de MPPT conseguiu encontrar o ponto de máxima transferência de energia. Ou seja, a tensão disponível ficou distribuída de forma equitativa por V_R e em V_L , como se verifica na Figura 84.

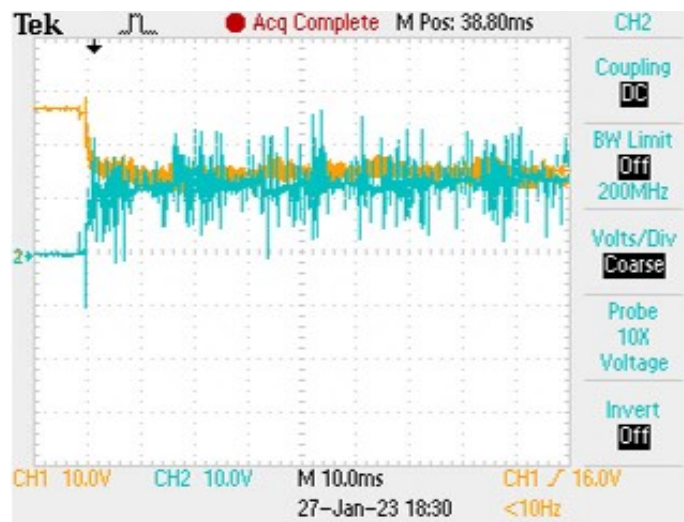


Figura 84: Resultados obtidos com o algoritmo de MPPT de perturbação e observação. Tensão aos terminais do reóstato e a saída do conversor CC-CA.

Dentro das mesmas condições, foi verificado o desfasamento entre o sinal de referência que corresponde ao enrolamento do primário e o sinal desfasado na saída do enrolamento dos painéis solares fotovoltaicos Figura 85. No momento em que as tensões V_R e V_L ficam equivalentes, existe um desfasamento entre as tensões nos barramentos um pouco inferior à 45° , tal como previsto teoricamente e através das simulações, sendo que o ângulo de desfasamento para a maior extração de potência, foi calculado em torno de 42° .



Figura 85: Resultado do desfasamento obtido com o algoritmo de MPPT de perturbação e observação. Tensões à saída do conversor CC-CA.

6.6 Conclusão

Dentro deste Capítulo, foram validados os resultados experimentais gradual e independentemente. Primeiramente, no modo DAB e posteriormente no modo TAB.

Relativamente aos resultados obtidos com o prototipo a funcionar no modo DAB, foi validado e verificado que ocorre troca de energia entre os portos e que existe um desfasamento entre as tensões à saída do conversor CC-CA.

No que toca aos resultados obtidos em modo TAB, foi possível validar o algoritmo de MPPT e *phase-shift*. Validando também, que ocorre troca de energia entre os três portos.

Conclusão

7.1 Conclusão

Durante a realização deste trabalho de dissertação, foi assimilada a topologia do microinversor TAB. O principal objetivo abrangeu a gestão mais eficiente da energia proveniente de uma fonte de energia renovável. Posto isto, foi possível implementar uma topologia que permitiu uma gestão de energia entre uma rede doméstica, uma fonte de energia renovável e um sistema de armazenamento, visando que a troca de energia ocorra conforme as necessidades e possibilidades no instante considerado.

No primeiro capítulo, foi introduzido o panorama energético mundial, as alterações a decorrer conforme as necessidades do mercado e dos consumidores. Atualmente, a população presencia um dos maiores avanços tecnológicos, o que também se contempla num maior consumo energético, o aumento do número de eletrodomésticos, o aparecimento dos carros elétricos são os principais motivos para esses aumentos. Foi analisado o desenvolvimento e produção de energia renovável em Portugal, um ponto essencial para o país que não explora recursos fósseis. Em particular, foi possível analisar a exploração de diversas fontes renováveis, concluindo que a extração de energia solar fotovoltaica tem um impacto grande nesse setor. Por isso, analisou-se que desde 2010, a capacidade instalada no setor fotovoltaico aumentou dez vezes. Da mesma forma, um crescimento significativo ocorre mundialmente, tendo em vista também o nível económico crescente dado à esta exploração. Pode-se considerar que o setor das energias renováveis é um bom recurso de investimento, dos quais não só empresas e entidades governamentais tem um papel fundamental, mas também investidores particulares e empresas em grande prosperidade com visão enorme do mercado.

Após a análise dos problemas causados pelos recursos fósseis, em adversidade as vantagens em comparação com as fontes de energia renovável, pode-se prosseguir para o estudo das fontes de energia renovável no decorrer do segundo capítulo. Em particular, é de forte interesse o foco no estudo da energia solar fotovoltaica, pois, como referido anteriormente, é um recurso que pode ser empregue em muitas aplicações, nomeadamente satisfazer as necessidades energéticas para os cenários onde a rede elétrica se encontra difícil de alcançar ou requer um investimento demasiado vigoroso. Além disso, as energias renováveis estão cada vez mais presente no quotidiano e nas construções urbanas em todo o

mundo. Assim, pode-se também fundamentar a necessidade considerável de acompanhar com sistemas de armazenamento de energia a extração de energia solar fotovoltaica. Posto isto, é necessário considerar e estudar os vários tipos de painéis solares fotovoltaicos existentes no mercado. Mantendo o foco nos que são mais sensatos economicamente, considerando a sua eficiência e disponibilidade no mercado. Assim sendo, são considerados os mais relevantes no mercado o painel solar de silício monocristalino e policristalino. Em seguida, é feita uma análise do crescimento da utilização de sistemas de armazenamento, as principais tecnologias e empregabilidades adequadas. Dado isto, foi necessário analisar as principais características das baterias, o que permitiu analisar os fatores que prejudicam a sua eficiência e condições de uso em segurança. Não menos importante, foi ter examinado o modelo elétrico de uma bateria, pois permitiu a sua inclusão no dimensionamento e nas simulações do sistema.

No terceiro capítulo foi efetuada uma introdução às topologias de conversores de eletrônica de potência de interesse para empregabilidade neste sistema, tal como as técnicas de controlo indispensáveis. Portanto, a troca de energia entre três elementos precisa de ser efetuada de forma mais simplista e eficaz. Para tal, é feito o estudo das diferentes configurações que podem ser integradas na topologia proposta. Do mesmo modo, é analisada a utilidade da topologia proposta face a outras aplicações possíveis de eletrônica de potência, como, por exemplo, a sua integração em *microgrids*, nos sistemas de UPS e na indústria aeronáutica. Provando assim, a utilidade desta topologia não só para extração de energia proveniente de fontes renováveis, mas também para outras aplicações, tornando esta topologia mais versátil, promovendo assim a sua utilidade e importância de realização. Seguidamente, são analisados os tipos de isolamentos em específico nos conversores de eletrônica de potência de três portas. Desta análise, pode-se concluir que é mais adequado empregar nesta topologia conversores com isolamento galvânico, sendo possível através da integração de um transformador. Esta adequação provem da necessidade de garantir estabilidade e isolamento entre os três elementos. Por fim, foram apresentadas técnicas de controlo indispensáveis para o microinversor. É efetuado um estudo e seleção entre as técnicas já conhecidas e estudadas a nível de modulação dos sinais de comando e dos algoritmos de ponto de extração de máxima potência. Tendo em conta a aplicação em causa, o algoritmo de MPPT tem um papel fundamental na extração da maior quantidade de energia proveniente dos painéis solares fotovoltaicos. Podendo-se concluir que o algoritmo de condutância incremental pode ter a vantagem de ter um tempo de estabilização mais rápido em torno do ponto de potência máxima, dadas as condições de sombreamento. Porém, o algoritmo de perturbação e observação é o que é empregue, pois a nível de desenvolvimento de *software* é o mais simplista.

Seguidamente, é introduzido o quarto capítulo em que foi realizado o estudo mais aprofundado do princípio de funcionamento do TAB e feita a simulação da topologia proposta com o *software* PSIM. Nesse sentido, foram empregues os painéis solares fotovoltaicos conforme as características de desempenho do fabricante. Posteriormente, foi possível dimensionar o banco das baterias a utilizar. Durante o processo de simulação foi possível desenvolver e validar a técnica de sintonização com a rede PLL, que apesar de não ser aplicada no protótipo laboratorial, promoveu um maior enriquecimento de conhecimento quanto à sua utilização. Assim, a PLL foi estudada conforme várias condições da rede, podendo-se comparar

a condição teórica ideal e também ser simulada a rede elétrica real com possíveis distúrbios. Posteriormente, é possível validar o algoritmo de MPPT, concluindo que este acompanha a extração da energia disponível nos painéis solares fotovoltaicos. Da mesma forma, foi possível validar a técnica de controlo de transferência de energia entre os três portos via *phase-shift*. Este passo no desenvolvimento da dissertação teve um papel fundamental para validar os algoritmos de controlo, do dimensionamento do sistema, nomeadamente pode-se destacar a importância da utilização das indutâncias auxiliares.

Após a validação da topologia proposta com recurso ao *software* de simulação, foi possível proceder à implementação do protótipo. Assim, no quinto capítulo são descritos todos os constituintes do sistema necessários para alcançar o protótipo final. Inicialmente com o dimensionamento do transformador de alta frequência. Passando pela escolha dos componentes para diversas PCBs em conformidade com as técnicas de controlo escolhidas. Introduzindo o *software* Altium PCB Designer, indispensável para a realização e esquematização do *hardware*. Nomeadamente, a implementação da conversão de um sinal analógico para um sinal digital e o condicionamento de sinal incorporado, o *hardware* indispensável para o correto funcionamento do comando dos *IGBTs*. Tal como, é feito o estudo do microcontrolador e da plataforma de implementação dos algoritmos de controlo. Por fim, pode-se destacar que nesta fase foi realizado um aperfeiçoamento das técnicas de *design* e soldadura dos componentes.

No sexto capítulo são apresentados os resultados experimentais efetuados ao protótipo no laboratório do GEPE. Foi possível validar a troca de energia entre os três enrolamentos, em conformidade com os sinais de comando, para as possíveis alternativas de funcionamento. Foi observado o correto funcionamento do algoritmo de MPPT e do algoritmo de *phase-shift*, sendo os algoritmos mais relevantes da topologia proposta. No decorrer dos resultados obtidos foi também imprescindível a sua comparação com os resultados de simulação, validando a topologia proposta em funcionamento. Durante este período, foram encontradas diversas dificuldades como, por exemplo, a necessidade de encontrar alguns circuitos integrados alternativos, dado á fase crítica no mercado dos semicondutores. A nível de aquisição do sinal foi necessário conjugar a capacidade de aquisição e processamento do sinal por parte do ADC externo e a capacidade superior da DSC. Ainda dentro deste tópico, foi verificada a consequência de danificação de alguns circuitos integrados fruto do mau dimensionamento do condicionamento de sinal na sua fase inicial e testado individualmente. Pode-se concluir que foi conseguida a implementação da topologia proposta e da sua finalidade.

7.2 Trabalhos Futuros

Embora se ter concluído que a implementação da topologia proposta foi bem sucedida, existem aspetos a serem melhoradas no desenvolvimento do protótipo e nos seus algoritmos de controlo, nomeadamente:

1. Seria de grande interesse conseguir empregar nesta topologia o algoritmo de condutância incremental, sendo que é uma topologia que visa a ter melhor desempenho quanto às condições de

sombreamento mais bruscas. Assim, seria necessário estudar e efetuar alterações necessárias a nível de *software*.

2. Tendo em conta que o tempo de realização do protótipo foi limitado, não foi possível realizar a sintonização com a rede elétrica e testar o algoritmo da PLL a não ser por meio de simulação. Considero que seria um dos pontos de trabalho futuro a concluir dado a sua importância no desenvolvimento de aplicações de eletrónica de potência. Do mesmo modo, as dificuldades que esta implementação poderia trazer seriam enriquecedoras.
3. Outro ponto, não menos importante, seria compactar a topologia sem prejudicar a segurança e integridade. Assim, algumas considerações no desenvolvimento das PCBs seriam tidas mais em conta.
4. Realizar uma interligação modular de duas topologias TAB seria uma análise interessante e de forte investigação a nível científico, como as integrantes de controlo e *hardware* associado. De forma a empregar esta topologia num número ainda mais versátil de aplicações.

Bibliografia

- [1] S. Executivo. *Panorama das Transições Energéticas Mundiais 2022: Voia do 1,5°C - Sumário executivo*. 2022. isbn: 9789292604295. url: www.irena.org (ver p. 1).
- [2] *Energias Renováveis, a energia do Futuro | EDP Distribuição*. url: <https://www.e-redes.pt/pt-pt/redes-do-futuro/producao-de-energia/energias-renovaveis> (ver p. 1).
- [3] *Solar energy*. url: <https://www.irena.org/solar> (ver pp. 2–5).
- [4] *APREN - Produção*. url: <https://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/producao> (ver p. 2).
- [5] *10 melhores países para investir em energias renováveis*. url: <https://noctula.pt/investir-em-renovaveis/> (ver p. 3).
- [6] *Renewable Energy Country Attractiveness Index | EY Portugal*. url: <https://www.ey.com/pt-pt/recai> (ver p. 3).
- [7] L. E. Frenzel. “Radio/Wireless”. Em: *Electronics Explained* (2010), pp. 147–182. doi: 10.1016/B978-1-85617-700-9.00007-2 (ver p. 8).
- [8] A. M. Bagher. “Types of Solar Cells and Application”. Em: *American Journal of Optics and Photonics* 3 (5 2015), p. 94. issn: 2330-8486. doi: 10.11648/J.AJOP.20150305.17. url: <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2015/09/types-of-solar-panels> (ver pp. 9, 10).
- [9] *Baterias de lítio-íon Como funcionam? - Iberdrola*. url: <https://www.iberdrola.com/inovacao/baterias-ion-litio> (ver p. 11).
- [10] B. Scrosati e J. Garche. *Lithium batteries: Status, prospects and future*. Mai. de 2010. doi: 10.1016/j.jpowsour.2009.11.048 (ver p. 11).
- [11] *Armazenamento eficiente de energia - Iberdrola*. url: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/armazenamento-eficiente-de-energia> (ver p. 11).
- [12] *FERNANDO HAEMING GERENT METODOLOGIA DE PROJETO DE INVERSORES MONOFÁSICOS DE TENSÃO PARA CARGAS NÃO-LINEARES FLORIANÓPOLIS 2005* (ver p. 16).

- [13] L. Jiang e D. Costinett. "A triple active bridge DC-DC converter capable of achieving full-range ZVS". Em: vol. 2016-May. 2016. doi: 10.1109/APEC.2016.7467974 (ver p. 17).
- [14] K. Nishimoto, Y. Kado e K. Wada. "Implementation of decoupling power flow control system in triple active bridge converter rated at 400 V, 10 kW, and 20 kHz". Em: *IEEJ Journal of Industry Applications* 7 (5 2018), pp. 410–415. issn: 21871108. doi: 10.1541/ieejia.7.410 (ver p. 18).
- [15] F. Giuliani et al. "GaN-based triple active bridge for avionic application". Em: Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., ago. de 2017, pp. 1856–1860. isbn: 9781509014125. doi: 10.1109/ISIE.2017.8001532 (ver p. 20).
- [16] B. Sarlioglu, S. Member e C. T. Morris. *More Electric Aircraft-Review, Challenges and Opportunities for Commercial Transport Aircraft (Invited Paper)* (ver p. 20).
- [17] *Unidades de Alimentação Ininterrupta* (ver p. 20).
- [18] C. Zhao e J. W. Kolar. "A novel three-phase Three-Port UPS employing a single high-frequency isolation transformer". Em: vol. 6. 2004, pp. 4135–4141. isbn: 0780383990. doi: 10.1109/PESC.2004.1354730 (ver p. 20).
- [19] V. L. Pham e K. Wada. *Applications of triple active bridge converter for future grid and integrated energy systems*. 2020. doi: 10.3390/en13071577 (ver p. 21).
- [20] Y. Yu e K. Wada. "Simulation Study of Power Management for a Highly Reliable Distribution System using a Triple Active Bridge Converter in a DC Microgrid". Em: *Energies* 11 (11 nov. de 2018). issn: 19961073. doi: 10.3390/en11113178 (ver p. 21).
- [21] J. Hu et al. "Modular Triple-Active Bridge DC-DC Converters for Utility-Scale Photovoltaics-Plus-Battery Storage Systems Connected to MVDC Grids". Em: Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., nov. de 2020, pp. 880–887. isbn: 9781728153018. doi: 10.1109/IPEMC-ECCEAsia48364.2020.9368139 (ver p. 22).
- [22] H. Tao, J. L. Duarte e M. A. Hendrix. "Three-port triple-half-bridge bidirectional converter with zero-voltage switching". Em: *IEEE Transactions on Power Electronics* 23 (2 2008). issn: 08858993. doi: 10.1109/TPEL.2007.915023 (ver p. 22).
- [23] J. Maneiro et al. "EPE'17 ECCE Europe". Em: (2017). doi: 10.23919/EPE17ECCEEurope.2017.8099005i. url: www.supergrid-institute.com (ver p. 23).
- [24] T. Younis, A. A. Ibrahim e P. Mattavelli. "Comparison between Two-level and Three-level Based Multi-port Converter for Interconnected MVAC Microgrids". Em: vol. 2021-October. IEEE Computer Society, out. de 2021. isbn: 9781665435543. doi: 10.1109/IECON48115.2021.9589968 (ver p. 23).

- [25] N. Zhang, D. Sutanto e K. M. Muttaqi. *A review of topologies of three-port DC-DC converters for the integration of renewable energy and energy storage system*. 2016. doi: 10.1016/j.rser.2015.11.079 (ver p. 25).
- [26] G. L. Filho, R. A. P. Franco e F. H. T. Vieira. "Algoritmo de Seguimento do Ponto de Máxima Potência para Sistemas Fotovoltaicos considerando Minimização de Erro e Derivada da Potência". Em: *Tendências em Matemática Aplicada e Computacional* 21 (1 2020), pp. 157–170. doi: 10.5540/tema.2020.021.01.00157. url: www.scielo.br/tema (ver p. 28).
- [27] S. Sengar. *Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic System: A Review*. 2014, pp. 147–154. url: <http://www.ripublication.com/iraer.htm> (ver p. 28).
- [28] A. Hafemeister, J. B. Dias e L. A. C. Poltosi. *APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA (MPPT) EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS*. 2019. doi: 10.22533/at.ed.66719220111 (ver p. 28).
- [29] I. V. Banu, R. Beniuga e M. Istrate. "Comparative analysis of the perturb-and-observe and incremental conductance MPPT methods". Em: 2013. isbn: 9781467359801. doi: 10.1109/ATEE.2013.6563483 (ver p. 29).
- [30] S. De e C. Lobato. *UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA FACULDADE DE ENGENHARIA DEPARTAMENTO DE ENERGIA*. 2015 (ver p. 29).
- [31] P. K. Mishra e P. Tiwari. "Incremental conductance MPPT in grid connected PV system". Em: *International Journal of Engineering, Science and Technology* 13 (1 jul. de 2021), pp. 138–145. issn: 2141-2820. doi: 10.4314/ijest.v13i1.21s (ver p. 29).
- [32] A. K. Podder, N. K. Roy e H. R. Pota. *MPPT methods for solar PV systems: A critical review based on tracking nature*. Jul. de 2019. doi: 10.1049/iet-rpg.2018.5946 (ver p. 30).
- [33] J. S. Ko, J. H. Huh e J. C. Kim. *Overview of maximum power point tracking methods for PV system in micro grid*. Mai. de 2020. doi: 10.3390/electronics9050816 (ver p. 30).
- [34] S. Chaudhary et al. "PROJECT REPORT SOLAR POWERED STREET LIGHTING SYSTEM WITH OPTIMUM USE OF BATTERY CAPACITY AND MONITORING SYSTEM DESIGN AND FABRICATION OF A MULTILEVEL INVERTER View project Solar Powered Street lighting system with optimum use of battery capacity and monitoring system View project". Em: (). doi: 10.13140/RG.2.2.17912.78083. url: <https://www.researchgate.net/publication/350681451> (ver p. 30).
- [35] *MODEL KC200GHT-2 KC200GHT-2*. url: <http://www.kyocera.com> (ver p. 35).
- [36] A. (Luque e S. Hegedus. *Handbook of photovoltaic science and engineering*. Wiley, 2003, p. 1138. isbn: 0471491969 (ver p. 36).
- [37] *PRODUCT SPECIFICATION Lithium-ion Battery Model: IFP 45120146-50Ah (LiFePO₄)*. url: <http://www.winabattery.com> (ver p. 36).

-
- [38] E. M. Adzic e B. Dumnic. *PLL synchronization in grid-connected converters Smart Electricity Distribution Grids Based on Distribution Management System and Distributed Generation View project Hardware-in-the-loop Simulation of Power Electronics and Microgrids View project Nikola Celanovic*. url: <https://www.researchgate.net/publication/259974209> (ver p. 36).
- [39] F. Blaabjerg et al. *Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems*. Out. de 2006. doi: 10.1109/TIE.2006.881997 (ver p. 36).
- [40] M. Rajan et al. *Phase Locked Loop for synchronization of Inverter with Electrical grid: A Survey*. url: www.ijert.org (ver p. 37).
- [41] “51.Manual de Procedimentos da Qualidade de Serviço (versão ERSE)”. Em: () (ver p. 37).
- [42] R. W. Erickson e D. Maksimović. *Fundamentals of Power Electronics Third Edition* (ver p. 46).
- [43] C. W. T. McLyman. *Transformer and inductor design handbook*. Marcel Dekker, 2004. isbn: 0824753933 (ver p. 47).
- [44] *Fuses and Circuit Breakers 1.1.1 Fuses* (ver p. 49).
- [45] “Infineon-IKW40N120H3-DS-v02_01-EN”. Em: () (ver p. 53).
- [46] dscottle. *IXFH42N50P2 IXFT42N50P2 Polar2 TM HiperFET TM Power MOSFET N-Channel Enhancement Mode Avalanche Rated Fast Intrinsic Diode*. 2011 (ver p. 53).
- [47] A. Devices. *6-Channel DAS with 16-Bit, Bipolar Input, Dual Simultaneous Sampling ADC CLAMP CLAMP CLAMP CLAMP CLAMP CLAMP CLAMP CLAMP*. url: www.analog.com (ver p. 60).
- [48] *Filter Design and Analysis*. url: <http://sim.okawa-denshi.jp/en/Fkeisan.htm> (ver p. 60).
- [49] *This is information on a product in full production. LM139, LM239, LM339*. 2014. url: www.st.com (ver p. 60).
- [50] *NA555, NE555, SA555, SE555*. 1973. url: www.ti.com (ver p. 60).
- [51] *TMS320F2837xD Dual-Core Microcontrollers*. 2021. url: www.ti.com (ver p. 61).

