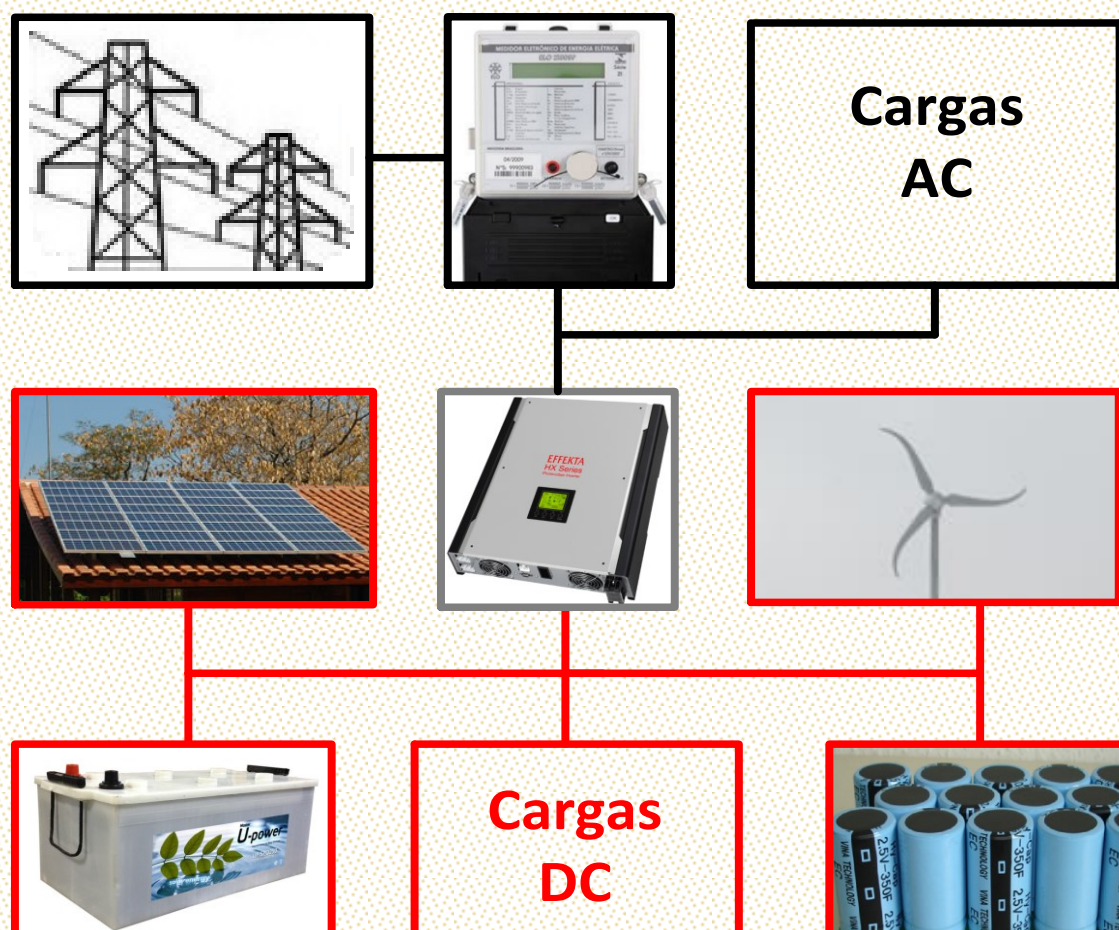




Fernando Miguel Soares Mamede dos Santos

ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ASSOCIADO À PRODUÇÃO COM ORIGEM EM FONTES RENOVÁVEIS

Tese de doutoramento em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, no Ramo de Especialização de Energia, orientada por Professor Doutor Humberto Manuel Matos Jorge e Professor Doutor Sérgio Manuel Ângelo da Cruz e apresentada ao Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Junho de 2016



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ASSOCIADO À PRODUÇÃO COM ORIGEM EM FONTES RENOVÁVEIS

Por

Fernando Miguel Soares Mamede dos Santos

Bacharel em Engenharia Eletrotécnica (1999)

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica (2001)

Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores (2003)

Dissertação submetida à Universidade de Coimbra,

como requisito parcial para obtenção do grau de

Doutor em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Especialidade de Energia

Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Universidade de Coimbra

Coimbra

Junho de 2016

Tese realizada sob a supervisão do

Prof. Doutor Humberto Manuel Matos Jorge

Professor Auxiliar do
Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade de Coimbra

e do

Prof. Doutor Sérgio Manuel Ângelo da Cruz

Professor Auxiliar do
Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade de Coimbra

“O que dá o verdadeiro sentido ao encontro é a busca, e é preciso andar muito para se alcançar o que está perto.”

José Saramago

Dedico este trabalho
à minha família.

Tema principal da tese:

Integração de diferentes módulos (produção, armazenamento, carga), interligados numa rede DC eficiente nas trocas de energia entre os módulos e entre a rede DC e a rede elétrica pública.

Áreas chave a considerar:

Energia renovável, armazenamento de energia, conversores DC-DC, topologia flyback, modelação por largura de pulso, controlo de corrente, barramento DC, unidade inteligente de controlo.

Resumo:

Nos últimos anos, o setor elétrico tem vindo a passar por profundas transformações. Estas são devidas aos avanços tecnológicos e alterações do tipo de cargas, maiores exigências ao nível da qualidade de energia, liberalização do mercado em curso, grandes preocupações com as questões ambientais sobretudo ao nível da produção, proliferação da geração distribuída, os clientes passaram a adotar uma postura exigente ao nível dos produtos e serviços, crescimento da procura da energia elétrica.

Na tese desenvolve-se uma abordagem baseada na geração distribuída com armazenamento de energia, tendo em consideração as oportunidades que a evolução do setor elétrico pode vir a contemplar. O consumidor com capacidade de produção, poderá contribuir de forma ativa para o funcionamento mais eficiente de todo o sistema elétrico. Esta contribuição estará ao nível de uma gestão de carga mais flexível que permitirá evitar ou adiar novos investimentos ao nível da produção, transmissão e distribuição de energia.

Com a inclusão do armazenamento de energia nas instalações finais, o sistema energético do cliente vai poder gerir as trocas com a rede, estando disponível para prestar serviços auxiliares à gestão da rede através da resposta a pedidos de auxílio por parte do gestor da rede, no sentido do fornecimento de energia/deslaste de cargas ou para aumento das cargas/armazenamento de energia. Pode atuar numa orientação de autoconsumo, onde se procura usar as energias renováveis para consumo nas cargas do consumidor final e aproveitar as oportunidades de negócio em troca do auxílio à rede, ou seja, de uma prestação de serviço.

Neste sentido foi desenvolvido um modelo de gestão do fluxo de energia entre produção, armazenamento, carga na habitação e rede pública, permitindo ao consumidor tirar benefícios económicos do seu sistema produção com armazenamento. Por outro lado, a rede elétrica beneficia com a diminuição das perdas ao nível da transmissão e distribuição, mas sobretudo com a flexibilidade da carga que lhe resolve problema nos períodos de ponta, ou mesmo em períodos em que há excesso de energia para distribuir. Além disso, com a existência deste tipo consumidor com sistema inteligente de gestão de energia, conseguem-se evitar ou adiar investimentos na atualização das redes para satisfazerem a procura.

O modelo de gestão de energia que é aqui apresentado permite gerir as correntes das diferentes fontes num barramento DC nas instalações finais de clientes residenciais ou comerciais. A gestão é feita através de conversores DC/DC aplicados entre as diferentes fontes DC e o barramento DC, sendo controlada a corrente que está disponível na saída de cada uma delas em especial dos elementos de armazenamento. A utilização da rede DC permite uma gestão mais eficiente da produção com base em fontes de energia renováveis, evitando-se perdas nas conversões AC/DC e DC/AC nas trocas com a rede AC, além disso facilita a gestão dos fluxos de energia entre os diversos elementos do sistema.

Entre o barramento DC e a rede AC existe um conversor que é responsável por promover as trocas nos dois sentidos através da leitura da tensão existente no barramento DC. Assim se a tensão

no barramento DC descer um pouco, vai trazer a energia de AC para DC e no caso da tensão no barramento DC subir um pouco, a energia passa do barramento DC para a rede AC.

Atualmente no regime português de auto consumidor a injeção de energia para a rede é pouco compensadora, ou perde-se a energia quando não há contagem ou existindo contagem é vendida a um preço baixo, muito inferior ao da compra de energia. Mas espera-se que mudanças regulatórias e de mercado da energia elétrica, levarão certamente a que os atuais consumidores/produtores possam vir a prestar serviços à rede elétrica pública, obtendo com eles novas formas de remuneração, que contribuirão para reduzir a sua fatura energética.

Abstract:

In recent years, the electricity sector has been undergoing profound changes. These are due to technological advances and changes in the type of loads, greater demands on power quality level, the ongoing market liberalization, major concerns with environmental issues particularly in terms of production, proliferation of distributed generation, customers have adopted a demanding posture in terms of products and services, growth in demand for electricity.

The thesis develops an approach based on distributed generation with energy storage, taking into account the opportunities that the evolution of the electricity sector can come to contemplate. The opportunities at the consumer level with a production capacity which can contribute actively to the more efficient operation of the entire electrical system. This contribution will be the level of a more flexible load management that will avoid or postpone new investments in the production, transmission and distribution of energy.

Adding energy storage in the final installation, the energy system of the customer will be able to manage exchanges with the network and is available to provide ancillary services to the management of the network by responding to requests for assistance from the network manager, the sense of power supply / shedding loads or increase in load / energy storage. Now operates taking advantage of business opportunities in exchange for aid to the network, ie the provision of service.

In this sense it was developed in this thesis a model of management of energy flow between production, load housing, storage and public network, enabling customers to get economic benefits from its production system with storage. On the other hand, the power grid benefits from the reduction in losses in terms of transmission and distribution, but above all with the flexibility of the load that solve problem during peak periods even in periods when there is excess energy to distribute. Moreover, the existence of this consumer type with intelligent power management system, can be avoided or postpone investments in upgrading networks to meet demand.

The power management model that is presented here allows manage the currents of different sources in a DC bus in the final installations of residential or commercial customers. The management is via DC/DC converters applied between different DC source and the DC bus and is controlled current which is available at the output of each especially of storage elements. The use of the DC bus allows more efficient management of production based on renewable energy sources, avoiding losses in conversion AC/DC and DC/AC in trade with the AC grid also facilitates the management of energy flows between the various elements of the system.

Between the DC bus and the AC grid, there is an inverter that is responsible for promoting the exchange in both directions through the reading of the tension on the DC bus. So if the voltage on the DC bus down a little, will bring the power of AC to DC and in the case of DC bus voltage rise slightly, the energy passes from the DC bus to the AC grid.

Currently the Portuguese system auto consumer injection into the grid is unrewarding or energy is lost there is no count or count there is sold at a low price much lower than buying energy. But it is expected to constant regulatory changes and the electricity market, will certainly lead

towards the current consumers / producers can come to provide services to the public power grid and achieve with them new forms of remuneration, which will help reduce energy bill.

Agradecimentos:

Ao terminar a dissertação não podia esquecer e deixar de agradecer a todos quanto contribuíram.

Antes de endereçar os agradecimentos, gostaria de mencionar que esta tese implicou vários anos de árduo esforço, agravado pelo facto de durante este período nunca ter deixado de exercer as minhas funções de docente, sempre com horário completo e em exclusividade na Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Lamego do Instituto Superior Politécnico de Viseu.

Foi assim um enorme investimento para a implementação do plano de trabalhos e na investigação.

Durante este tempo aconteceram coisas menos boas que dificultaram o caminho, mas também se passaram bons factos, e por tal na atualidade minimizam os obstáculos e permitem sentir que tudo valeu a pena.

Esta tese faz-me sentir um privilegiado devido às vivências com pessoas com quem tive o prazer de trabalhar ao longo destes anos.

Ao Professor Doutor Humberto Manuel Matos Jorge e ao Professor Doutor Sérgio Manuel Ângelo da Cruz, pelas orientações com grande sapiência, sempre que necessitei delas. Agradeço-lhes as amizades, dedicação, confiança, compreensão, estímulos, disponibilidade, os seus ensinamentos e oportunidades facultadas nas longas conversas sobre os diversos temas do trabalho.

Exatamente com o mesmo nível de reconhecimento desejo agradecer ao Professor Coordenador Fernando António Castilho Mamede dos Santos, meu pai, pelos incentivos e por todo o tipo de preciosas ajudas prestadas.

Ao Mestre Paulo Correia, docente da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu pelo valioso contributo e apoio concedido no que respeita à elaboração das placas de circuito impresso.

Ao Hazem Radwan Hadla, meu amigo Sírio e companheiro de Laboratório pela ajuda dada no uso do dSPACE e por todos os outros tipos de apoios.

Ao departamento de Engenharia Eletrotécnica da Escola Superior de Tecnologia de Viseu, onde trabalhei durante cinco anos e ao Diretor de Departamento Eng. Ferreira, pelas facilidades concedidas na utilização de instalações e equipamentos e em particular pelo uso da fresadora.

Ao Professor Doutor Joaquim Delgado pela amizade, apoio, ajudas de material e sugestões dadas.

À Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Lamego, onde muito me orgulho de trabalhar, na pessoa do anterior Presidente Mestre Álvaro Bonito, pela possibilidade de concorrer ao programa PROFAD, o que me facilitou a concretização do trabalho no período que decorreu. Ao atual presidente Professor Doutor José Paulo Lousado por todas as facilidades concedidas.

À minha mãe, Maria de Fátima e aos meus irmãos Nuno e Mariana, pela compreensão, incentivo e carinho sempre manifestados.

À Eunice, pela amizade, amor e compreensão pela falta de tempo durante este longo percurso. Fica agora a promessa de recuperarmos alguns dos passeios, dos espetáculos e de outras diversões que deixamos para trás por causa desta “namorada” que arranjei.

Para todos os que durante esta caminhada de algum modo se encontraram comigo e não foram citados, vão os meus agradecimentos sinceros.

Índice:

1.	Introdução	1
1.1	Enquadramento energético	1
1.2	Motivação e objetivos	4
1.3	Principais contribuições desta dissertação	5
1.4	Estrutura e organização da dissertação	5
2.	Tecnologias de armazenamento para sistemas de geração dispersa	7
2.1	Tecnologias de armazenamento de energia	7
2.2	Benefícios do uso de tecnologias de armazenamento de energia.....	10
2.3	Capacidade de fornecimento das tecnologias de armazenamento de energia.....	12
2.4	Aplicações em utilização	13
2.5	Falta de regulamentação.....	14
2.6	Incentivos à instalação de equipamentos de armazenamento	16
2.7	Sistemas de produção dispersa com armazenamento	17
2.8	Comparação de sistemas AC e DC.....	19
3.	Conversores DC-DC.....	21
3.1	Introdução	21
3.2	Topologia de um conversor DC-DC.....	21
3.3	Transformador de alta frequência	22
3.4	Princípio de funcionamento do conversor flyback.....	24
3.5	Conversor flyback.....	25
3.5.1	Projeto	25
3.5.2	Produção da modelação por largura de pulso (PWM)	27
3.5.3	Controlo do conversor DC-DC	29
3.5.3.1	Modo de controlo de tensão.....	30
3.5.3.2	Modo de controlo de corrente.....	31
3.5.3.3	Malha de realimentação para o conversor DC-DC.....	31
3.5.4	Sistema de alimentação auxiliar.....	35

3.5.5 “Snubbers” para o conversor DC-DC	36
3.5.5.1 “Snubber” RC para o primário	37
3.5.5.2 Limitador RCD aplicado no primário	41
3.5.5.3 Snubber RC para o secundário	44
3.5.6 Dimensionamento do condensador usado na saída do conversor DC-DC.....	45
3.5.7 Teste do conversor DC-DC num barramento DC.....	45
4. Sistema de energia com barramento DC	51
4.1 Introdução	51
4.2 Descrição do sistema de energia DC	51
4.3 Descrição funcional do algoritmo de gestão energética do sistema	54
4.4 Validação do algoritmo de gestão energética do sistema	55
5. Simulação do algoritmo de gestão interligado ao sistema físico	79
5.1 Introdução	79
5.2 Fluxograma do algoritmo de gestão energética do sistema	79
5.3 Simulação do algoritmo de gestão energética do sistema em simulink.	87
5.4 Teste de controlo ao algoritmo de gestão energética do sistema.....	108
6. Conclusões e trabalho futuro:	121
6.1 Principais conclusões.....	121
6.2 Linhas de investigação futuras	123
7. Bibliografia:	125
Anexos:	131
Anexo I - Equipamento usado nos testes:	131
Anexo II – Características técnicas do transformador usado nos conversores DC/DC.....	134
Anexo III – Esquema do conversor DC-DC com transformador flyback implementado	135
Anexo IV – Placa de circuito impresso do conversor DC-DC:	136
Anexo V – Dados de consumo de uma vivenda	138

Índice de figuras:

Figura 1 - Exploração mundial de combustíveis fósseis e estimativas até 2050.....	1
Figura 2 – Redes inteligentes de energia – “Smart Grids”	3
Figura 3 – Produção de energia / Procura de energia.....	7
Figura 4 – Posicionamento das diferentes tecnologias de armazenamento de energia.	10
Figura 5 – Benefícios do armazenamento de energia.....	11
Figura 6 – Comparação do custo por ciclo entre as diferentes tecnologias de armazenamento de energia.....	13
Figura 7 – Sistema Powerwall da Tesla.	15
Figura 8 – Sistemas de energia em AC e DC (para uso nas instalações do consumidor/produtor).	19
Figura 9 – Circuito básico do conversor flyback.	22
Figura 10 - Formas de onda dos dois modos de funcionamento.	25
Figura 11 – Projeto do conversor flyback.....	26
Figura 12 – Interface entre o sinal de controlo e o mosfet de potência.....	26
Figura 13 – Produção do sinal de controlo PWM.....	28
Figura 14 – Controlo de tensão.	30
Figura 15 – Controlo de corrente.	31
Figura 16 – Realimentação usada no conversor DC-DC.	32
Figura 17 – Determinação do erro e acondicionamento do sinal.....	33
Figura 18 – Modelação do 555 CN em função da tensão na entrada de controlo.	33
Figura 19 – Diagrama do sistema de controlo de corrente.....	34
Figura 20 – Sistema de alimentação auxiliar.....	35
Figura 21 – Tensão no dreno do conversor DC-DC sem <i>snubbers</i>	36
Figura 22 – Método para obtenção da indutância de fugas do primário.	38
Figura 23 – Diagrama de tensões aplicadas ao transformador e a resistência auxiliar.	38
Figura 24 – Medição da frequência de oscilação da tensão V_{DF}	39
Figura 25 – Forma da onda de tensão no dreno do conversor <i>flyback</i> com o <i>snubber</i> RC.....	40

Figura 26 – Limitador RCD no primário do conversor <i>flyback</i>	41
Figura 27 – Variação da tensão no condensador do limitador RCD no primário do conversor <i>flyback</i>	41
Figura 28 – Ondulação devida ao diodo 30CTH03.	44
Figura 29 – Fotografia com o conversor <i>flyback</i> implementado.....	45
Figura 30 – Conversor DC-DC com a saída ligada a um barramento DC.	46
Figura 31 – Tensão e corrente na entrada do conversor.	47
Figura 32 – Tensão e corrente requerida de 0,5 A na saída do conversor.....	47
Figura 33 – Tensão e corrente requerida de 1 A na saída do conversor.....	48
Figura 34 – Tempo de resposta para uma corrente requerida de 1 A.	48
Figura 35 – PWM e tensões no <i>mosfet</i> (V_{GS} e V_{DS})	49
Figura 36 – Sistema de energia DC para consumidores de baixa tensão.....	51
Figura 37 – Sistema de energia para autoconsumo em DC e AC.	53
Figura 38 – Algoritmo de gestão energética do sistema.	54
Figura 39 – Folha de cálculo do algoritmo de gestão energética.....	56
Figura 40 – Consumo de eletricidade na residência durante o período de duas semanas.	56
Figura 41 – Previsões de produção para o período de uma semana.	57
Figura 42 – Para o cenário A: Mostra a Energia Consumida, Produção e Trocas com a rede.	58
Figura 43 – Para a cenário A: Estado de carga do armazenamento ao longo do tempo.	59
Figura 44 – Para o cenário A: Despachos em uso ao longo do tempo.....	59
Figura 45– Para o cenário A: Comparação entre a previsão de produção, a capacidade de armazenamento e a previsão de consumo.	59
Figura 46 – Para o cenário A: Desempenho económico com o algoritmo ao longo do tempo.	60
Figura 47 – Para o cenário A: Comparação entre o desempenho económico com o algoritmo e sem o algoritmo apenas com o consumo e com o autoconsumo ao longo do tempo.....	60
Figura 48 – Para o cenário A: Resultados económicos da semana de 24 a 30 de janeiro sem o uso do algoritmo com apenas o consumo e com o autoconsumo e com aplicação do algoritmo com a produção mais o consumo.	60
Figura 49 – Para o cenário B: Mostra a Energia Consumida, Produção e Trocas com a rede.....	62

Figura 50 – Para o cenário B: Estado de carga do armazenamento ao longo do tempo.	62
Figura 51 – Para o cenário B: Despachos em uso ao longo do tempo.	63
Figura 52 – Para o cenário B: Comparação entre a previsão de produção, a capacidade de armazenamento e a previsão de consumo.	63
Figura 53 – Para o cenário B: Desempenho económico com o algoritmo ao longo do tempo.	63
Figura 54 – Para o cenário B: Comparação entre o desempenho económico com o algoritmo e sem o algoritmo apenas com o consumo e com o autoconsumo ao longo do tempo.....	64
Figura 55 – Para o cenário B: Resultados económicos da semana de 31 de janeiro a 6 de fevereiro de 2016 sem o uso do algoritmo com apenas o consumo e com o autoconsumo e com aplicação do algoritmo com a produção mais o consumo.	64
Figura 56 – Para o cenário C: Mostra a Energia Consumida, Produção e Trocas com a rede.....	66
Figura 57 – Para o cenário C: Estado de carga do armazenamento ao longo do tempo.	66
Figura 58 – Para o cenário C: Despachos em uso ao longo do tempo.	67
Figura 59 – Para o cenário C: Comparação entre a previsão de produção, a capacidade de armazenamento e a previsão de consumo.	67
Figura 60 – Para o cenário C: Desempenho económico com o algoritmo ao longo do tempo.	67
Figura 61 – Para o cenário C: Comparação entre o desempenho económico com o algoritmo e sem o algoritmo apenas com o consumo e com o autoconsumo ao longo do tempo.....	68
Figura 62 – Para o cenário C: Resultados económicos da semana de 24 a 30 de janeiro do ano 2016 sem o uso do algoritmo com apenas o consumo e com o autoconsumo e com aplicação do algoritmo com a produção mais o consumo.	68
Figura 63 – Para o cenário D: Mostra a Energia Consumida, Produção e Trocas com a rede.	70
Figura 64 – Para o cenário D: Estado de carga do armazenamento ao longo do tempo.....	70
Figura 65 – Para o cenário D: Despachos em uso ao longo do tempo.....	71
Figura 66 – Para o cenário D: Comparação entre a previsão de produção, a capacidade de armazenamento e a previsão de consumo.	71
Figura 67 – Para o cenário D: Desempenho económico com o algoritmo ao longo do tempo.	71
Figura 68 – Para o cenário D: Comparação entre o desempenho económico com o algoritmo e sem o algoritmo apenas com o consumo e com o autoconsumo ao longo do tempo.....	72
Figura 69 – Para o cenário D: Resultados económicos da semana de 24 a 30 de janeiro do ano 2016 sem o uso do algoritmo com apenas o consumo e com o autoconsumo e com aplicação do algoritmo com a produção mais o consumo.	72

Figura 70 – Para o cenário E: Mostra a Energia Consumida, Produção e Trocas com a rede.....	74
Figura 71 – Para o cenário E: Estado de carga do armazenamento ao logo do tempo.	74
Figura 72 – Para o cenário E: Despachos em uso ao longo do tempo.	74
Figura 73 – Para o cenário E: Comparação entre a previsão de produção, a capacidade de armazenamento e a previsão de consumo.	75
Figura 74 – Para o cenário E: Desempenho económico com o algoritmo ao longo do tempo.....	75
Figura 75 – Para o cenário E: Comparação entre o desempenho económico com o algoritmo e sem o algoritmo apenas com o consumo e com o autoconsumo ao logo do tempo.....	75
Figura 76 – Para o cenário E: Resultados económicos da semana de 31 de janeiro a 6 de fevereiro do ano 2016 sem o uso do algoritmo com apenas o consumo e com o autoconsumo e com aplicação do algoritmo com a produção mais o consumo.....	76
Figura 77 – Simbologia usada no fluxograma do algoritmo.....	81
Figura 78 – Fluxograma do algoritmo de gestão energética do sistema.	82
Figura 79 – Parte do fluxograma correspondente ao Despacho 1.....	83
Figura 80 – Parte do fluxograma correspondente ao Despacho 2.....	83
Figura 81 – Parte do fluxograma correspondente ao Despacho 3.....	84
Figura 82 – Parte do fluxograma correspondente ao Despacho 4.....	84
Figura 83 – Parte do fluxograma correspondente ao Despacho 5.....	85
Figura 84 – Parte do fluxograma correspondente ao Despacho 6.....	85
Figura 85 – Parte do fluxograma correspondente ao Despacho 7.....	86
Figura 86 – Parte do fluxograma correspondente ao Despacho 8.....	86
Figura 87 – Aspeto resultante da implementação do algoritmo de gestão energética no simulink. ...	87
Figura 88 – Bloco aceitador do pedido da rede.	87
Figura 89 – Caminhos possíveis a partir da informação da rede	88
Figura 90 – Bloco de cálculo do valor da tensão no armazenamento.	88
Figura 91 – Bloco do despacho 1 e 2.....	89
Figura 92 – Bloco do despacho 3 e 4.....	89
Figura 93 – Bloco do despacho 5, 6, 7 e 8.	90
Figura 94 – Bloco de Previsão da Produção de 24 horas.	90

Figura 95 – Bloco de Previsão da Carga de 24 horas.....	90
Figura 96 – Bloco de Cálculo da Energia Armazenada no Sistema e Capacidade de Armazenamento Disponível.	91
Figura 97 – Bloco “Armazenamento com capacidade a 100%?”	91
Figura 98 – Bloco “A Capacidade do Armazenamento é Inferior a 80% e o Preço de Compra Compensador?”	92
Figura 99 – Entradas e saídas do bloco do Despacho 1.	92
Figura 100 – Bloco do Despacho 1.	93
Figura 101 –Bloco do “Uso do Armazenamento”.	94
Figura 102 – Bloco “Retirada de corrente do Armazenamento (Supercondensadores e Baterias)” ...	95
Figura 103 – Bloco “Retirada de corrente das Baterias”	96
Figura 104 – Bloco “Carregamento dos Supercondensadores e Baterias”	96
Figura 105 – Bloco “Carregar os supercondensadores e eventualmente as baterias”	97
Figura 106 – Bloco “Despacho Sup Bat”	97
Figura 107 – Bloco “Carregar eventualmente as baterias”	98
Figura 108 – Entradas e saídas do bloco do Despacho 2.	99
Figura 109 – Bloco do Despacho 2.	100
Figura 110 – Entradas e saídas do bloco do Despacho 3.	101
Figura 111 – Bloco do Despacho 3.	101
Figura 112 – Entradas e saídas do bloco do Despacho 4.	102
Figura 113 – Bloco do Despacho 4.	103
Figura 114 – Entradas e saídas do bloco do Despacho 5.	103
Figura 115 – Bloco do Despacho 5.	104
Figura 116 – Entradas e saídas do bloco do Despacho 6.	104
Figura 117 – Bloco do Despacho 6.	105
Figura 118 – Entradas e saídas do bloco do Despacho 7.	106
Figura 119 – Bloco do Despacho 7.	106
Figura 120 – Entradas e saídas do bloco do Despacho 8.	107

Figura 121 – Bloco do Despacho 8.	107
Figura 122 – Tektronic DPO 2014 Digital Phosphor oscilloscope.	131
Figura 123 – BK PRECISION 889A.	132
Figura 124 – Características técnicas do transformador ETD49 cedidas pela Trans-Tronic.	134
Figura 125 – Conversor DC-DC.	135
Figura 126 – Resultado do desenho do conversor DC-DC no software EAGLE 7.2.0 (ficheiro com a extensão .BRD).	136
Figura 127 – Foto da vista superior da placa de circuito impresso.	137
Figura 128 – Foto da vista inferior da placa de circuito impresso.	137
Figura 129 – Diagrama da potência consumida na casa durante a semana de 24/1/2016 a 30/1/2016	143
Figura 130 – Diagrama da potência consumida na casa durante a semana de 31/1/2016 a 6/2/2016	143
Figura 131 – Diagrama da potência consumida na casa durante o dia 24/1/2016	144
Figura 132 – Diagrama da potência consumida na casa durante o dia 25/1/2016	144
Figura 133 – Diagrama da potência consumida na casa durante o dia 26/1/2016	144
Figura 134 – Diagrama da potência consumida na casa durante o dia 27/1/2016	145
Figura 135 – Diagrama da potência consumida na casa durante o dia 28/1/2016	145
Figura 136 – Diagrama da potência consumida na casa durante o dia 29/1/2016	145
Figura 137 – Diagrama da potência consumida na casa durante o dia 30/1/2016	146
Figura 138 – Diagrama da potência consumida na casa durante o dia 31/1/2016	146
Figura 139 – Diagrama da potência consumida na casa durante o dia 1/2/2016	146
Figura 140 – Diagrama da potência consumida na casa durante o dia 2/2/2016	147
Figura 141 – Diagrama da potência consumida na casa durante o dia 3/2/2016	147
Figura 142 – Diagrama da potência consumida na casa durante o dia 4/2/2016	147
Figura 143 – Diagrama da potência consumida na casa durante o dia 5/2/2016	148
Figura 144 – Diagrama da potência consumida na casa durante o dia 6/2/2016	148

Índice de tabelas:

Tabela 1– Síntese das tecnologias de armazenamento de energia	9
Tabela 2– Comparativo das diferentes topologias de conversores SMPS	21
Tabela 3– Corrente na saída do conversor com diferentes valores de V_{DSP}	46
Tabela 4– Preços de compra e de venda da energia elétrica.....	57
Tabela 5– Caracterização dos cenários usados no teste de funcionalidade.	58
Tabela 6– Número de vezes que ocorre cada despacho e respetivo tempo.	61
Tabela 7– Caraterização do cenário A.....	61
Tabela 8– Número de vezes que ocorre cada despacho e respetivo tempo.	65
Tabela 9– Caraterização do cenário B.	65
Tabela 10– Número de vezes que ocorre cada despacho e respetivo tempo	69
Tabela 11– Caraterização do cenário C.	69
Tabela 12– Número de vezes que ocorre cada despacho e respetivo tempo	73
Tabela 13– Caraterização do cenário D.....	73
Tabela 14– Número de vezes que ocorre cada despacho e respetivo tempo	76
Tabela 15– Caraterização do cenário E.	77
Tabela 16– Caraterização dos cenários.....	77
Tabela 17– Relação entre o valor da tensão no armazenamento e a capacidade no armazenamento.	79
Tabela 18– Descrição das abreviaturas usadas no fluxograma.....	80
Tabela 19– Resultados de ações de controlo para o despacho 1.	108
Tabela 20– Resultados de ações de controlo para o despacho 2.	110
Tabela 21– Resultados de ações de controlo para o despacho 3.	112
Tabela 22– Resultados de ações de controlo para o despacho 4.	113
Tabela 23– Resultados de ações de controlo para o despacho 5.	114
Tabela 24– Resultados de ações de controlo para o despacho 6.	115
Tabela 25– Resultados de ações de controlo para o despacho 7.	116

Tabela 26– Resultados de ações de controlo para o despacho 8.	118
Tabela 27– Energia consumida na vivenda entre 24-1-2016 e 30-1-2016.....	138
Tabela 28– Energia consumida na vivenda entre 31-1-2016 e 7-2-2016.....	140

Lista de siglas:

A - Área;

AC - Corrente alternada;

C - Capacidade;

CAES - Compressed air storage;

DC - Corrente contínua;

EFD - Economic flat design;

ETD - Economic transformer design;

FES - Flywheel energy;

GD - Geração distribuída;

LLC – Line level control;

PHEV - Plug-in hybrid eletric vehicle;

PSB – Polysulfide bromide battery;

PWM - Modelação por largura de impulsos;

SC - Supercondensadores;

SMES - Superconducting magnetic energy storage;

SMPS – Switched mode power supply;

TC – Temperatura de Curie;

T&D - Transmissão e distribuição;

UPS - Uninterrupted power supply;

V2G - Vehicle to grid;

VRB – Vanadium redox battery;

ZnBr – Zinc-bromine battery.

1. Introdução

O trabalho descrito nesta dissertação pretende contribuir para a melhor integração das energias renováveis com os equipamentos de armazenamento energético usados nas instalações finais (habitação, pequeno comércio ou serviços). O uso das energias renováveis associadas ao armazenamento de energia, torna-as despacháveis.

Apresenta-se um modelo de gestão de fluxos de energia, para gerir a produção de energia e as trocas com o armazenamento e com a rede. A eletricidade produzida a partir das energias renováveis deve ser no essencial para autoconsumo, devendo-se minimizar as injeções na rede sem ser para satisfazer um pedido do gestor da rede, prestar serviço de rede.

As investigações preliminares efetuadas para o suporte de todo o trabalho incidiram genericamente sobre os seguintes grandes domínios: armazenamento de energia, sistemas de geração dispersa com armazenamento, para integrar em habitações ou pequenos consumidores.

Neste capítulo é descrita de forma sucinta, a situação energética presente, bem como a sua possível evolução futura, com fontes de energia alternativas dispersas que podem ser usadas para a produção de eletricidade, com um conjunto de vantagens face às soluções centralizadas. Como muitas das pequenas fontes renováveis são intermitentes, para se ter a energia disponível sempre que existe procura por parte das cargas consumidoras é necessário associar à produção intermitente o armazenamento da energia.

1.1 Enquadramento energético

A humanidade depende cada vez mais do consumo energético para a sua subsistência. Embora o petróleo constitua a principal fonte de energia, assegurando 40% do aprovisionamento total de energia, o volume da sua extração tende a estabilizar, e o seu peso relativo entrou em declínio [1].

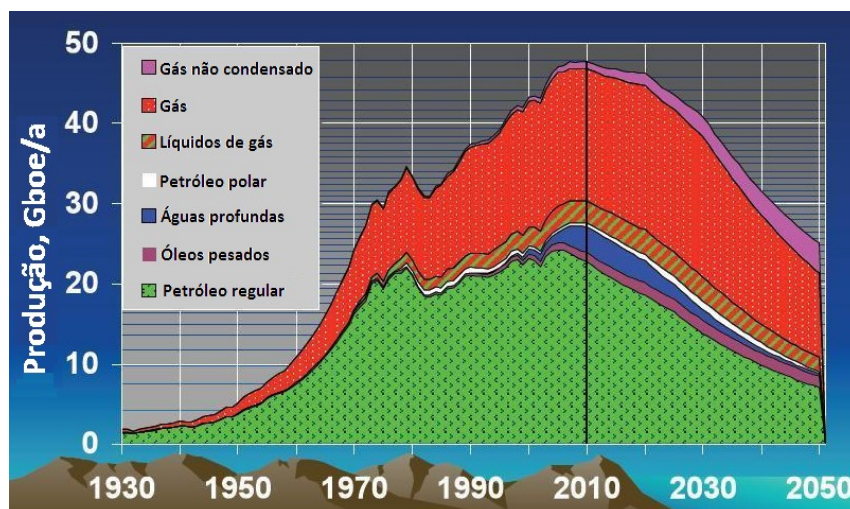


Figura 1 - Exploração mundial de combustíveis fósseis e estimativas até 2050 [2].

Surge assim a necessidade da exploração de fontes de energia alternativas, as denominadas fontes renováveis [3], [4]. Estas caracterizam-se pela sua dispersão e pelo facto de que praticamente todas as formas de energia primária renovável disponível na natureza podem ser convertidas em eletricidade.

Uma das principais fontes é a solar, sendo a maior fonte de energia da Terra. No aproveitamento da radiação solar usam-se os painéis fotovoltaicos, que convertem diretamente a radiação incidente em corrente elétrica.

Uma outra fonte de energia renovável que tem vindo a ser explorada em força em Portugal é a energia eólica, resulta da transformação da energia cinética dos ventos em energia elétrica. Os equipamentos para o captar requerem investimentos dispendiosos quando comparadas com as formas tradicionais de produção. Além disso, a energia elétrica produzida é intermitente, dependendo do vento que pode não ser suficiente ou ser demasiado intenso para colocar o aerogerador em funcionamento.

A biomassa também constitui uma forma de energia renovável, em que a energia produzida a partir de matéria vegetal pode ser transformada noutra forma de energia pela combustão, fermentação, gaseificação e liquefação. Consegue-se assim contribuir para a redução do dióxido de carbono libertado na atmosfera e consequentemente o efeito de estufa, há também uma redução na emissão de dióxido de enxofre, sendo as libertações resultantes menos agressivas para o meio ambiente do que as provenientes dos combustíveis fósseis [6].

A produção de energia a partir da biomassa, quando comparada com outras formas de produção de energia como os combustíveis fósseis, permite uma menor corrosão dos equipamentos como caldeiras e fornos. As suas desvantagens relativas aos fósseis são: o baixo teor energético comparativo, que implica mais espaço para o armazenamento do combustível. Um outro ponto fraco, considerando outras tecnologias de produção de energia renovável, é a maior emissão de partículas, o que implica que se tenha que fazer investimentos adicionais para a sua retenção em filtros.

A energia hídrica é uma das formas de energia renovável mais usada no mundo, consistindo na obtenção de energia elétrica a partir da energia potencial de uma massa de água que se pode encontrar em rios ou lagos. Pode ser aproveitada por meio de uma queda de água, convertida em energia mecânica, numa turbina hidráulica, à qual pode ser ligada um gerador elétrico que converte a energia mecânica da turbina em elétrica. A queda da água permite assim a conversão de energia sem emissões para o meio ambiente, tendo esta forma de produção de energia uma quota de 18% da energia elétrica produzida no mundo [7]. As centrais hidroelétricas, especialmente as de maiores dimensões, exigem a criação de grandes reservatórios de água, provocando o alagamento de terras, o que obriga muitas vezes à mudança de populações e a alterações nos ecossistemas.

A energia geotérmica é também uma fonte renovável que consiste em aproveitar o calor do interior da Terra. Este é trazido para a superfície podendo ser usado diretamente em climatização ou convertido em eletricidade. As desvantagens são ao nível da localização das instalações que estão limitadas a zonas com atividade geotérmica, terem uma energia de baixo rendimento e poderem libertar gases para a atmosfera na fase de perfuração, como o sulfureto de hidrogénio que é altamente tóxico [8].

A fonte nuclear constitui uma forma de produzir energia utilizando material radioativo para produzir calor. Esse é depois utilizado para produzir vapor que através de uma turbina vai acionar um gerador o qual produz energia elétrica. Esta forma de energia tem sido encarada com grande entusiasmo, por alguns sectores devido ao seu potencial, sendo a fonte mais concentrada. Tem ainda a grande vantagem de a produção de energia elétrica não libertar gases com efeito de estufa ou chuvas ácidas. Apesar destes aspetos positivos, as centrais nucleares atualmente são relativamente poucas, pois requerem elevados investimentos para a sua construção, manutenção e segurança. A maior fonte de custo é o sistema de emergência, de contenção de resíduos radioativos e do seu armazenamento seguro. Além disso, uma central nuclear requer que se encontrem soluções de longo prazo para o seu desmantelamento no fim de vida [9].

Algumas destas formas de produção de energia como a eólica e solar fotovoltaica, têm na sua origem fontes intermitentes, logo não são despacháveis, visto que a disponibilidade da fonte de energia não está sob o controlo e não é garantido que acompanhem a procura.

De maneira a garantir-se em cada instante a estabilidade do sistema elétrico com base em energias alternativas e renováveis deve conseguir-se fornecer a energia necessária à satisfação da procura da carga ligada à rede. Se a produção de energia assentar em fontes de energia renovável há pois que aproveitar o excesso de produção quando as fontes estão disponíveis e armazenar essa energia para momentos de menor disponibilidade [10], [11].

O novo paradigma, onde se aposta nas energias renováveis e na microprodução vai levar ao reforço do papel do consumidor/produtor. Tendo por base o recurso à gestão da procura, estamos perante o conceito de “Smart Grids” [12]. As redes inteligentes apresentam uma grande disponibilização de funcionalidades na rede, com novos serviços, com controlos eficientes e uma boa gestão da rede, com possibilidade de participação do próprio consumidor/produtor [13]. Este vai assim poder ter um papel ativo na gestão do seu consumo energético, com redução de custos com a sua fatura de energia, podendo obter remuneração pela energia que fornecer à rede [14].

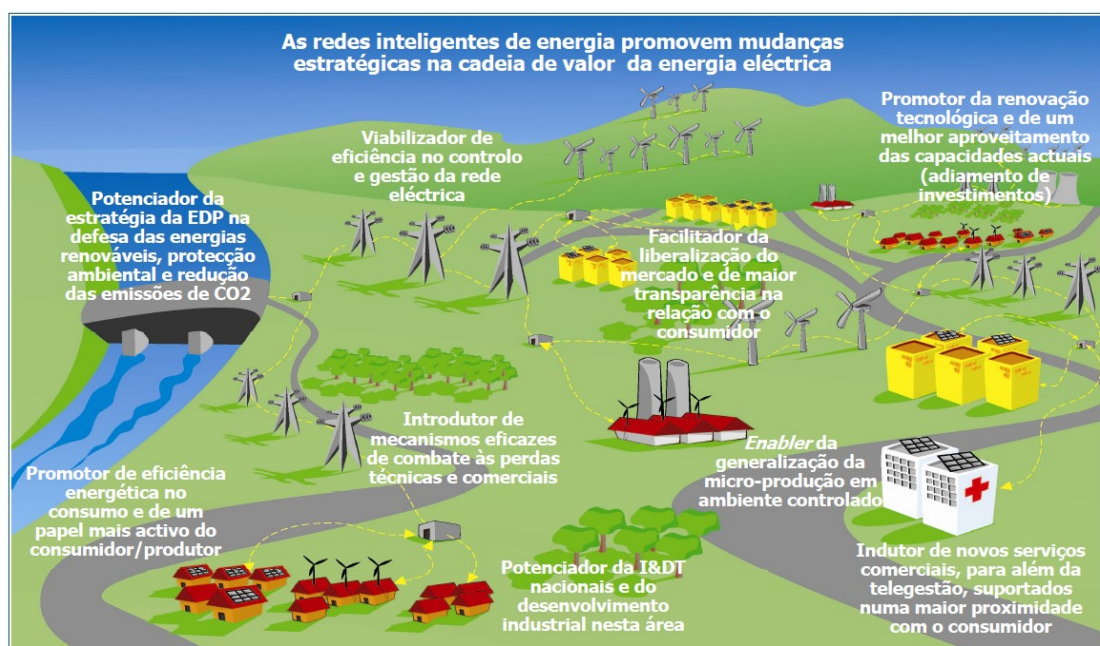


Figura 2 – Redes inteligentes de energia – “Smart Grids” [12].

As “Smart Grids” podem disponibilizar novos serviços com valor para o consumidor, novos planos de preços e novas formas de tarifas, num mercado liberalizado, onde o custo da fatura energética para o consumidor/produtor tenderá a baixar [12].

1.2 Motivação e objetivos

As soluções para reduzir os custos de energia dos consumidores estão em duas frentes: melhorar a eficiência energética e aumentar a utilização de fontes de energia renováveis. No último caso, como já foi referido há um problema relacionado com o facto de que não estarem ajustadas ao período de consumo, sendo necessária utilização de capacidade de armazenamento de energia, a fim de ajustar a geração de energia para às necessidades de consumo.

Neste contexto, existe a necessidade de se usarem módulos de armazenamento de energia nos consumidores finais de baixa tensão. Estes módulos devem poder ser facilmente associados com os módulos de produção de diferentes tecnologias. Além disso, é necessária uma gestão eficiente e capaz de responder a diferentes situações, quer sejam a pedido do gestor da rede elétrica pública, quer pelas necessidades de consumo das cargas na instalação final e da produção disponível das renováveis.

O trabalho relatado nesta tese tem como principal objetivo fazer o controlo de forma eficiente através de um modelo de gestão de fluxos capaz de fazer a gestão das diferentes fontes de produção e permitir a interligação destas com a rede elétrica AC, gerando benefícios económicos que poderão ser partilhados entre o dono da instalação final e o gestor da rede elétrica pública, contribuindo para a redução da fatura energética do consumidor e para redução nas perdas ao nível da distribuição de energia.

A motivação deve-se à escassez de soluções ou produtos no mercado virados para este tipo de gestão nas instalações consumidoras finais em baixa tensão. O produto resultante é útil quer no atual enquadramento regulatório do autoconsumo, bem como num futuro enquadramento onde se podem usar os consumidores como socorro à rede com a partilha de benefícios.

O algoritmo de controlo desenvolvido destina-se a uma instalação residencial (embora possa ser aplicado também a outra pequena instalação em baixa tensão) com produção de energia renovável, num contexto de um mercado liberalizado da energia.

O sistema de energia gerido pelo algoritmo, requer o uso de conversores DC-DC flexíveis, capazes de controlar a corrente na saída, o que permite interligação das diferentes fontes de energia renováveis, como os dispositivos de armazenamento de energia (baterias e supercondensadores) através dum barramento DC, que pode fornecer cargas DC e está interligado à rede AC através de um inversor, e eventualmente dum autotransformador para a adaptação do nível de tensão.

Em conclusão o modelo de gestão de fluxos faz o controlo através dos conversores DC-DC, indo atuar sobre a corrente que cada fonte fornece ao barramento DC, em especial os dispositivos de armazenamento.

1.3 Principais contribuições desta dissertação

A partir de um levantamento do estudo da arte nos domínios, do armazenamento de energia e da pequena produção dispersa com armazenamento, desenvolveu-se um conjunto de abordagens inovadoras que permitem os seguintes contributos originais:

- Tendo como ponto de partida as diferentes tecnologias de conversores DC-DC escolheu-se o tipo “Flyback”, tendo sido desenvolvida uma metodologia de construção de um conversor DC-DC, que pode ser aplicada a qualquer conversor deste tipo, independentemente da potência. O conversor apresenta um conjunto de características multifuncionais, nomeadamente poder-se controlar a corrente na saída, característica esta que lhe confere uma enorme versatilidade para ser usado com módulos de diferentes fabricantes, com diferentes tensões de entrada e ser facilmente usado com algoritmos de gestão de fluxo de energia. A metodologia de projeto do conversor DC-DC foi validada em termos experimentais e melhorado o seu desenho.
- O modelo de gestão de fluxo de energia apresentado é totalmente original e inovador. São conseguidos benefícios económicos com a utilização do algoritmo de controlo de fluxos de energia entre produção, armazenamento, carga e trocas com a rede para fornecimento de serviços do sistema. Foi desenvolvida uma ferramenta em Excel para a validação do conceito do modelo de gestão, testando a reação do algoritmo de controlo de fluxos de energia para diferentes situações de carga, produção, armazenamento e estímulos tarifários.
- A aplicação de uma ferramenta com suporte no Simulink (do Matlab) permitiu testar fisicamente com grande eficácia as ações de controlo das correntes dos vários conversores DC-DC, que permitem interligar as diferentes fontes ao barramento DC. Os resultados dos testes às ações de controlo foram os esperados, validando assim o algoritmo desenvolvido. Fica assim disponível um algoritmo que pode ser aplicado em termos práticos.

1.4 Estrutura e organização da dissertação

O documento da dissertação está estruturado em seis capítulos, que mostram as sucessivas etapas de evolução do trabalho.

No capítulo 2 é feita a revisão bibliográfica, onde se efetua uma análise dos princípios do armazenamento e das tecnologias de armazenamento de energia. Em seguida analisam-se os benefícios do uso das tecnologias de armazenamento de energia bem como a possibilidade para se fazer o armazenamento de energia e em particular das fontes renováveis dispersas. Efetua-se também uma abordagem à adequação de fornecimento das tecnologias de armazenamento de energia e da aplicação nos utilizadores finais, tendo em vista a sua interligação à rede. Faz-se também um breve ponto da situação de incerteza regulamentar no que respeita ao uso do armazenamento nas instalações dos utilizadores finais. A finalizar, a necessidade de abordagens económicas que contribuam para a implementação efetiva das tecnologias de armazenamento de energia, tendo como base um preço compensatório da eletricidade para quem usa o armazenamento e presta serviços à rede pública. Faz-se também uma descrição em torno dos sistemas de pequenos geradores dispersos com armazenamento. É feita uma comparação entre os sistemas AC e os DC, mencionando-se vantagens e desvantagens. São apresentados sistemas de abastecimento em AC e

em DC para uso nas instalações finais do cliente (habitação, pequeno comércio ou serviços), expondo a forma de interligar a produção, o armazenamento, as cargas e a interligação destes. Termina-se o capítulo 3, fazendo-se uma análise onde se conclui que podem ser obtidas vantagens com o uso do DC nas instalações finais e do elemento chave que os conversores DC-DC desempenham na interligação dos módulos (Produção e Armazenamento) em barramentos DC.

No capítulo 3 é descrito um conjunto de aspetos genéricos dos conversores DC-DC e são comparadas as diferentes topologias de conversores DC-DC. Em seguida é escolhida a topologia flyback para o conversor DC-DC a implementar e é analisada a questão do transformador de alta frequência. Descreve-se o princípio de funcionamento do conversor flyback. Descreve-se também o projeto de implementação do conversor flyback tendo sido construída uma metodologia para tal. Esta segue os aspetos genéricos, da produção da modelação por largura de pulso, do controlo do conversor DC-DC, dos sistemas de alimentação auxiliares, dos “snubbers” para o conversor DC-DC (RC e RCD) e do dimensionamento do condensador usado na saída do conversor DC-DC. A terminar o capítulo 4 é feito um conjunto de ensaios ao conversor DC-DC num barramento DC que vão permitir a validação das soluções encontradas para o projeto do conversor DC-DC. Estes testes são sobre o rendimento do conversor, a tensão e corrente na sua entrada, a tensão e corrente na sua saída, a sua capacidade de resposta a uma carga e dos sinais de modelação e tensões no mosfet. Este conversor pode ser usado na integração de um sistema DC e permite o controlo da corrente na sua saída por intermédio de um sinal de tensão fornecido através de um modelo de gestão de fluxos de energia.

No capítulo 4 é apresentado um algoritmo para controlo de fluxos de energia num barramento DC. Descreve-se também a gestão energética que o algoritmo implementa através dos vários despachos de energia para as diferentes situações de gestão. Além disso, é apresentada uma validação de conceito do algoritmo de gestão energética do sistema com recurso a programação em folha de cálculo.

No capítulo 5, é apresentado o fluxograma do algoritmo de gestão energética do sistema, fazendo-se a sua análise detalhada da implementação do algoritmo em Simulink do Matlab. Esta validação é feita para cada tipo de despacho, sendo analisadas as diferentes situações de controlo.

No capítulo 6, apresentam-se as conclusões e trabalho futuro e efetua-se uma síntese das contribuições obtidas com o desenvolvimento do trabalho. Sugerem-se ainda desenvolvimentos futuros para este trabalho e as linhas de investigação que se poderão prosseguir.

2. Tecnologias de armazenamento para sistemas de geração dispersa

O armazenamento de energia consiste em acumular energia num determinado intervalo temporal, para vir a ser usada num instante posterior, tendo por base um qualquer critério de utilidade [19]. Na figura 3 exemplifica-se a função armazenamento de energia.

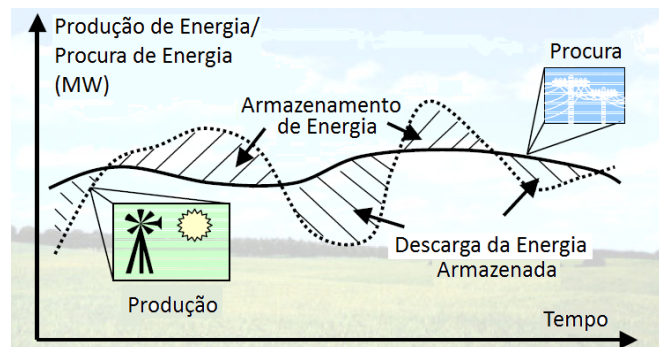


Figura 3 – Produção de energia / Procura de energia [20].

Podemos constatar que, com o armazenamento de energia, é possível adaptar o perfil da produção ao do consumo.

As quatro formas de armazenar energia são: a **química**, a **mecânica**, a **térmica** e a **elétrica**. Em cada um dos domínios as tecnologias mais comuns são:

- Energia química, com o hidrogénio, as células de combustível, os biocombustíveis e as baterias;
- Energia mecânica, com os sistemas de ar comprimido (CAES – Compressed Air Energy Storage), volantes de inércia (FES – Flywheel Energy Storage), sistemas de armazenamento hidroelétricos (bombagem);
- Energia térmica, com a produção de gelo, fusão do sal, produção de água quente e armazenamento do calor em materiais cerâmicos;
- Energia elétrica, com os condensadores, supercondensadores e bobines supercondutoras (SMES – Superconducting Magnetic Energy Storage).

2.1 Tecnologias de armazenamento de energia

Uma das tecnologias de armazenamento de energia de grande capacidade hoje mais utilizada é constituída por **sistemas de bombagem**. Consiste na elevação da água de um nível inferior para uma cota superior com o enchimento da albufeira, sendo uma maneira prática de se guardar grandes quantidades de energia que pode ser usada durante períodos de elevada procura ou picos. Este tipo de centrais, podem ainda ser usadas para garantir a estabilidade da frequência do sistema, fornecendo uma reserva, usada para fornecer como serviços auxiliares ao sistema. Na maior parte das vezes estas instalações ficam distantes dos locais de consumo, contribuindo pouco para a melhoria da fiabilidade e qualidade da energia elétrica disponibilizada pela rede. Como desvantagens tem ainda o custo de construção e os rendimentos inferiores (comparando com o uso direto da

energia sem recurso à bombagem). Nas vantagens para além da capacidade de armazenamento, está a maturidade das tecnologias utilizadas e a sua durabilidade.

As **baterias ácidas** são atualmente as mais utilizadas na implementação de sistemas de alimentação ininterruptos (UPS), sendo colocados muito próximos das cargas. Podem ser utilizados diversos tipos de baterias (chumbo, níquel-cádmio, níquel hidreto metálico, gel, lítio, zinco-ar) consoante a quantidade de energia que se pretenda armazenar e o espaço disponível. Embora as tecnologias das baterias, tenham nos últimos anos registado grandes avanços e funcionarem de forma silenciosa sem emissões poluentes, apresentam um conjunto de inconvenientes, nomeadamente exigem muito espaço para instalação, necessitam de boas condições de climatização, tem um tempo de vida útil curto. Além disso, a sua performance vai-se degradando com o número de carregamentos e descarregamentos, bem como, não suportarem densidades de potência muito elevadas [21].

Uma tecnologia com elevado potencial de armazenamento sob a forma de energia mecânica são os **sistemas de ar comprimido** (CAES). Esta consiste no uso de compressores, acionados geralmente por motores elétricos. Atualmente desenvolve-se investigação na compressão direta do ar através de turbinas eólicas. Os reservatórios de ar comprimido têm uma vida útil maior que as baterias, podendo ser carregados e descarregados com maior frequência. Além disso, o ar é abundante, limpo (não poluente) e económico. Alguns espaços subterrâneos como o das minas de sal e de campos de gás, podem ser adaptados para o uso com os CAES, embora com custos adicionais associados ao armazenamento [22].

O armazenamento energético sobre a forma térmica, pode ser bom para aliviar os diagramas de carga das redes elétricas no período de ponta. No entanto, este armazenamento energético vai aumentar o consumo de energia do consumidor, devido às perdas associadas ao armazenamento e conservação da energia, só sendo rentável para este se tiver tarifas variáveis com a hora do dia.

As baterias **eletromecânicas** (Flywhells), são dispositivos que armazenam a energia cinética, num volante de inércia em rotação e a convertem posteriormente em energia elétrica. A quantidade de energia acumulada é dada pela expressão:

$$E_c = \frac{1}{2} I_M \omega^2, \quad (2.1)$$

sendo I o momento de inércia e ω a velocidade de rotação. Estes equipamentos têm uma durabilidade elevada, um carregamento rápido, uma capacidade de resposta rápida às cargas, um impacto ambiental reduzido (sem manutenção) [23].

Nas **bobinas supercondutoras** (SMES), a energia é guardada no campo magnético de uma indutância cujas espiras são constituídas por material supercondutor. Esta tecnologia tem a vantagem de ter uma eficiência da ordem dos 95 a 98% no armazenamento da energia [24].

Os **supercondensadores** (SC), constituem a tecnologia que apresenta maior número de vantagens. Podem ser vistos como uma evolução dos condensadores convencionais, pois o seu princípio é o mesmo, mas suportam densidades de potência elevadas. A energia (E) que um supercondensador é capaz de armazenar depende da sua capacidade (C) e do quadrado da diferença

de potencial (U) entre as placas. A capacidade que é expressa em Farad vai depender da permissividade K do dielétrico, sendo proporcional à área das armaduras e inversamente proporcional à distância entre elas [25].

$$E = \frac{1}{2} CU^2 \quad C = K \cdot \frac{A}{d} \quad (2.2)$$

Os supercondensadores podem vir a ser a tecnologia que oferece um bom suporte para criar a transição para uma economia sem combustíveis fósseis, tendo como base energética a exploração das energias renováveis. Em comparação com as outras tecnologias os supercondensadores apresentam as seguintes vantagens [26], [27]:

- São construídos com materiais amigos do ambiente;
- Funcionam em ambientes adversos e sem manutenção;
- As correntes de carga e descarga podem ser elevadas e com tempos rápidos;
- Possuem uma boa relação preço/desempenho;
- Ciclo de vida quase inesgotável quando comparado com as baterias;
- Podem ser completamente descarregados sem efeito de degradação da sua capacidade;
- Têm a eficiência energética mais elevada de todas as tecnologias conhecidas.

Tabela 1– Síntese das tecnologias de armazenamento de energia

Tecnologias de armazenamento	Principais vantagens	Desvantagens	Aplicação de potência	Aplicação de energia
Sistemas de bombagem	Alta capacidade, baixo custo	Requerem locais adequados		■
Sistemas de ar comprimido (CAES)	Alta capacidade, baixo custo	Requerem locais adequados, necessidade do combustível gás		■
Baterias de fluxo: PSB, VRB, ZnBr	Alta capacidade, Independência de potência e classificação energética	Baixa densidade energética	■	■
Metal-Ar: Li-Ar, Zn-Ar	Muito alta densidade energética	As cargas elétricas são difíceis		■
NaS	Alta potência e densidades energéticas, alta eficiência	Custo de produção, requisitos de segurança (necessários ao projetar)	■	■
Li-Ion	Alta potência e densidades energéticas, alta eficiência	Alto custo de produção, requer circuitos especiais para carga	■	□
Ni-Cd	Alta potência e densidades energéticas, eficiência		■	■
Outras baterias avançadas	Alta potência e densidades energéticas, alta eficiência	Alto custo de produção	■	□
Ácido/Chumbo	Baixo custo de capital	Ciclo de vida limitado quando completamente descarregadas	■	□
Baterias eletromecânicas (Flywheels)	Alta potência	Baixa densidade de energia	■	□
Bobinas Supercondutoras (SMES)	Alta potência	Baixa densidade de energia, alto custo de produção	■	
Supercondensadores	Ciclo de vida longo, alta eficiência	Baixa densidade de energia (com tecnologia actual)	■	■

Legenda: ■ Plenamente capaz; ■ Razoável para esta aplicação; □ Possível, mas não é prática ou económica; Nenhum, não são possíveis ou são economicamente

Fonte: <http://www.electricitystorage.org/site/technologies/>

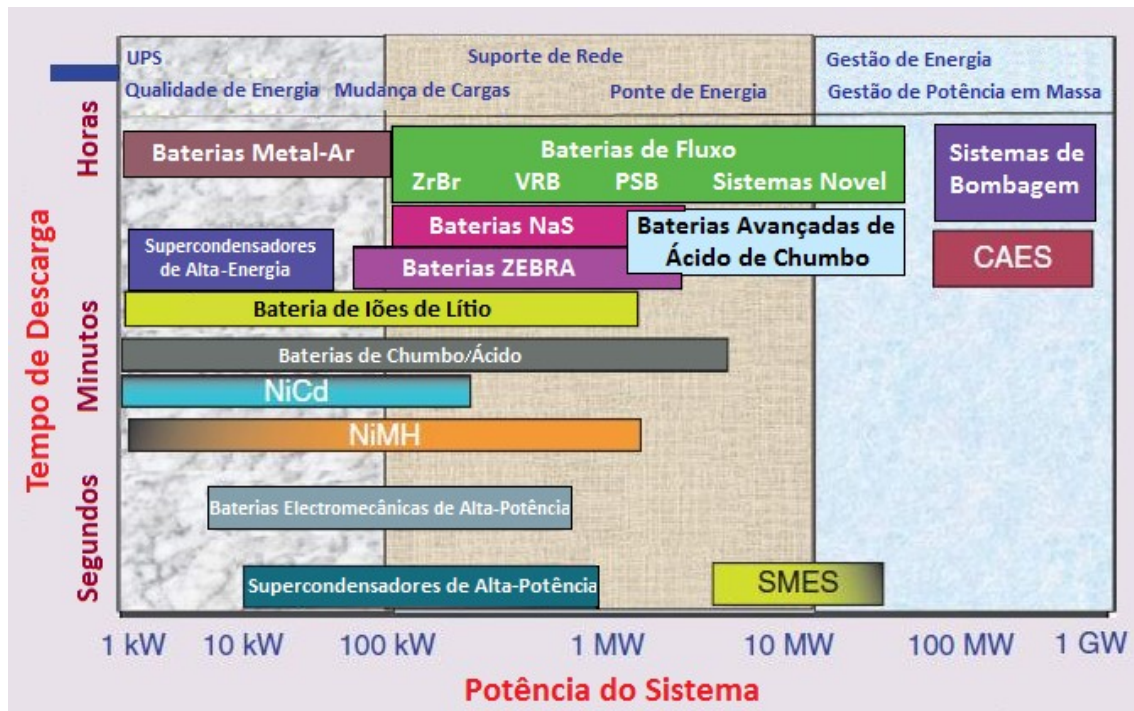


Figura 4 – Posicionamento das diferentes tecnologias de armazenamento de energia [28].

2.2 Benefícios do uso de tecnologias de armazenamento de energia

Os sistemas de energia devem procurar alternativas para uma disponibilidade contínua do fornecimento de energia elétrica de forma fiável e barata, que incluem:

- recursos energéticos renováveis, energia nuclear, geração limpa com carvão e outros recursos;
- as alterações da rede de transmissão para ligar estes recursos com a carga;
- programas de conservação e de resposta à procura (programas de gestão).

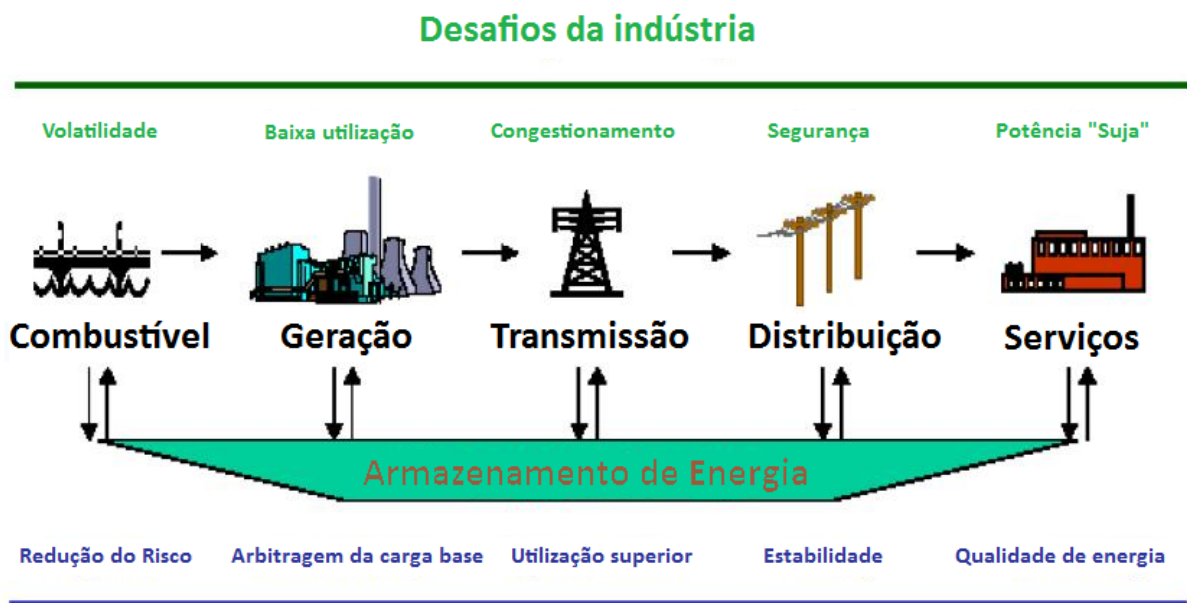
Em Portugal, deve-se considerar as tecnologias de armazenamento como uma escolha estratégica que permite a utilização otimizada dos novos recursos e dos já existentes. Estas devem ser vistas, como um complemento valioso para o melhor aproveitamento de todos os recursos.

São vários os benefícios de se desenvolver o armazenamento de energia nas redes elétricas, nomeadamente [29]:

- Uma forma de se adiar investimentos nas infraestruturas de transmissão e distribuição (T&D) para se atender a picos de carga;
- Um recurso de prestação de serviços auxiliares aos operadores de mercado que usam a rede;
- Facilitação da integração das exigências do veículo elétrico (PHEV) com a rede;
- A Ajuda ao equilíbrio da rede que têm sistemas com produção de energia de fontes renováveis ou variáveis;
- Uma forma de otimizar a exploração da rede com a geração de energia das centrais convencionais.

O armazenamento de energia associado à produção com base nas energias renováveis permite a redução da dependência dos combustíveis fósseis, o que leva à redução do risco de elevados preços de mercado, bem como de escassez.

Um desafio da indústria a nível da produção de energia é vencer a baixa utilização de algumas das centrais, que funcionam em horas de ponta e são desligadas nas horas de vazio. O armazenamento de energia torna mais fácil a integração da produção associada às energias renováveis, e tem um papel importante, ajudando a produção no fornecimento de energia nestes momentos de maior consumo, permitindo uma utilização mais eficiente da capacidade produtiva instalada no sistema. Além disso, o armazenamento da energia ao nível da produção pode desempenhar um papel importante ao nível da arbitragem da carga de base, dando prioridade ao armazenamento da energia de fontes renováveis, em detrimento do uso da energia de centrais que usam combustíveis fósseis [30].



Vantagens de mercado

Figura 5 – Benefícios do armazenamento de energia [31].

A indústria elétrica tem como objetivo a nível da transmissão, o de minimizar os períodos de congestionamento nas linhas. Se o armazenamento de energia for usado a montante ou a jusante da linha de transmissão isto pode ser conseguido. Com uma boa gestão deste tipo de armazenamento pode inclusivamente haver uma utilização superior das linhas de transmissão, devido à energia ser transmitida de forma mais regular ao longo do tempo. A grande vantagem disto poderá ser em evitar ou em atrasar novos investimentos em linhas.

As empresas responsáveis pela distribuição de energia têm como finalidade garantir um abastecimento seguro de energia. A este nível o armazenamento de energia também pode desempenhar um papel importante, pois quanto mais próximo este for feito da carga, maior será a estabilidade da rede [32]. Isto pode levar a implementações de serviços de valor acrescentado, com o fornecimento de energia de qualidade ao consumidor. Com a liberalização do sector energético e a possibilidade do consumidor ser também produtor de energia, isto irá levar a uma profunda transformação e ajuste de todo o mercado de energia.

A tecnologia de ligação do veículo elétrico à rede (Vehicle to Grid – V2G) também pode ser usada nas instalações dos consumidores finais em baixa tensão, ajudando a melhorar a utilização da

rede, aliviar a procura e melhorar a fiabilidade. Devido às elevadas expectativas de implementação dos veículos elétricos, a indústria elétrica tem grande interesse sobre o potencial da tecnologia V2G para fornecer muitos dos benefícios do armazenamento quer a nível do utilizador final, quer a nível da distribuição [33], [34].

A indústria elétrica de muitos países tem níveis médios de fator de utilização da ordem dos 40% da capacidade máxima que está instalada, ou seja, a relação do número médio de horas de funcionamento de uma central. Estes valores têm sido aceitáveis porque os recursos de produção têm sido tradicionalmente feitos a partir das fontes economicamente mais rentáveis e com uma base em recursos fósseis armazenados. O crescimento das renováveis implicará provavelmente ainda mais baixos fatores de utilização para as fontes de geração tradicional [36].

Muitos dos defensores da mudança para as “Smart Grid” baseiam-se no desejo de melhorarem os fatores de utilização, deslocando-se a curva de procura através de incentivos ou controlo da carga. A mudança da carga implica o desenvolvimento de programas de gestão da procura. A tecnologia de armazenamento de energia oferece outro caminho para ajudar o equilíbrio do sistema, como uma forma de adaptar o consumo à produção, melhorando os fatores de utilização. Pode ser politicamente mais aceitável do que outros tipos de atualizações de infraestruturas e potencialmente menos perturbador para a economia e sociedade. Isto fornece uma forte motivação para que se investigue e se desenvolvam tecnologias de forma a serem implementadas em termos práticos.

2.3 Capacidade de fornecimento das tecnologias de armazenamento de energia

Os vários tipos de tecnologias de armazenamento de energia podem ser divididos em duas categorias, tendo por base a sua capacidade de resposta: para fornecerem qualidade de energia (com minutos de capacidade) e as de gestão de rede (com horas de capacidade). Atualmente, as baterias eletromecânicas e as baterias de íões de lítio são usadas para armazenarem menores quantidades de energia e tem aplicação nas redes elétricas nos serviços auxiliares como suporte de tensão e na regulação de frequência [37]. Outras tecnologias (supercondensadores, CAES, sistemas de bombagem) são capazes de fornecer maiores capacidades de armazenamento que podem ser usadas pelos serviços auxiliares. Uma questão a ter em atenção é o desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia com baixos custos para funcionarem, de modo a permitirem a sua interligação com as redes de forma viável.

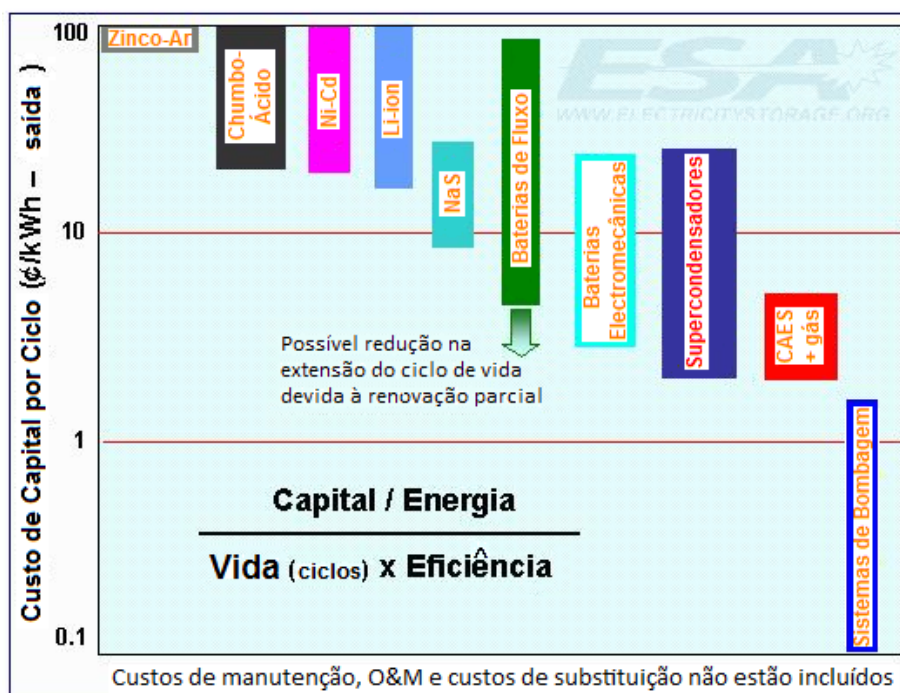


Figura 6 – Comparação do custo por ciclo entre as diferentes tecnologias de armazenamento de energia.

Fonte: <http://www.electricitystorage.org/site/technologies/>

2.4 Aplicações em utilização

O armazenamento de energia pode ser usado como um ativo para os utilizadores finais tanto domésticos como empresariais, podendo o dispositivo ser usado de forma autónoma ou em combinação com a geração distribuída (GD). Relativamente aos consumidores residenciais, pode ser uma mais valia como um dispositivo de “*backup*” de energia, fornecendo os aparelhos mais importantes durante as interrupções. Além disso, também pode desempenhar um papel importante com as energias renováveis como a solar fotovoltaica, que pode ser aplicada na cobertura e fachadas dos edifícios. É assim uma forma de se guardar o excesso de energia renovável para quando o uso do recurso das energias renováveis não está disponível, permitindo que o consumidor reduza o consumo de energia da rede e dando-lhe uma maior autossuficiência [38].

Os utilizadores empresariais, com as tecnologias de armazenamento de energia podem preencher um segmento no fornecimento de energia para as interrupções curtas. Normalmente estas instalações usam-se para a produção auxiliar de energia. No entanto, muitas destas interrupções são de curta duração e dão-se antes de um dispositivo de produção de energia conseguir arrancar. Em combinação com a produção, o armazenamento de energia pode fornecer uma proteção extra para as interrupções de curto prazo e servir como “*ponte*” em caso de corte de longo prazo, até que o gerador da instalação arranque [39]. Um mercado de armazenamento que já está bastante maduro e ainda se encontra em expansão são as unidades de fornecimento ininterrupto (UPS). Estas têm sido usadas pelos consumidores finais que precisam de energia de elevada qualidade e fiabilidade, como as indústrias com processos produtivos de elevado valor. Com o acumular de energia do meio envolvente cada vez mais atrativo economicamente e ainda assistido por preços favoráveis e por pedidos de resposta / gestão da carga, este tipo de aplicações podem tornar-se cada vez mais relevantes para os utilizadores finais. O consumidor de hoje pode aproveitar

todas as possibilidades de energia: da rede, do armazenamento e da produção própria, de forma combinada para otimizar uso e custos [40], [41].

Devido aos menores custos da ligação e à necessidade de garantias de qualidade de energia, levará a que os sistemas de armazenamento serão provavelmente aplicados principalmente em lugares com bastante densidade populacional e atividades comerciais, abastecidos por redes subterrâneas dos centros urbanos. Os problemas de dificuldades de manutenção das redes subterrâneas e os elevados custos de capital para a sua expansão, pode levar à partilha de benefícios dos fornecedores de energia com os consumidores de energia que disponham de armazenamento e que estejam dispostos a prestar serviços à rede.

No futuro, será concebível que as tecnologias de armazenamento de energia, ligadas aos consumos controlados do utilizador final e à GD, possam ser usados para deslocar os consumos da rede para períodos de preços baixos e evitando os consumos em períodos de ponta, o que poderá ser efetuado em tempo real. Isto poderá ser viável tanto para consumidores residenciais como comerciais. Prevê-se uma entrada significativa dos veículos elétricos, o que irá suportar este tipo de aplicações, em que consumidores “conscientes” não vão carregar os seus veículos nos períodos de ponta e pelo contrário nestes períodos ajudem a rede fornecendo-lhe energia [42].

Um dos benefícios mais atraente relacionado com as “Smart Grid” é que as tecnologias inteligentes podem ser usadas para deslocar ou controlar as cargas de forma a reduzir os consumos durante os períodos de ponta, obtendo-se benefícios económicos com a redução das perdas na rede de transmissão e distribuição de energia [43]. Por vezes a resposta com programas de gestão de cargas implicam que o consumidor tenha que alterar o seu comportamento, ou é dada com programas de gestão de cargas que funcionam de forma automática, sem o consumidor ter consciência da sua implementação. Uma grande vantagem da tecnologia de armazenamento é poder dar a mesma oferta/procura podendo evitar a imposição de princípios comportamentais sobre os consumidores. A solicitação de resposta com gestão da carga, tem-se vindo a tornar um recurso dos mercados, incorporando a prestação dos serviços auxiliares como as reservas de energia em tempo real, bem como quando é pedida resposta por parte do gestor do sistema (despacho) aos fornecedores agregados [44].

O fornecimento de energia à rede elétrica é geralmente contabilizado através de contagem que permite o fluxo de potência nos dois sentidos (*net metering*). Os pequenos produtores/consumidores de energia que usam o sistema “*net metering*” podem reduzir os custos cobrados pelos fornecedores. Isto é possível em sítios onde exista uma regulamentação para tal (obrigação da aceitação da energia a um preço justo) ou em alternativa uma negociação entre o produtor/consumidor e o fornecedor de energia a partir da rede [22].

2.5 Falta de regulamentação

As tecnologias de armazenamento de energia apresentam um conjunto de barreiras regulamentares à sua aplicação na indústria da energia elétrica. Como qualquer tecnologia pouco difundida numa orientação de serviços de rede prestados pelos consumidores finais, tem falta de regulamentação que oriente os reguladores sobre a sua utilização. Além disso, não há nenhuma estratégia global ou política de como podem ser incorporadas nos componentes existentes na

indústria elétrica. Na verdade, não existe regulamentação que resolva explicitamente as questões dos serviços de armazenamento de energia (inclusive na microgeração), deixando os operadores de mercado e os possíveis investidores numa situação de incertezas de como os investimentos serão tratados, como os custos serão recuperados ou se as tecnologias serão permitidas em algum ambiente regulamentar especial [45]. O principal motivo para a falta de regulamentação é que o armazenamento de energia por parte dos operadores de mercado é inexistente, com a exceção do armazenamento com base em bombagem em algumas centrais hidroelétricas, tendo os restantes tipos, sempre sido relegados para projetos-pilotos ou implementações ocasionais.

Um dos fatores principais que tem dificultado a implementação deste tipo de tecnologias, tem sido o custo elevado. Atualmente, já estão no mercado algumas soluções que permitem armazenar energia de forma compacta com elevada qualidade, nomeadamente a linha Powerwall da Tesla.

A Tesla está a lançar o negócio de sistemas de gestão com baterias para casas sustentáveis, em parte, porque como já faz as baterias para veículos, pode beneficiar das economias de escala. Outra razão é de que o mercado para o armazenamento vai crescer muito, em conjunto com a utilização da energia fotovoltaica.



Figura 7 – Sistema Powerwall da Tesla. Fonte: https://www.teslamotors.com/en_MO/powerwall?redirect=no

Os operadores não têm utilizado a capacidade de armazenamento de energia para resolver os problemas, nomeadamente ao nível da qualidade de energia e talvez não estejam acostumados a utilizar uma tecnologia não tradicional, para abordarem as questões de maneiras diferentes, das utilizadas no passado.

Uma razão adicional que causa incerteza quanto ao tratamento que se deve dar à tecnologia de armazenamento de energia, resulta do facto de ser considerada tanto para instalar na produção, como nas redes de transmissão e de distribuição ou ainda no utilizador final. Numa perspetiva regulamentar o problema está em que soluções de armazenamento de energia podem fornecer funções relacionadas com qualquer uma das três e é difícil decidir-se em qual ou quais das soluções, se deve apostar e no caso de mais do que uma qual a percentagem atribuída a cada uma. O armazenar de energia em grandes quantidades, quando feito por um operador da rede para desviar

a eletricidade que é produzida em períodos de tempo de baixo custo (durante a utilização de ponta), pode ser visto como algo semelhante à produção. Além de reduzir ou eliminar a necessidade da instalação de equipamentos de ponta, este tipo de ação poderia também reduzir o congestionamento na transmissão, fornecer apoio de tensão numa ponta de utilização e fornecer outros serviços auxiliares suportados pelas funções de transmissão. Em comparação, a instalação do armazenamento no utilizador final também permite o aliviar dos congestionamentos das redes, reduzir pontas, aproveitar todo o potencial das energias renováveis dispersas e ainda prestar um conjunto de serviços em auxílio à rede.

2.6 Incentivos à instalação de equipamentos de armazenamento

Várias aplicações de armazenamento de energia espalhadas nas instalações dos consumidores finais domésticos e empresariais com produção podem ajudar a melhorar a fiabilidade da rede. As operadoras num mercado regulado querem recuperar os investimentos antes de implementarem uma nova tecnologia, que ainda precisa de enquadramento regulamentar. Assim, resulta alguma relutância por parte dos operadores, por falta de resultados práticos da tecnologia e pelos custos de implementação.

Para que estes programas de armazenamento avancem é vital que as indústrias maiores tenham consultores experientes a trabalhar nesta área, o que nem sempre é uma realidade, favorecendo as soluções técnicas habituais [46].

Ao operador da rede é garantida a recuperação dos custos dos projetos de produção ou transmissão ou ambos, mas pode ter poucos incentivos para um projeto de armazenamento de energia, podendo optar simplesmente por construir sistemas de transmissão e/ou produção, onde os custos poderão ser recuperados com mais garantias e os projetos aprovados mais facilmente. Além disso, as entidades reguladoras estatais, podem ser relutantes em permitir a recuperação dos custos de uma tecnologia menos aplicada de armazenamento de energia. Assim sendo, os reguladores podem informar os operadores de mercado para usarem as soluções tradicionais, para resolverem os problemas que poderiam ser resolvidos através da tecnologia do armazenamento.

Quando se compara diretamente uma solução de armazenamento de energia com uma solução de produção para acudir a necessidades de ponta ou com uma nova linha de transmissão, sem se ter em conta os benefícios do sistema de armazenamento, o custo é elevado. No entanto, pode ser difícil quantificar ou comparar os custos e os benefícios de todas as diferentes funções fornecidas por um projeto de armazenamento de energia com um de aumento da capacidade de transmissão e/ou produção. Um projeto de armazenamento de energia pode ainda fornecer benefícios ao nível da fiabilidade do sistema elétrico. Estes benefícios devem ser considerados de forma conjunta de maneira a permitirem a recuperação do custo total do projeto. No entanto, porque estes benefícios estão ligados a diferentes funções (produção e transmissão) pode ser difícil medir os diferentes benefícios de modo a conseguir-se a recuperação total do custo [37].

O armazenamento de energia fornece outras vantagens como o aumento do fator de disponibilidade de um recurso de energia renovável, melhorando a economia desse recurso e consequentemente reduzindo as emissões globais. Evita a necessidade de se ter mais linhas ou a produção de curto prazo, nomeadamente com reservas de energias renováveis (exemplo dos

parques eólicos) e liberta a capacidade de produção, permitindo o diferimento da expansão da produção tradicional. O desafio para as entidades de políticas públicas é planearem estruturas de incentivos, que tenham em conta todos os potenciais benefícios do armazenamento.

Os produtores ou consumidores residenciais, com produções de energias renováveis, podem implementar a tecnologia para ajustarem a produção com origem em fontes renováveis ao consumo da sua própria instalação. A energia excedente às suas necessidades poderá ser vendida, assim como, poderá ser usada para responder a eventuais pedidos por parte do gestor da rede, gerando receita que ajuda a cobrirem os custos do projeto. Se esta compensação não for suficiente, poderá ser uma barreira para se virem a adicionar mais unidades deste tipo à infraestrutura do sistema de entrega de energia elétrica, daí a necessidade de eventualmente virem a ser apoiados os investimentos [47].

A atual estrutura tarifária fornece aos consumidores alguns incentivos para investirem em aplicações de armazenamento de energia, nomeadamente quando têm preços variáveis com a hora do dia ou em tempo real, o que lhes fornece uma motivação para fazerem a acumulação de energia. Para compensar devem ser praticados preços diferenciadores, mas atualmente relativamente poucos clientes de baixa tensão estão sobre esse regime de preços, nomeadamente a tarifa bi-horária. No futuro pode ser usado o V2G para “Energy Trading”, onde a bateria já está paga. O V2G será crucial para a implementação de um sistema tarifário em tempo real que reflita no preço o custo da energia em cada instante, em função das disponibilidades do sistema elétrico [48]. O armazenar de energia pelos consumidores maiores (centros comerciais, indústria, etc...) pode aumentar os benefícios, reduzindo o valor da fatura energética a pagar, através do aproveitamento das renováveis e diminuindo o número de kWh consumidos da rede. Pode também ser usado para vender energia à rede se houver um incentivo associado suficiente para os consumidores.

Para se suprirem com sucesso os obstáculos regulamentares à implementação das tecnologias de armazenamento de energia e para que se possa calcular um preço compensador para o armazenamento, deve-se aceitar que o consumidor de acordo com as suas aplicações ou propriedades possa participar neste processo. Além disso, deve ser criada regulamentação adequada sobre o armazenamento de energia que englobe o máximo de casos possíveis. Deve-se criar condições para que os proprietários das instalações de armazenamento obtenham rendimento suficiente para recuperem os custos, ou permitir a recuperação dos custos através de taxas sobre os consumidores não aderentes ao armazenamento. Assim, a maior barreira ao desenvolvimento e implementação das tecnologias de armazenamento de energia seria ultrapassada com sucesso.

2.7 Sistemas de produção dispersa com armazenamento

Os sistemas de produção dispersa de origem renovável e com armazenamento associado para utilização local encontram-se atualmente numa fase de implementação crescente. Procura-se a promoção da utilização das energias obtidas das fontes renováveis, em que a alimentação energética seja estável e fiável (com recurso ao armazenamento), abastecendo as cargas da instalação e com possibilidade de transferência de energia com a rede a pedido desta, em ambiente de mercado liberalizado.

Neste contexto, os sistemas em DC, com utilização no consumidor final, têm atraído uma atenção especial para aplicação nas micro-redes onde estão ligados os geradores, algumas cargas, dispositivos de armazenamento e outros componentes numa rede DC [49].

Em comparação com os sistemas convencionais AC, estes sistemas DC, oferecem diversas vantagens:

- A maioria dos pequenos geradores para produção dispersa produz energia em DC, logo os custos e perdas relacionadas com a conversão de DC-AC podem ser reduzidas;
- Quando uma falha ocorre no fornecimento de energia da rede pública, as cargas ligadas à linha DC podem funcionar constantemente e sem interrupções, onde a energia é fornecida ao barramento DC pela produção e pelo armazenamento e o isolamento pode ser assegurado pelo inversor;
- A interligação dos módulos (produção, armazenamento, ...) pode ser conseguida com relativa facilidade porque só é necessário o controlo da tensão das linhas de distribuição em DC, não sendo exigida sincronização da frequência;
- As flutuações na produção de energia causadas por variação de carga podem ser compensadas com maior facilidade dentro da linha de distribuição em DC, devido à possibilidade de se usar o armazenamento;
- Quando a eletricidade circula por um condutor, gera um campo eletromagnético e quando a corrente troca de sentido, como ocorre com a corrente alternada, é produzido um campo eletromagnético contrário, agindo como uma resistência à eletricidade que é transmitida. Isso significa que a transmissão de eletricidade em AC perde energia devido à resistência e à reatância. Como a energia transmitida em DC nunca muda de direção, não existe este tipo de perda de energia.

O sistema AC pode ter como vantagem a capacidade de transformar facilmente os seus níveis de tensão, utilizando um transformador. Se a tensão for elevada, a corrente é reduzida e as perdas na rede também. Esta capacidade de transformar a tensão, tanto num sentido como noutro (bidirecional) é a grande desvantagem do sistema DC em relação ao AC, embora atualmente este problema possa ser ultrapassado com recurso à eletrónica de potência. Um outro ponto a favor do sistema AC é o facto de atualmente se encontrarem no mercado principalmente equipamentos consumidores de energia para AC, embora nos últimos anos tenha-se dado um ligeiro aumento da produção de alguns equipamentos direcionados para DC.

Ao contrário dos sistemas de potência de grande dimensão, os sistemas de abastecimento de energia em DC podem funcionar de forma separada ou interligados a redes. De qualquer forma, os componentes dos sistemas de potência em DC (geradores distribuídos, armazenamento de energia e os inversores de interligação) devem satisfazer os seguintes requisitos:

- Possibilidade de ligação de diferentes unidades de produção e/ou armazenamento;
- Uma unidade deve funcionar de forma autónoma, sem que a falha dessa unidade resulte numa falha do sistema;
- Permitirem a adição de novas unidades, quando for necessário;
- A possibilidade de ligação e desligação direta.

Um método de controlo para unidades de energia que atende os requisitos descritos anteriormente deve permitir assim a ligação de painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas, armazenamento de energia, conversores DC-DC e conversores bidirecionais (AC-DC) de rede.

2.8 Comparação de sistemas AC e DC

Nos sistemas de fornecimento AC, cada módulo do sistema, está ligado à alimentação AC por meio de um inversor aplicado a cada um destes.

Num sistema de abastecimento de energia em CC, a linha de distribuição em DC é ligada à rede AC por meio de um único conversor bidirecional de rede.

Quando a energia é produzida usando fontes renováveis (solar ou eólica), a saída da produção varia bastante, o que tem um efeito indesejado no valor da tensão sobre o sistema e as cargas. Para um sistema de fornecimento de energia em AC pode resolver-se o problema de duas formas: um único conversor AD-DC estabilizador de tensão instalado do lado da linha de distribuição AC, ou um por cada unidade de produção ou vários instalados perto de cada unidade de produção. No primeiro caso é apenas necessário um conversor bidirecional e as variações na rede de AC ficam compensadas, mas é difícil a determinação do seu sítio de instalação e a sua potência. Não é o problema do último caso, mas são necessários diversos conversores bidirecionais, o que resulta num custo de investimento.

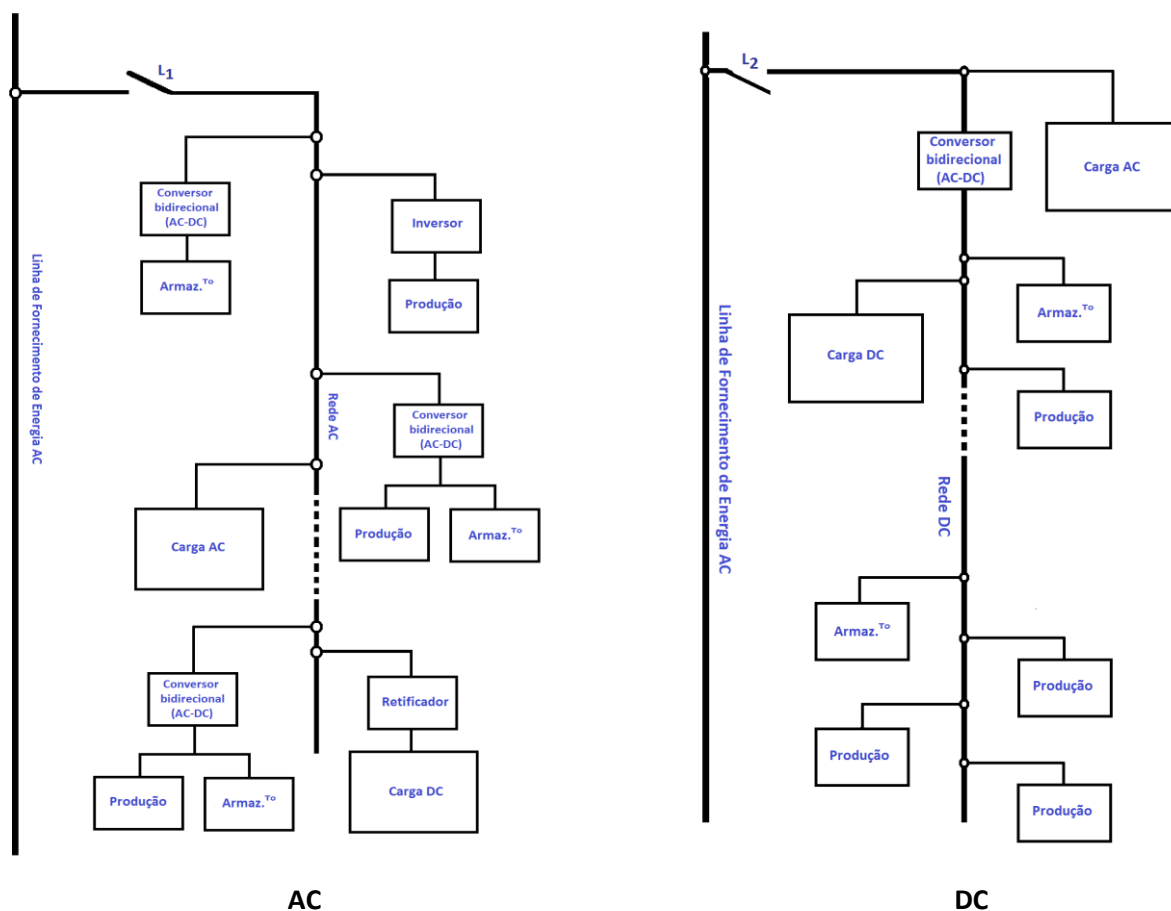


Figura 8 – Sistemas de Energia em AC e DC (para uso nas instalações do consumidor/produtor).

Por outro lado, o sistema de abastecimento de energia DC é ligado à rede AC por um único conversor bidirecional. De referir que entre as produções e os armazenamentos, poderão ser usados conversores DC-DC para permitirem a gestão energética do sistema.

Nos sistemas alimentados com a rede AC, cada conversor bidirecional de rede funciona em modo isolado, deixando a rede de funcionar quando se dá uma interrupção na rede de fornecimento de energia, e a ligação L_1 deve ser aberta para se ajustar a tensão e frequência de funcionamento, resultantes da interrupção do fornecimento de energia no sistema. Durante o funcionamento autónomo, o controlo conjunto da tensão, frequência e ângulo de fase, ou seja, a sincronização entre os conversores bidirecionais é necessária para se manter a estabilidade da rede.

Nos sistemas com abastecimento em DC, o funcionamento isolado do único conversor bidirecional de rede é detetado e L_2 é aberta, sem ser necessária qualquer alteração no ajuste de tensão, frequência e ângulo de fase, para se manter em funcionamento isolado da rede. A tensão da linha de distribuição DC diminui, e como compensação vai ser libertada energia do armazenamento de energia. Assim, o fornecimento ininterrupto de energia pode ser facilmente feito às cargas ligadas à linha de distribuição DC.

A maioria dos dispositivos de eletrónica de potência, como a iluminação Led e das fontes de alimentação comutadas podem funcionar com alimentação DC. Por outro lado, boa parte dos geradores de menores potências, produz energia em DC. Portanto, nos sistemas com alimentação DC, o número de conversões (AC-DC ou DC-AC) pode ser reduzido e daí a eficiência poder ser melhorada, com o fornecimento de energia aos equipamentos eletrónicos diretamente a partir de uma linha de distribuição DC [50], [51]. Com os sistemas de abastecimento em CA, são necessárias duas operações de conversão: a energia é primeiro convertida de DC para AC e na carga de AC para DC.

Assim, é mais vantajoso usar localmente um sistema DC, quer em termos de eficiência energética, quer em termos de fiabilidade de energia. Tomando em consideração estas vantagens foi assim proposto o estudo de um sistema com alimentação DC. Um passo fundamental, para a concretização destes sistemas são os conversores DC-DC, que serão responsáveis por permitirem a interligação de módulos (produção e armazenamento de energia) com diferentes tecnologias de diferentes fabricantes.

O desenvolvimento e a implementação prática de um conversor DC-DC com um transformador do tipo flyback, serão abordados no próximo capítulo.

3. Conversores DC-DC

3.1 Introdução

A maioria dos equipamentos eletrônicos requer tensões de corrente contínua para o seu funcionamento. Historicamente estas tensões só poderiam ser fornecidas por baterias ou por fontes de alimentação clássicas que convertem a corrente alternada da rede elétrica, em tensões de corrente contínua. O primeiro elemento de uma fonte de alimentação de corrente contínua clássica é o transformador, que eleva ou diminui a tensão de entrada para um nível adequado ao funcionamento do equipamento.

Os conversores DC-DC podem ser implementados com base na topologia linear ou “Switch Mode Power Supply” – SMPS.

A topologia linear está em declínio devido aos conversores ocuparem muito espaço, serem pesados, terem um custo alto devido ao material usado e apresentarem rendimentos baixos.

Os conversores DC-DC com a topologia SMPS recorrem à tecnologia de comutação onde as características desejáveis de uma fonte comutada são:

- pequenas dimensões;
- baixo peso;
- baixo custo;
- baixas perdas com o funcionamento a altas frequências.

Apresentam como pontos menos favoráveis serem mais complexos e requererem filtragem. Mas estas desvantagens são largamente ultrapassadas pelas vantagens da tecnologia comutada. A SMPS dá origem a dois grupos de conversores: os não isolados e os isolados, como se pode ver na tabela seguinte [52], [53], [54], [55].

Tabela 2– Comparativo das diferentes topologias de conversores SMPS

Topologia	Isolado?	Custo Relativo	Requerimentos Magnéticos	Entrada Universal?	$V_{out} < V_{in}$?	$V_{out} > V_{in}$?
Buck	Não	1	Bobina	Não	Sim	Não
Boost	Não	1	Bobina	Não	Não	Sim
Buck –Boost	Não	1	Bobina	Não	Sim	Sim
Sepic	Não	1.2	Duas bobinas	Não	Sim	Sim
Cuk	Não	1.2	Duas bobinas	Não	Sim	Sim
Flyback	Sim	1.5	Transformador	Sim	Sim	Sim
Forward	Sim	1.8	Transformador e bobina	Sim	Sim	Sim
Push-Pull	Sim	1.8	Transformador e bobina	Não	Sim	Sim
Half Bridge	Sim	2	Transformador e bobina	Sim	Sim	Sim
Ressonat LLC	Sim	2	Transformador	Sim	Sim	Sim

3.2 Topologia de um conversor DC-DC

A construção de um conversor DC-DC deve obedecer a um conjunto de requisitos. O mais importante é a segurança, providenciando o isolamento entre a produção / armazenamento e o barramento DC. O conversor deve aceitar alguma variação da tensão na entrada de potência e ser

capaz de permitir o controlo de corrente na sua saída de potência. Ao nível dos requisitos magnéticos, deve ser o mais simples possível de forma a reduzir-se o custo de construção e o funcionamento ser mais simples. O controlo deve ser facilitado através do menor número possível de interruptores. Pretende-se ainda que seja compacto e tenha baixo peso.

Dos conversores isolados da tabela anterior, o flyback juntamente com o ressonat LLC são os que apresentam melhores requisitos magnéticos (apenas o transformador). O flyback apresenta a grande vantagem adicional de precisar apenas de um interruptor de comutação (o ressonat LLC precisa de dois) [56], [57]. Além disso, das tecnologias isoladas, o flyback é o que apresenta menores custos e menos necessidades em termos de componentes eletrónicos [58], [59], [60].

Deste modo decidiu-se a implementação do conversor flyback que no caso de haver um curto-circuito de um dos lados, o transformador limita a capacidade de transferência de energia e uma vez detetado o problema, o conversor pode ser parado, resolvendo o problema sem afetar o que está no outro lado do transformador [57]. Os conversores isolados denominam-se desta forma por possuírem um transformador de alta frequência que assegura um isolamento galvânico entre a entrada e a saída.

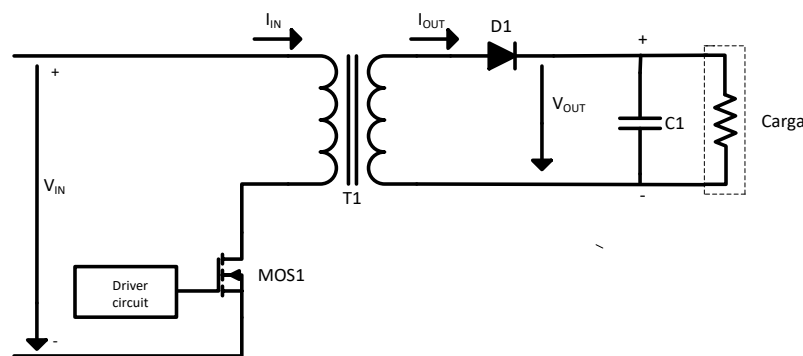


Figura 9 – Circuito básico do conversor flyback [61].

A maior limitação do conversor flyback consiste no facto de, para níveis mais elevados da potência de saída, os esforços de comutação do interruptor de potência comandado (mosfet) serem maiores. Esta desvantagem pode ser parcialmente contornada se, para valores mais elevados de potência de saída, forem usados mais do que um transformador flyback em paralelo [62].

3.3 Transformador de alta frequência

A principal diferença entre um transformador de alta frequência (comutação) e um transformador comum, também conhecido por linear, é que o primeiro é projetado para armazenar energia no seu circuito magnético, ou seja desempenha funções como uma indutância (pura), enquanto um transformador comum é projetado para transferir diretamente a energia do primário para o secundário.

Num transformador de alta frequência a corrente, ao circular no enrolamento primário, cria um fluxo magnético que é armazenado no núcleo. Quando é interrompida a corrente no primário, o fluxo armazenado no núcleo induz a corrente no secundário. Na prática, isto pode ser dificultado,

devido ao tempo de corte dos transístores e díodos e à necessidade de circuitos de amortecimento (“Snubbers”), etc...

Nos transformadores comuns aplicam-se no primário tipicamente tensões sinusoidais enquanto nos transformadores de comutação são aplicadas tensões retangulares (impulsos).

O primeiro passo no projeto do transformador de alta frequência é a escolha do núcleo: do material (normalmente a ferrite) e da forma física (dimensões). É uma decisão muito importante que afeta todo o projeto, porque todos os cálculos subsequentes são efetuados com estas informações.

As ferrites têm tipicamente uma densidade de fluxo de saturação de 0,3 T, mas com a presença de óxidos aumenta-se a resistividade específica para níveis muito elevados (da ordem do 1 T), reduzindo assim as perdas por Correntes de Foucault. As formas disponíveis incluem barras, toróides, núcleos do tipo EE e EI [55]. Uma característica importante é a temperatura de Curie (TC), a temperatura em que o material perde as suas propriedades ferromagnéticas. A referida temperatura situa-se entre 100 e 300 ° C, dependendo do tipo de material. O fenómeno é reversível e reduzindo a temperatura do material abaixo de TC recupera-se as suas propriedades.

Nos transformadores de menor potência é recomendada a série do tipo E devido à simplicidade construtiva e ao baixo custo. Como é sugerido pela sigla, o núcleo magnético é composto por dois elementos em forma de E. As duas partes formam o circuito magnético. Os enrolamentos são inseridos no suporte e fixados no lugar. As três superfícies de contacto de cada metade do núcleo são maquinadas para reduzir as imperfeições e obter-se o tamanho de entreferro desejado. Em alguns casos, um ligeiro afastamento é desejado, pode ser obtido através da medida da formação da coluna central, menor do que as do núcleo exterior [63].

As metades dos núcleos com o intervalo de ar (Gap) calibrado, o entreferro, podem ser escolhidas a partir de um catálogo. Por exemplo, com o catálogo Siemens Matsushita, para o ETD49, tipo ferrite, pode-se ter quatro valores: $0,20 \pm 0,02$ mm; $0,05 \text{ mm} \pm 0,50$; $1,00 \pm 0,05$; $2,00 \pm 0,05$ mm [64].

As Ferrites nas séries E e ETD são amplamente utilizadas, sendo fáceis de obter. Este catálogo da Siemens Matsushita contém vários materiais disponíveis para a série E. Estes materiais são saturados por uma elevada densidade de fluxo e as perdas são baixas, têm os seguintes códigos: N27; N67; N87; N49. A escolha do material a usar está correlacionada com a frequência de comutação [65]:

- N27 é adequado para aplicações de energia num intervalo de frequências de comutação até 100kHz;
- N67 é adequado para uma aplicação similar, mas a faixa de frequência é entre os 100 KHz e os 300KHz;
- N87 para frequências até 500KHz;
- N49 para frequências acima de 500KHz.

O núcleo clássico da série E tem a coluna quadrada, embora possa haver outras famílias na mesma série, disponíveis para aplicações especiais.

Os nomes mais comuns para a série E são os seguintes:

- ETD-Economic Transformer Design. Norma IEC 51 (CO) 276;

- EFD-Economic Flat Design.

Para a escolha correta das ferrites os parâmetros são [65]:

- A potência máxima;
- Tipo de conversor (Forward, Flyback, Push-Pull, ...);
- A frequência de comutação máxima;
- O valor maior de temperatura;
- O volume máximo.

Os núcleos do tipo ETD oferecem a vantagem adicional de terem o campo magnético praticamente constante ao longo da secção do circuito magnético. Também têm uma vasta gama de acessórios otimizados [66].

Ao fazer a escolha, deve ter-se em conta que o fabricante, como regra geral, indica sempre os valores limite, por isso, uma boa regra é escolher-se o tipo de ferrite imediatamente maior do que o especificado nos catálogos como capaz cumprir a potência. Isto irá evitar problemas futuros de projeto relacionados com o número de voltas, a secção de condutor e o espaço entre os enrolamentos. Esta precaução é especialmente recomendada se o transformador é projetado em conformidade com as normas de segurança (distâncias mínimas entre as diferentes camadas de enrolamentos, usando o fio condutor com duplo isolamento, etc.).

3.4 Princípio de funcionamento do conversor flyback

De início, o interruptor de potência fecha o circuito de alimentação do primário do transformador, sendo armazenada energia [67]. Seguidamente, o interruptor é aberto, levando a que a energia se transfira para o secundário, sendo alimentada a carga [57], [68].

Há dois modos distintos de funcionamento para os conversores flyback: o modo contínuo e o modo descontínuo [69].

No modo descontínuo, a corrente I_{OUT} que circula no secundário do transformador fica com o valor zero antes do interruptor fechar o circuito de alimentação do primário. Há um período morto T_{dt} entre a corrente I_{OUT} no instante em que fica zero e o início do próximo período de armazenamento no primário do transformador [70], [71].

No modo contínuo, a corrente I_{OUT} ainda circula no secundário do transformador com valor superior a zero, quando o interruptor de potência fecha o circuito de alimentação do primário do transformador [54]. Deste modo, como se pode ver na Figura 10, a corrente no primário do transformador terá um maior valor inicial. Estas variações rápidas de corrente nos enrolamentos do transformador levam a maiores perdas e a um consequente aumento das correntes de circulação, o que dificulta o controlo do circuito [72], [73].

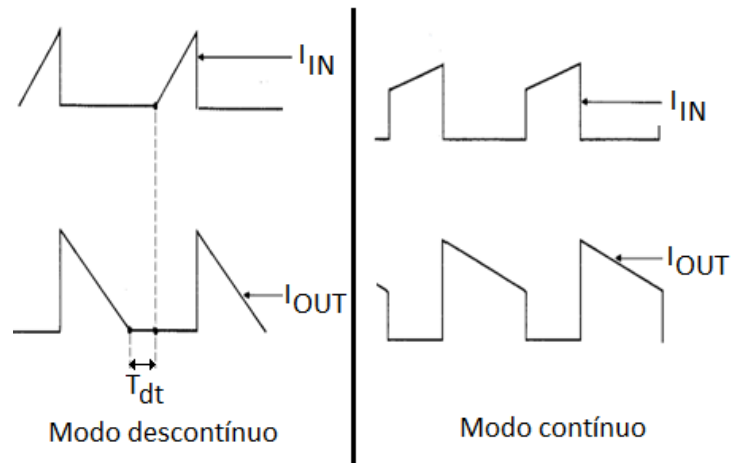


Figura 10 - Formas de onda dos dois modos de funcionamento.

Quando, o interruptor é aberto, a energia é levada para a carga. Se toda a energia armazenada for levada para a carga consegue-se um bom aproveitamento da indutância de magnetização do transformador, ficando toda ela disponível para a fase seguinte. No modo contínuo ainda fica energia armazenada, o que leva a uma desclassificação do transformador em termos de indutância de magnetização disponível. Embora a resposta seja mais rápida a variações de carga, a tensão de saída vai ser mais baixa, problema que se agrava com tensões de entrada mais baixas [73].

Com base nestas informações técnicas, o conversor DC-DC foi projetado para funcionar no modo descontinuo, de forma a haver uma diminuição das correntes que circulam no interior do transformador e assim uma redução das perdas com um aumento do rendimento do conversor DC-DC. Além disso um controlo mais facilitado e ainda ser capaz de manter os níveis de tensão superiores na saída.

3.5 Conversor flyback

3.5.1 Projeto

O conversor DC-DC usa dois transformadores de alta frequência ETD49 que funcionam com a topologia flyback. Os primários dos transformadores foram ligados em paralelo e os secundários em série de forma a elevar-se a capacidade de transferência de energia com valores de tensão mais elevados na saída. Estes transformadores são controlados pelo mosfet (MOS1) que permite bloquear a condução entre o dreno e a fonte, alimentando os primários dos transformadores e armazenado a energia nas suas indutâncias.

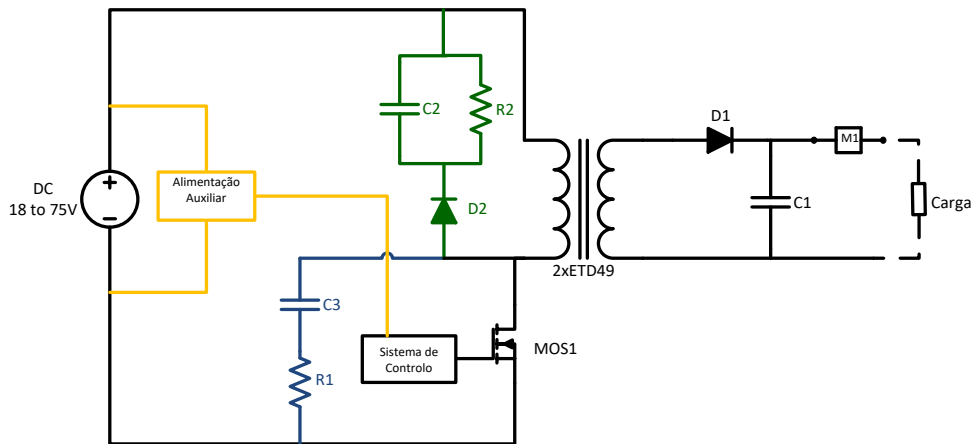


Figura 11 – Projeto do conversor flyback.

Foi escolhido para mosfet o IRFB4332PBF devido a ter uma tensão de bloqueio de 300 V entre o dreno e a fonte. Também tem uma baixa resistência em condução de 29 mΩ a 10 V, alta capacidade de suportar correntes de pico permitindo um funcionamento fiável, comutando rapidamente com tempos de queda e de subida de tensão rápidos.

Quando o mosfet abre, é interrompida a condução entre o dreno e a fonte. A energia armazenada nos transformadores sai dos seus secundários e passa pelo díodo de retificação D1, o 30CTH03 sendo imposto o sentido de circulação da corrente.

O mosfet fecha quando existe um nível de tensão alto aplicado entre a porta e a fonte, neste caso são aplicados 10 V (valor típico para $R_{DS(ON)}$ deste mosfet). Quando o nível de tensão entre a porta e a fonte do mosfet for baixo, este vai impedir a condução entre o dreno e a fonte. No caso deste circuito a tensão será próxima de 0 V. Segundo o fabricante do mosfet, este com uma tensão inferior a 3 V entre a porta e a fonte, não permite a condução entre o dreno e a fonte. Com uma tensão entre a porta e a fonte superior a 5 V ocorre a condução entre o dreno e a fonte.

Esta tensão é produzida pela modelação por largura de impulsos proveniente da saída OUT do 555 CS. Mas esta saída não pode ser usada diretamente para alimentar a porta do mosfet, requerendo o uso de um módulo de interface entre o comando e a potência, onde se usa um transístor bipolar, o 2N2222A mostrado na figura 12.

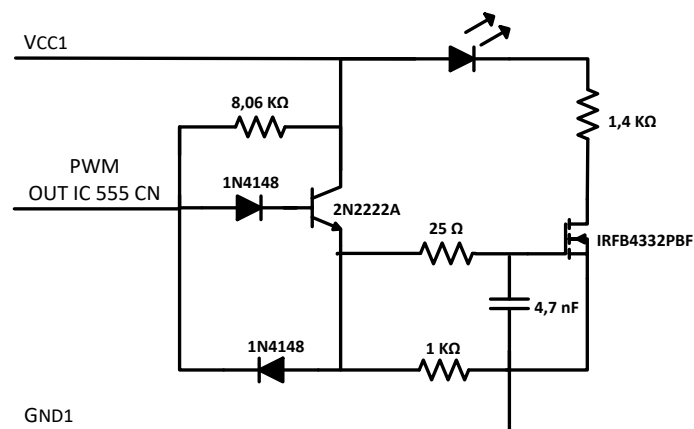


Figura 12 – Interface entre o sinal de controlo e o Mosfet de potência.

O sinal é fornecido à base deste transistor. Sem o uso do transistor 2N2222A quando se passava da condução ao bloqueio, a corrente solicitada levaria a uma destruição dos circuitos auxiliares e a uma falta de proteção do circuito gerador da modelação por largura de impulsos.

O diodo 1N4148, ligado entre o emissor do transistor e o sinal de controlo de PWM, permite impor um nível de tensão zero à porta do mosfet, bloqueando assim o mosfet sempre que o sinal de PWM tenha um valor baixo. Quando o sinal de PWM é alto, o outro diodo 1N4148 polariza a base do transistor, colocando-o num estado de condução, aparecendo desse modo um sinal de tensão alto no terminal do emissor. Este nível alto de tensão aparece também na porta do mosfet, colocando-o em um estado de condução.

Quando o pino de *output* do 555 CS abre, a base do transistor adquire um nível alto e faz com que a corrente de coletor/emissor, produza uma queda de tensão na resistência de emissor de 1 K Ω que aparece na porta do mosfet, ficando no estado de condução. Caso o nível do pino de *discharge* seja baixo (à massa), não há corrente de emissor no transistor, logo não existe queda de tensão na porta e o mosfet fica no estado bloqueado.

Quando o mosfet entra em condução, a queda de tensão será aproximadamente 12 V / 1 K Ω , logo 12 mA de corrente de coletor. Como o ganho do transistor $h_{FE} \approx 75$ ter-se-á uma corrente na base de 0,16 mA.

Para que o máximo sinal possa cair em R_e , a resistência de saída do circuito deve ser $R_{OUT} \ll R_e$. Considerando $R_{OUT} \approx R_e / 10$, com $R_e = 1 \text{ K}\Omega$, neste circuito vem:

$$R_{OUT} = \frac{R_{bd}}{1 + \beta} \Rightarrow R_{bd} = 100 \times 76 = 7,6 \text{ K}\Omega \quad (3.1)$$

Uma vez que não foram consideradas as quedas de coletor emissor, nem as quedas no diodo, este valor de R_{OUT} deve ser superior, tendo-se usado o valor de 8,06 K Ω (resistência disponível no mercado). Apesar de a resistência R_{bd} , ser de pull up, não se deve baixar o seu valor, porque também liga à massa.

A resistência de 25 Ω aplicada entre o emissor do transistor e a porta do mosfet vai reduzir as oscilações devido à capacidade parasita da porta do mosfet, facilitando o funcionamento da comutação.

O condensador de 4,7 nF que está aplicado entre a porta e a fonte do mosfet permite a estabilização da tensão na porta.

O led verde e a resistência de 1,4 K Ω destinam-se a mostrar o funcionamento do mosfet quando a tensão entre o dreno e a fonte é nula (em condução).

3.5.2 Produção da modelação por largura de pulso (PWM)

São usados dois osciladores 555, o primeiro do tipo P que pode oscilar até a um máximo de 500 KHz, configurado como oscilador astável, indo oscilar sem qualquer disparo externo de forma a

produzir o sinal PWM, com um ciclo de funcionamento ajustável a partir do potenciômetro de 2,2 K Ω , mostrado na figura 13.

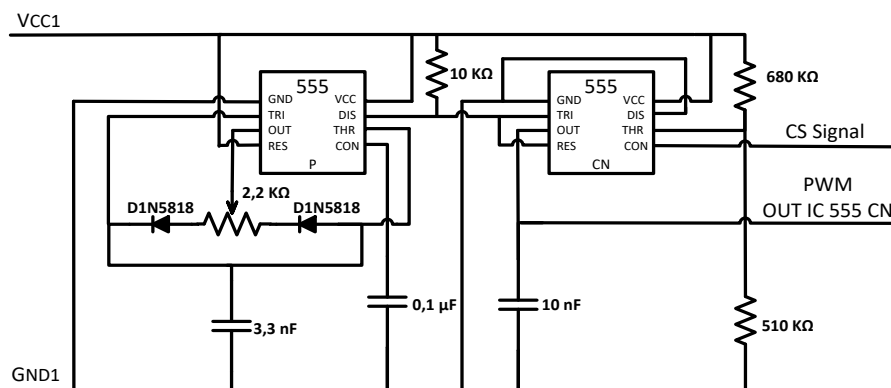


Figura 13 – Produção do sinal de controle PWM.

Para se garantir uma frequência constante fez-se uma montagem especial, onde a saída do sinal é feita pelo pino de *discharge*, em vez de ser feita pelo pino de *output*. Quando é ligada a alimentação do 555 P, o pino *trigger* está num nível baixo e o condensador de 3,3 nF está descarregado. Inicia-se desta forma o ciclo do oscilador, fazendo com que a *output* vá para um valor alto e o condensador de 3,3 nF começa a carregar através do lado esquerdo do potenciômetro de 2,2 K Ω e do diodo esquerdo D1N5818.

Quando a tensão no condensador de 3,3 nF carregar a 2/3 de 12 V, o *threshold* é ativado, o que vai levar a que a *output* e a *discharge* transitem para um nível baixo e o condensador de 3,3 nF começa a descarregar através do lado direito do potenciômetro de 2,2 K Ω e pelo diodo D1N5818 da direita.

Quando a tensão no condensador de 3,3 nF desce abaixo de 1/3 dos 12 V, a *output* e a *discharge* voltam para um nível alto, e o ciclo vai repetir-se.

A soma do valor da resistência que permite a carga e descarga do condensador de 3,3 nF é sempre a mesma (são os 2,2 k Ω do potenciômetro), pelo que o comprimento, da onda do sinal de saída é constante, mantendo-se a frequência, qualquer que seja o *duty cycle* solicitado.

A frequência teórica do PWM (f_{PWM}) é dada por [74]:

$$f_{PWM} = \frac{1,44}{R_s \times C_{tt}} \quad (3.2)$$

onde R_s - Resistência de saída; C_{tt} - Capacidade nos pinos *trigger* e *threshold*.

Quando o pino de controle de tensão não é utilizado para a entrada de tensão externa, é ligado à massa através de um condensador de 0,1 uF, tal como é recomendado nas folhas de especificações do integrado 555 P, de modo a que o período de funcionamento do 555 P, não seja afetado.

Neste circuito, o pino de *output* é usado para carregar e descarregar o condensador de 3,3 nF, em vez do pino de *discharge*. Isso é feito porque o pino de *output* tem um *totem pole* de configuração. Este *totem pole* é um circuito constituído pelos transístores internos do 555 P (Q20 a Q24) que fornecem (Q21 e Q22) e retiram a corrente (Q24), enquanto o pino de *discharge* só descarrega a corrente. Note-se que os pinos de *output* e *discharge* transitam para o nível alto e baixo ao mesmo tempo, no ciclo do oscilador.

No pino descarga do 555 P a resistência de 10 K Ω é uma resistência de *pull-up*, ou seja permite ter os 12 V no pino *trigger* e no pino *reset* do 555 CN. Por outro lado, quando o valor da tensão, nestes dois últimos pinos é posto à massa através do de *discharge* do 555 P, o curto-circuito entre a alimentação e a massa é limitado pela resistência de 10 K Ω .

O integrado 555 CN pode oscilar a um máximo de 2,1 MHz e proporciona na sua saída o sinal que tem na entrada, se o pino de controlo de tensão tiver uma tensão maior do que 5 V. Caso não seja superior a 5 V, vai impedir a passagem do sinal que tem na sua entrada, proporcionando na sua saída uma tensão próxima de 0 V.

Para se definir a entrada em funcionamento do controlo tem que se ter em conta o divisor de tensão ligado ao threshold. Na implementação deste divisor de tensão, deve levar-se em consideração as características internas do 555 CN que impõem o valor da soma das duas resistências, igual ou maior que 1 k Ω e menor ou igual a 20 M Ω (dados disponíveis na folha de característica disponibilizada pelo fabricante).

No divisor de tensão,

$$V_{OUT} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in} \quad (3.3)$$

Substituindo-se $R_2 = 510 \text{ K}\Omega$, $R_1 = 680 \text{ K}\Omega$ e $V_{in} = 12 \text{ V}$, obtém-se $V_{OUT} = 5,1 \text{ V}$. Então para uma tensão igual ou superior a 5,1 V aplicados no pino de controlo de tensão o integrado 555 CN vai disponibilizar o sinal da entrada na saída. Para tensões inferiores a 5,1 V aplicadas no pino de controlo de tensão, ou seja, 5 V ou menos, o integrado 555 CN, não disponibiliza o sinal da entrada na saída.

3.5.3 Controlo do conversor DC-DC

Em todos os conversores que funcionam com base na tecnologia da comutação a tensão de saída é função da tensão de entrada, do ciclo de trabalho e da corrente de carga, bem como dos valores dos componentes do circuito conversor.

A tensão na entrada no conversor DC-DC implementado, pode variar de 18 VDC a 75 VDC, e a frequência de controlo será de 200 KHz, podendo cada conversor DC-DC alimentar uma carga, ou um barramento DC com carga(s) e outro(s) conversor(es) DC-DC ou inversor(es) ligados.

A corrente na carga pode variar desde zero até ao valor nominal da corrente. Apesar da variação de corrente ser totalmente controlável é desejável que a tensão de saída esteja dentro de um certo limite (próxima da tensão de funcionamento pretendida para a saída do conversor, ou do

barramento DC). Isto não é prático de se conseguir sem uma realimentação negativa e é necessário definir o ciclo de trabalho (descreve a fração de tempo em que um sistema está em um estado "ativo") para um único valor.

Existem dois métodos principais para se controlar o ciclo de trabalho de forma a manter-se a tensão de saída dentro dos limites especificados: o modo de controlo de tensão e o modo de controlo de corrente.

3.5.3.1 Modo de controlo de tensão

No modo de controlo de tensão, a tensão de saída V_{OUT} é medida e em seguida comparada com o valor de referência V_{Ref} (tensão de saída desejada).

O amplificador diferencial faz a diferença entre os dois sinais que tem nas suas entradas, este resultado é chamado de erro e é também amplificado pelo amplificador diferencial, podendo ser usado numa comparação com uma rampa constante no bloco da modelação por largura de impulso para se produzir uma largura de pulso modelada, criando-se o próximo valor do ciclo de trabalho [75].

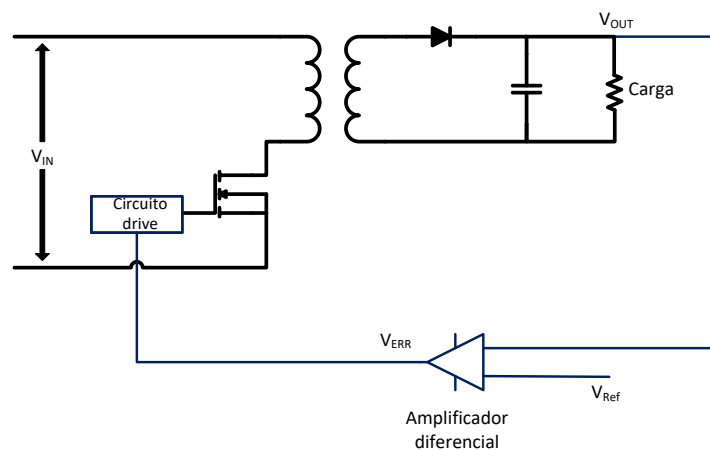


Figura 14 – Controlo de tensão.

Como se pode observar na figura 14, este modo tem apenas um circuito de controlo, sendo fácil de conceber e analisar.

No entanto, no presente método de controlo, qualquer mudança na linha de entrada ou na carga da saída, tem de ser primeiro detetada como uma variação na tensão de saída e em seguida corrigida pelo circuito de retroalimentação. Portanto, a resposta é lenta e as respostas transitórias (etapas de mudança de carga) não são favoráveis.

Se a tensão na entrada aumentar, ao usar-se a realimentação para o controlo no modo de tensão, vai-se reduzir o efeito da variação da tensão na entrada relativamente à saída.

3.5.3.2 Modo de controlo de corrente

A técnica de controlo de corrente requer o uso de uma resistência em série ou a aplicação de um sensor [76], conforme se mostra na figura 15.

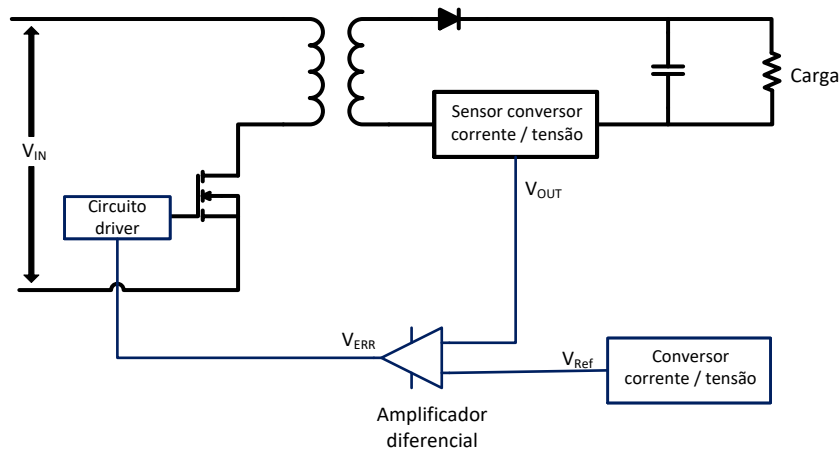


Figura 15 – Controlo de corrente.

Deste modo, faz-se a medição do valor de corrente para fins de controlo. A corrente medida é convertida para uma tensão de saída V_{OUT} , que é comparada com a tensão de referência V_{Ref} (tensão de saída desejada). Esta tensão de referência, corresponde a um valor de corrente previamente fornecido por um conversor [77].

A diferença destas duas tensões dá origem a um sinal de erro V_{ERR} . O valor deste sinal de erro depois de devidamente acondicionado pelo amplificador diferencial irá modelar a largura com o valor necessário para se obter a saída desejada. Deste modo é gerado o ciclo de trabalho necessário para manter a corrente de saída dentro dos limites especificados.

Como o modo de controlo de corrente deteta a corrente no circuito, qualquer mudança na corrente da carga pode ser corrigida antes de afetar a tensão de saída.

O controlo do modo de corrente fornece às entradas inerentes correntes de sinal simétrico para os conversores, características inerentes de limitação de corrente e recursos para partilha de cargas entre os vários conversores ligados em paralelo. Também melhora a resposta a variações de carga e a resposta transitória por causa da malha interna de corrente [78].

3.5.3.3 Malha de realimentação para o conversor DC-DC

Se a malha de realimentação não for bem projetada, poderá ser uma das maiores influências para as perdas em standby, devido ao consumo dos componentes eletrónicos.

Um dos requisitos de segurança é o isolamento, o que tem levado ao uso generalizado do *optocoupler* na indústria. No entanto, a utilização de um acoplador ótico exige duas correntes, uma de cada lado, que fluem através dele. Na topologia de uma realimentação, estas duas correntes chegam ao seu valor máximo na condição sem carga, conduzindo a elevadas perdas em standby [79].

No corte do *optocoupler* pode existir uma corrente residual significativa que multiplicada pela tensão nos seus terminais em corte que é elevada conduz a uma potência de perda em corte considerável.

Existirem soluções para o controlo feito do lado do primário, que através de um terceiro enrolamento auxiliar, evitam a necessidade de uma rede de realimentação isolada e que podem ser de baixo custo e de baixo consumo de energia em standby. Mas estas soluções, têm muitas limitações quando se aplica à topologia *flyback*.

A tensão do enrolamento auxiliar contém, não só a tensão de saída, mas também a tensão do díodo retificador do lado secundário, o que dificulta a extração da informação da saída de forma precisa. Além disso, o controlo do conversor *flyback* do lado do primário é mais limitado no modo de funcionamento descontínuo para um funcionamento com uma boa regulação na carga. Se não permitirem uma boa regulação na saída, a aplicação numa gestão energética fica muito limitada [79].

Para se resolver o problema de ser reduzirem ao mínimo as perdas energéticas, considerando-se a maior utilidade do modo de controlo de corrente, no que diz respeito ao controlo das correntes, numa resposta mais rápida às cargas e à possibilidade da ligação em paralelo dos conversores DC-DC para facilidade de gestão, decidiu-se o controlo dos conversores no modo de corrente.

A figura 16 mostra a realimentação implementada.

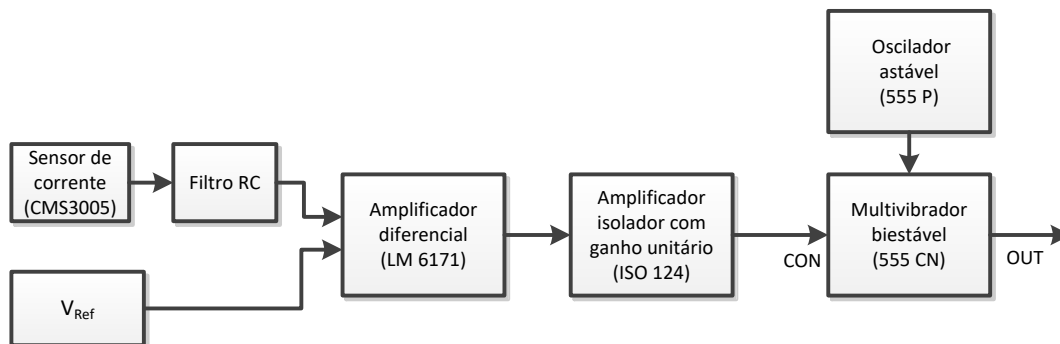


Figura 16 – Realimentação usada no conversor DC-DC.

A medição da corrente no secundário do conversor é feita através do sensor de corrente CMS3005. Este faz uma medição eletrónica de correntes (DC, AC, pulsada, mistas) com isolamento galvânico entre o circuito primário (alta potência) e o circuito do secundário (circuito eletrónico para o controlo), funcionando segundo o princípio do “Efeito de Hall”.

Faz uma medição com uma largura de banda mínima de 2 MHz e está preparado para ser montado em série, permitindo medir uma intensidade de corrente nominal de 5 A. Quando o sensor é alimentado com ± 15 V vai fornecer na sua saída uma gama de tensão de -10 V a 10 V.

Por seu lado, uma fonte fornece um sinal de tensão de 0 V a 10 V, correspondente a uma corrente desejada. A diferença entre a tensão dada pelo sensor V_{OUT} e o valor da tensão de referência V_{Ref} dada pelo dSPACE é detetado por um amplificador diferencial LM6171 com uma taxa de variação de 3600 V/ μ s e uma largura de banda de 160 MHz, que também faz o acondicionamento do sinal (a amplificação do sinal de tensão). O LM6171 vai responder muito rapidamente à chegada dos sinais. De referir que nos amplificadores operacionais 741, normalmente

usados esta *slew rate* não chega muitas vezes aos 20 V/ μ s, o que prejudicava todo o processo de controlo de corrente do conversor DC-DC.

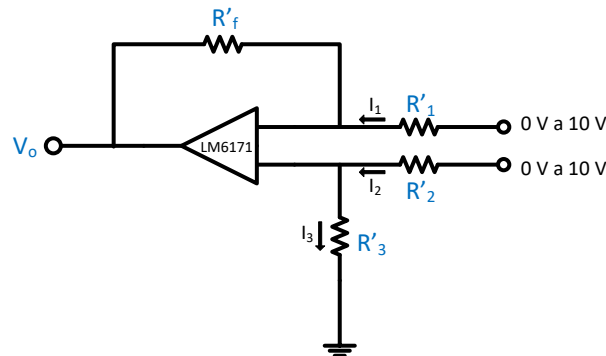


Figura 17 – Determinação do erro e acondicionamento do sinal.

Considerando-se o erro de desvio nas saídas analógicas do dSPACE de 1 mV, que é de 0,02% e 2,47% de erro do sensor de corrente em condições extremas ou 247 mV, mais alguma margem de segurança para perdas nos condutores e no LM6171, considera-se a possibilidade de erro máxima totalizando 250 mV, o que corresponde a 2,5% (0,25 V/10 V).

Sabendo-se que a zona de não funcionamento da saída do 555 CN em termos de modelação, se verifica quando na entrada de controlo (pino 5) do 555 CN se aplica um sinal de tensão menor ou igual a 5 V (proveniente da saída do amplificador isolador ISO 124) como se pode observar na figura 18.

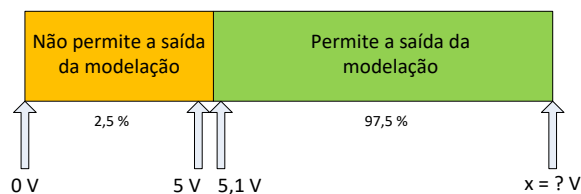


Figura 18 – Modelação do 555 CN em função da tensão na entrada de controlo.

Para a determinação da tensão máxima na saída do amplificador isolador de ganho unitário ISO 124, igual à que sai do amplificador diferencial LM 6171, pode usar-se uma regra simples. Se 2,5% corresponde a 5V, então para 100% tem-se $X=200$ V.

Como é evidente, estes amplificadores vão saturar com um valor muito mais baixo de tensão. A tensão nunca pode ultrapassar o valor da tensão de alimentação, neste caso +15 V. De referir que o ISO 124 para além de ser alimentado a +15 V, também deve ser alimentado com -15 V. Esta alimentação é feita garantindo-se sempre o isolamento (mantendo separada a alimentação da entrada, da alimentação da saída).

Em seguida, considerou-se $R'_1=R'_2=1\text{ K}\Omega$. Tendo em conta a fórmula usada neste tipo de montagem de amplificador diferencial:

$$V_O = \frac{R_f}{R_e} (V_2 - V_1) \quad (3.4)$$

Onde V_O é a tensão que se pretende ter na saída do amplificador diferencial. No caso em questão 200 V. O $R_f = R'_f = R'_3$ é o valor que se pretende obter da expressão correspondente ao valor das resistências em falta. O R_e é o valor da resistência de entrada, sendo $R_e = R'_1 = R'_2$, ou seja 2,4 K Ω . O V_2 (10 V) é o valor máximo que a tensão pode tomar nas entradas do amplificador diferencial e o V_1 (0 V) é o menor valor que a tensão pode tomar nas entradas do amplificador diferencial.

Substituindo e calculando vem: $R_f = 48 \text{ K}\Omega$.

Então para o amplificador diferencial: $R'_1 = R'_2 = 2.4 \text{ k}\Omega$; $R'_f = R'_3 = 48 \text{ k}\Omega$.

Cada uma destas duas resistências de 48 K Ω foi substituída por uma resistência de 39 K Ω em série a um potenciômetro de 22 K Ω . Estes dois potenciômetros permitem a realização de ajustes no amplificador diferencial.

O sinal que sai do LM6771 vai para o ISO124. Este é um amplificador isolador de precisão, que é configurado com um ganho unitário. Assim, vai fornecer um nível de tensão na sua saída igual à da entrada. O sinal disponibilizado na saída vai para o pino de controlo do 555 CN, permitindo controlar o ciclo de trabalho. Nesta ligação, é aplicado um condensador de 20 nF, para evitar oscilações de tensão indesejáveis.

Na saída do sensor de corrente CMS3005 é utilizado um filtro RC para melhorar a resposta de frequência. Para o projeto, é considerada uma largura de banda $f_c = 3 \text{ MHz}$.

$$f_c = \frac{1}{2 \pi R_1 C_1} \quad (3.5)$$

Atribuindo o valor de 3,3 nF a C_1 e substituindo na fórmula acima vem: $R_1 = 16,07 \text{ }\Omega$. Na implementação de circuito é usado um valor de 15 Ω .

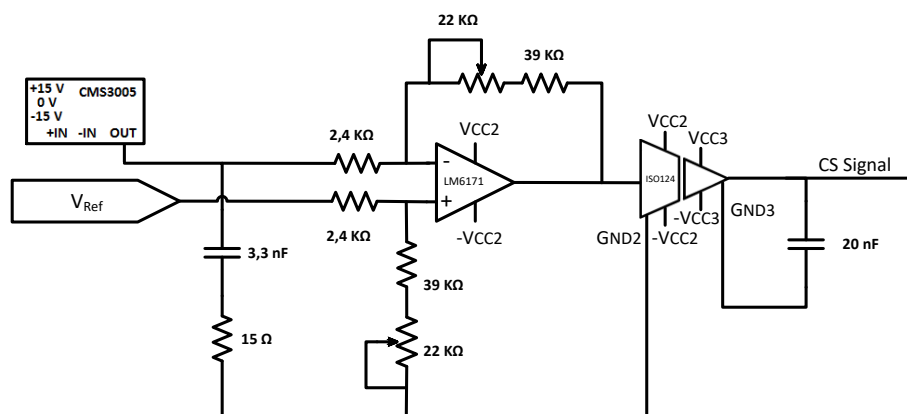


Figura 19 – Diagrama do sistema de controlo de corrente.

3.5.4 Sistema de alimentação auxiliar

Um aspecto importante é a alimentação do módulo de produção da modelação por largura de pulso (555 P, 555 CN) e da interface entre o comando e a potência. Os 12 V disponibilizados em V_{CC1} , são obtidos a partir de uma entrada variável de 18-75 V, conforme se mostra na Figura 20.

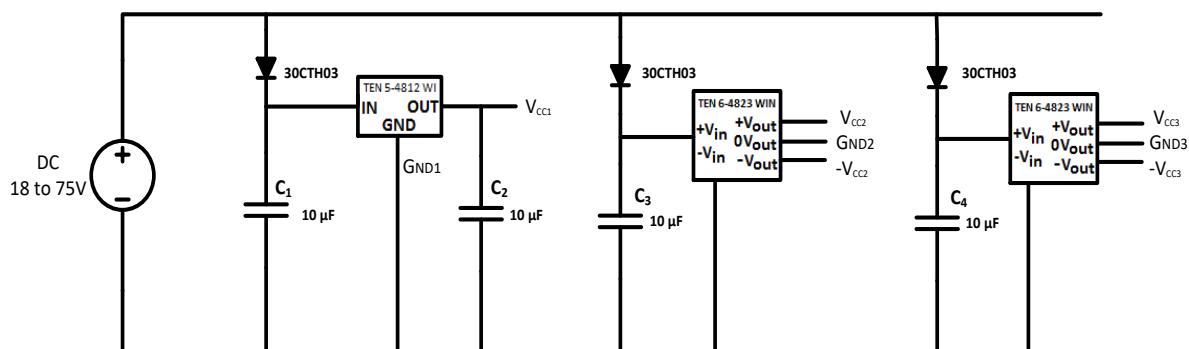


Figura 20 – Sistema de alimentação auxiliar

O díodo 30CTH03 impede a corrente no sentido inverso e o condensador C_1 de 10 μF , vai impedir que as flutuações de tensão sejam transmitidas para o TEM 5-4812 WI, dando proteção e facilitando seu correto funcionamento.

O condensador C_2 de 10 μF , aplicando na saída do TEM 5-4812 WI, vai permitir a estabilização da tensão de saída nos 12 V, evitando a variação deste valor. É importante para a produção da modulação por largura de impulso ser feita com uma frequência constante de 200 KHz. A frequência é produzida com base no tempo de carga e descarga do condensador de 3,3 nF e uma mudança de tensão momentânea iria causar uma mudança na frequência do sinal, o que teria consequências indesejáveis no módulo de interface e em seguida na parte de potência.

Um outro circuito (ao centro da figura 20), destina-se a alimentar o sensor de corrente CMS3005, o amplificador diferencial LM61171 e o isolador ISO124 (apenas o lado de entrada do sinal). Aceita tensões de entrada de 18 V a 75 V e fornece tensões na saída de 15 V em V_{CC2} , 0 V em GND2 e -15 V em $-V_{CC2}$. O díodo 30CTH03 impõe que a corrente circule apenas no sentido da entrada do conversor TEN 6-4823 WIN e o condensador C_3 de 10 μF elimina as flutuações de tensão na entrada. Um aspecto muito importante é o TEN 6-4823 WIN fornecer um isolamento total entre sua entrada e saída.

Usa-se um terceiro circuito de alimentação que serve apenas para fornecer a parte da saída do sinal no isolador ISO124. O isolamento entre a entrada e a saída é deliberadamente quebrado na massa, porque é necessário para mover a referência "zero volts", com a maior precisão possível, da saída *ampop* isolador ISO124 para o circuito gerador da modelação por largura de pulso. A tensão disponível na saída do ISO124 deve ser exatamente a mesma que o 555 CN tem na sua entrada de controlo.

Todos os conversores DC-DC com a estratégia de modelação PWM têm comportamento não ideal que conduzem a formas de onda com oscilações, resultantes das capacidades parasitas do circuito e que devem ser adequadamente suprimidas. Sem isso, os semicondutores estão sujeitos a falhas e os níveis de ruído são maiores do que o necessário [80].

Na seção seguinte, são mencionadas as técnicas de projeto práticas dos *snubbers* usados no conversor *flyback* mencionado (destinadas a eliminar as oscilações) e que são normalmente utilizadas nos circuitos com os conversores *flyback*.

3.5.5 “Snubbers” para o conversor DC-DC

A figura 11, apresenta os *snubbers*: RC (a azul e em paralelo com o *mosfet*) e RCD (a verde e em paralelo com os primários dos dois transformadores) usados no conversor DC-DC. O RC é constituído pela resistência R1 e pelo condensador C3. O RCD é formado pela resistência R2, pelo condensador C2 e o diódo D2.

Inicialmente, montou-se o circuito do conversor DC-DC sem os *snubbers* RC e RCD aplicados.

Idealmente, o circuito tem características em termos de tensão de onda quadrada entre o dreno e a fonte, V_{DF} do *mosfet* ao ligar e desligar. Na prática, no entanto, quando se interrompe a corrente do primário, a indutância do transformador, causa um pico de tensão no dreno do *mosfet*.

Para se conseguirem ver os comportamentos da tensão V_{DF} , aplicou-se uma carga resistiva de 1 k Ω na saída do conversor e a entrada foi alimentada com 18 V. Para as medições seguintes foi utilizado o osciloscópio TEKTRONIC DPO 2014 Digital *Phosphor*, com uma largura de banda de 100 MHz em cada um dos seus canais.

A indutância oscila com as capacidades parasitas do circuito, produzindo uma oscilação de alta-frequência nas formas de onda. No primário do transformador, a indutância de fugas medida com equipamento adequado tem ressonância com as capacidades no primário.

Na figura 21 é mostrada a queda de tensão entre o dreno e a fonte *mosfet* de forma ampliada. São visíveis as oscilações na onda com uma frequência elevada na parte superior da onda.

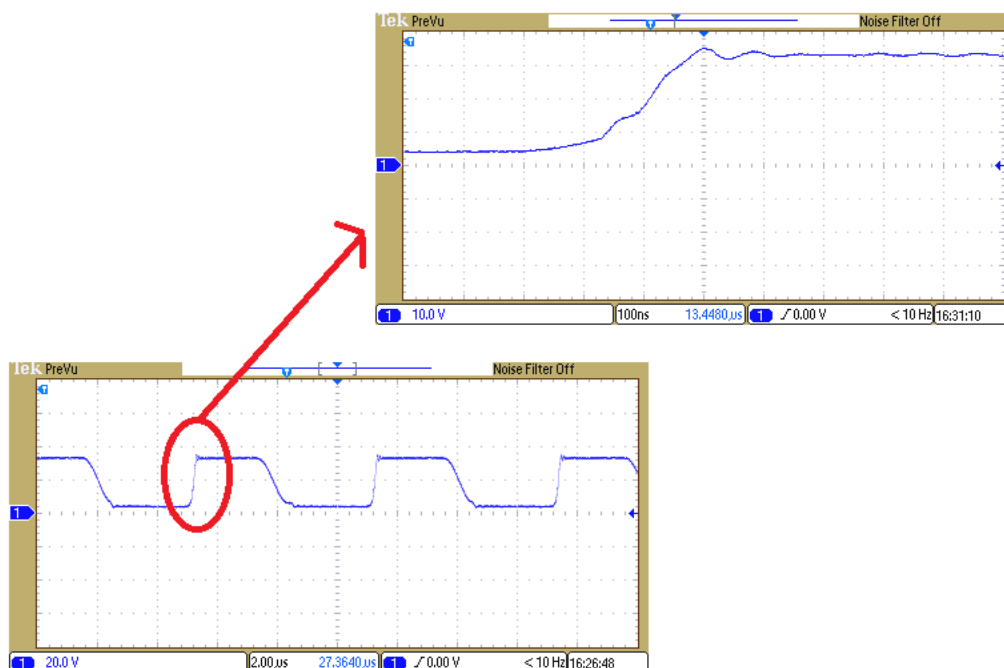


Figura 21 – Tensão no dreno do conversor DC-DC sem *snubbers*.

A figura 21 mostra uma tensão no dreno do *mosfet* do conversor DC-DC sem *snubbers*, tendo sido usada uma resistência de valor alto (1 k Ω). Caso este valor de resistência seja diminuído, o valor das oscilações de tensão vai aumentar, mas a frequência da oscilação vai-se manter constante.

Estas oscilações na tensão, se não são eliminadas, podem conduzir a dois problemas: em primeiro lugar, há uma tensão excessiva sobre o dreno do *mosfet* que pode levar a uma rutura por avalanche e eventualmente a falha do mesmo; em segundo lugar, a energia da oscilação vai ser libertada para o secundário do transformador indo para carga e nos componentes eletrónicos podendo levar a erros de lógica, devido ao ruído gerado.

No conversor DC-DC em questão isto não é aceitável, e para se resolverem estas oscilações são adicionados componentes ao circuito para amortecerem a oscilação utilizando um *snubber* RC e um RCD de corte para limitar a tensão. Em seguida são explicados os procedimentos para o projeto e dimensionamento dos *snubbers* usados no conversor DC-DC.

3.5.5.1 “Snubber” RC para o primário

O *snubber* RC fica melhor colocado ao lado do *mosfet* que está a ser protegido.

Para o correto dimensionamento do circuito *snubber* deve escolher-se criteriosamente a resistência para amortecer a ondulação, selecionar o condensador, tendo em atenção que a dissipação de potência na resistência não seja excessiva.

Para tal, o primeiro passo no projeto do circuito *snubber* consiste em medir a capacidade e/ou indutância de fugas que causam a oscilação observada. A capacidade é difícil de medir. É uma combinação das capacidades de junção não-lineares dos semicondutores, com a capacidade parasita do enrolamento primário do transformador, para além de outras capacidades parasitas, tais como nos dissipadores de calor.

A indutância de fugas do transformador (L) pode ser medida com um analisador de resposta de frequência, fazendo-se um curto-circuito no secundário do transformador *flyback*, sendo a impedância medida a partir do enrolamento primário.

Um método alternativo é com o uso de uma onda sinusoidal, com um pequeno valor de tensão U_1 e à frequência pretendida (gerador de sinal na entrada). A impedância na resistência deve ser muito menor que a impedância da parte indutiva, ou seja, que a resistência não provoca uma alteração muito significativa no circuito.

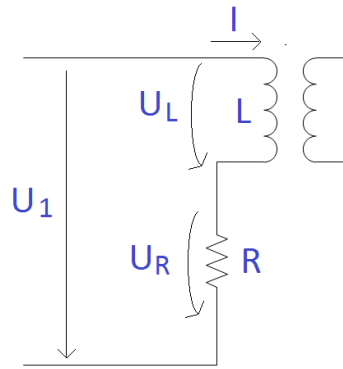
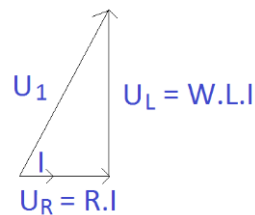


Figura 22 – Método para obtenção da indutância de fugas do primário.

Então medindo o U_L no osciloscópio e com o valor de R , pode estabelecer-se o I .

$$I = \frac{U_R}{R} . \quad (3.6)$$



$$\vec{U}_1 = \vec{U}_R + \vec{U}_L . \quad (3.7)$$

Figura 23 – Diagrama de tensões aplicadas ao transformador e a resistência auxiliar.

Com o valor de I calculado, o valor de U_L medido com o osciloscópio e o valor da frequência pretendida ($\omega = 2\pi f$) calcula-se o L pretendido do primário.

Este método poderá ser aplicado de forma análoga para a determinação da indutância de fugas no secundário, bem como o para o valor das indutâncias dum transformador flyback no primário e/ou secundário. A diferença é que no caso da determinação da indutância do primário, se deve deixar o enrolamento do secundário em circuito aberto, e no caso da determinação da indutância no secundário o primário deverá permanecer em circuito aberto.

O passo seguinte, consiste em medir a frequência da oscilação visível na forma de onda da figura 24, de forma a fazer-se o dimensionamento do *snubber* para eliminar-se a oscilação.

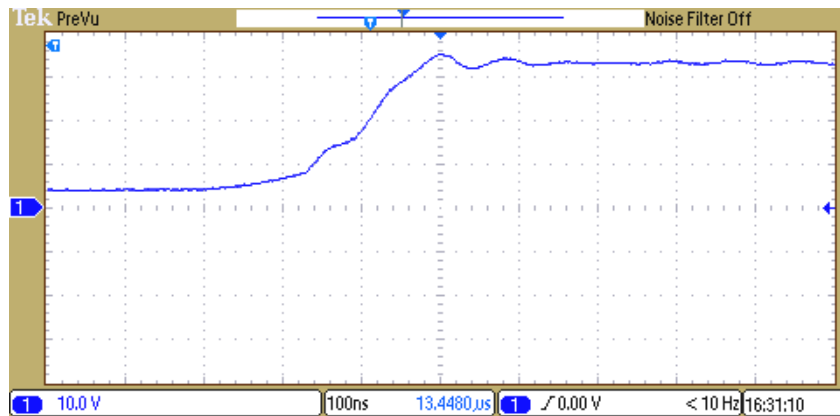


Figura 24 – Medição da frequência de oscilação da tensão V_{DF} .

Sendo $T_r=80$ ns, vem:

$$f_r = \frac{1}{T_r} = 12,5 \text{ MHz} \quad (3.8)$$

Como pode ser observado na figura 24, a ondulação no *mosfet* é assimétrica, devido à natureza não linear da capacidade de saída do *mosfet*, que diminui à medida que a tensão é aumentada. Para um bom projeto do *snubber*, esta frequência de ondulação deve ser pelo menos de duas ordens de magnitude maior do que a frequência de comutação, ou a dissipação térmica vai-se tornar excessiva. Como se pode observar a frequência de comutação é de cerca de 200 KHz e a de ondulação é de 12,5 MHz, valor muito maior que as duas vezes (62,5 vezes), o que demonstra estar-se perante um bom dimensionamento dos *snubbers*.

De seguida, calcula-se a resistência do circuito *snubber* e a capacidade a usar. A resistência, destina-se a amortecer a ondulação, logo é necessário calcular a impedância característica do circuito ressonante.

Sendo $f_r=12,5 \times 10^6$ Hz e $L=93 \times 10^{-9}$ H, a impedância é:

$$Z=2\pi f_r L. \quad (3.9)$$

Então,

$$Z=7,3 \, \Omega.$$

A ondulação é amortecida quando se usa uma resistência *snubber* igual à impedância do circuito ressonante. Portanto, toma-se $R=Z$, para se selecionar a resistência.

Valor comercial adotado: 6,8 Ω (5 W).

Com o condensador no *snubber* minimiza-se a dissipação à frequência de comutação, pois sendo o condensador uma impedância no circuito e não tendo este a dissipação que têm as cargas resistivas permite minimizar a dissipação do conjunto, enquanto a resistência leva a que o

amortecimento seja eficaz à frequência de ondulação. O melhor ponto de partida para projetar a impedância do condensador à frequência de ondulação é igual ao valor da resistência [81].

Ou seja:

$$R = X_c \Rightarrow C = \frac{1}{2\pi f_r R} . \quad (3.10)$$

Substituindo, vem:

$$C = 1,74 \text{ nF} .$$

Valor comercial adotado: 1,8 nF .

O cálculo da potência de perdas no *snubber*, dissipada na sua resistência cujo valor é determinado pelo valor do condensador *snubber*, pode ser calculada de forma aproximada por [81]:

$$P_{sn} = CV^2 f_s . \quad (3.11)$$

Considerando que a tensão entre o dreno e a fonte, em funcionamento normal é inferior a 100 V, a capacidade C de 1,8 nF e a frequência de comutação f_s de 200 KHz, a P_{sn} vem igual a 3,6 W.

No teste experimental feito ao *snubber*, este apresenta uma ondulação no dreno do *mosfet* no primário com o *snubber* no lugar, como se mostra na figura 25.

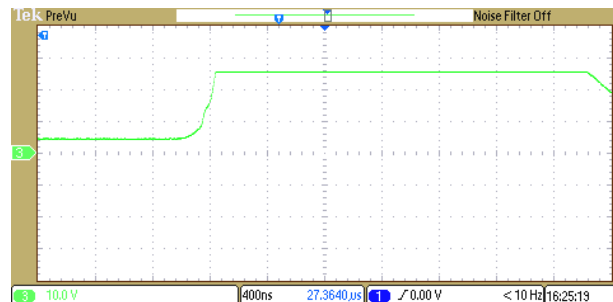


Figura 25 – Forma da onda de tensão no dreno do conversor *flyback* com o *snubber* RC.

Os resultados obtidos, evidenciam a eficácia do *snubber*, sendo a ondulação bastante amortecida, reduzindo assim as possíveis emissões eletromagnéticas.

Por vezes é difícil reduzir totalmente este pico de tensão e mais ainda usando apenas um simples *snubber* RC. Para se conseguir fixar esta tensão num valor ainda mais baixo de forma a impedir a falha do *mosfet* pode recorrer-se a um limitador RCD.

3.5.5.2 Limitador RCD aplicado no primário

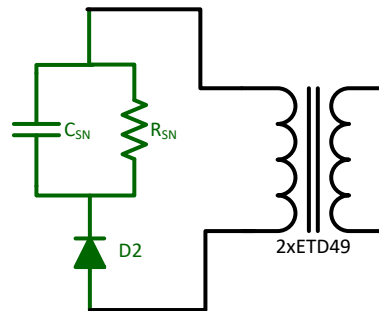


Figura 26 – Limitador RCD no primário do conversor *flyback*.

O limitador RCD funciona através da absorção da corrente de fuga da indutância uma vez que a tensão de dreno excede a tensão do condensador de fixação. O uso de um condensador com uma capacidade relativamente grande mantém a tensão constante ao longo do ciclo de comutação.

A resistência do limitador RCD dissipa energia, mesmo quando o conversor principal não está a fornecer energia na sua saída [82]. Mesmo com carga muito pequena no conversor, o condensador será sempre carregado até a tensão vista a partir do secundário do conversor, V_f . À medida que a carga aumenta, mais energia irá fluir para o condensador, e a tensão vai subir uma quantidade adicional, V_x , acima da tensão de onda quadrada ideal do *flyback*, como se mostra na figura 27.

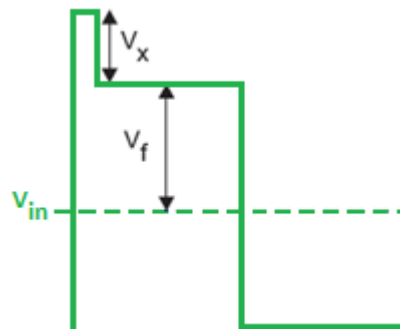


Figura 27 – Variação da tensão no condensador do limitador RCD no primário do conversor *flyback*.

O primeiro passo do projeto, tal como no projeto do *snubber* RC, é medir a indutância de fugas do transformador *flyback* para se projetar o *snubber* RCD, de forma semelhante a que foi apresentada no projeto *snubber* RC.

Para o limitador RCD, a preocupação centra-se na quantidade de energia armazenada na indutância de fuga, menos que no aumento do valor da fuga à frequência de ondulação uma vez que esta já é anulada pelo *snubber* RC, descrito anteriormente.

Nos projetos tradicionais, usa-se o valor da indutância de fugas, medida na frequência de comutação, em vez da frequência de ondulação. Para a frequência de comutação de 200 KHz o valor

da indutância de fugas medida é de 0,147 μH (foi usado o analisador de resposta em frequência BK PRECISION 889A e a metodologia descrita anteriormente).

A determinação da tensão de corte, para tal se deve decidir qual a tensão que pode ser tolerada pelo *mosfet* de potência (valor máximo dado pelo fabricante do *mosfet*), bem como calcular a potência que será dissipada no circuito limitador de sobretensão. A energia armazenada na indutância de fugas (L), com a corrente (I_p), à frequência de serviço (f_s) é dada por [83]:

$$P_l = \frac{1}{2} L I_p^2 f_s. \quad (3.12)$$

Assume-se que não existem capacidades parasitas para carregar, e que toda a energia armazenada na indutância de fugas é conduzida para o condensador *snubber*, sendo o valor do condensador suficientemente grande para ser capaz de receber a indutância de fugas à frequência de serviço. Tendo isto em consideração, a potência dissipada pelo limitador RCD pode ser expressa em termos da energia armazenada na indutância da seguinte forma [81]:

$$P_{sn}^{max} = P_l \left(1 + \frac{V_f}{V_x^{max}} \right). \quad (3.13)$$

Onde V_x^{max} é a tensão de avalanche V_{DS} do *mosfet*.

Sendo assim, quanto maior for a subida de tensão no limitador na comutação, menor é a dissipação total. No entanto, o seu valor de tensão está sempre condicionado ao limite máximo admissível pelo *mosfet* entre o dreno e a fonte (V_{DS}). Consultando a folha de características do *mosfet* IRFB4332PBF é possível ver que a V_{DF} tem valores de avalanche a partir de 250 V. Pode então afirmar-se que o valor de corte $V_x^{max} = 250 \text{ V}$.

O passo seguinte é a determinação do valor da resistência. Esta é o elemento crucial para se determinar a tensão de pico V_x , e deve ser calculada através [81]:

$$R = \frac{2V_x T_s (V_f + V_x^{max})}{L I_p^2}, \quad (3.14)$$

onde,

$$I_p = \frac{(V_{dc} - 1) T_{ON}}{L_p}. \quad (3.15)$$

Sendo T_{ON} o período de funcionamento do conversor DC-DC e V_{dc} a tensão na saída do conversor.

Quanto maior for o valor da resistência, mais tempo demora a descarga do condensador de corte, e a tensão vai assumir valores superiores. Por outro lado, uma resistência menor, tem uma

tensão de descarga menor, mas a corrente é maior. Sendo a potência proporcional ao quadrado da corrente, a potência aumenta nessa proporção do quadrado.

A indutância do primário do transformador (L_p) com a frequência de funcionamento (f_s) a 200 KHz é de 42,855 μ H (valor obtido com o analisador de resposta de frequência ou metodologia descrita anteriormente).

Para a frequência (f_s) de 200 kHz corresponde um período (T_s) de 5 μ S.

Devido às vantagens mencionadas anteriormente, pretende-se que o conversor DC-DC funcione no regime descontínuo, e de forma a garantir-se que não saí deste regime estipulou-se que o T_{on} não pode ultrapassar 48% de T_s ou seja $T_{on}=2,4 \mu$ s .

Usando a equação 3.15 e considerando que o conversor fornecerá tensão a um barramento de 24 V , V_{dc} (tensão na saída do conversor) é 24 V , e a corrente de pico, vem: $I_p=1,29$ A .

Sabe-se que $V_{in}=24$ V (valor da tensão de alimentação do conversor DC-DC), $V_x^{max}=250$ V (tensão máxima suportada pelo *mosfet* entre o dreno e a fonte – ver folha de características do fabricante) e considerando-se $V_x=50$ V , vem:

$$V_f = V_x^{max} - V_x - V_{in} = 176 \text{ V} . \quad (3.16)$$

Tem-se assim todos os valores necessários ao cálculo do valor da resistência:

$$R_{SN} = \frac{2V_x T_s (V_f + V_x^{max})}{L_p^2} = 876.33 \text{ k}\Omega . \quad (3.17)$$

Valor comercial adotado: 860 K Ω .

Relativamente a capacidade do condensador do *snubber*, esta deve ser suficientemente grande para manter uma tensão constante quando absorver a energia das fugas. Para além desta consideração, o seu valor não é crítico, e não irá afetar a tensão de pico quando o *snubber* está a funcionar corretamente. Pode ser usada a seguinte fórmula para o cálculo do seu valor mínimo, onde ΔV_{sn} deve estar entre 5 e 10% e n é a relação de transformação do transformador [84].

$$C_{sn} = \frac{V_{sn}}{\Delta V_{sn} R_{sn} f_s} = \frac{2,5nV_{dc}}{R_{sn} f_s \Delta V_{sn}} . \quad (3.18)$$

Sendo $n=0,75$, $V_{dc}=24$ V , $R_{SN}=876,33$ k Ω , $f_s=200$ KHz e $\Delta V_{SN}=5$ %, tem-se:

$$C_{sn}=1,03 \mu\text{F} .$$

Assim, o valor comercial adotado foi 75 μ F , maior que o valor mínimo calculado.

As perdas da resistência (do limitador RCD), podem ser calculadas por:

$$P_{sn} = \frac{(V_x + V_f)^2}{R_{SN}} \quad (3.19)$$

Como $V_x = 50 \text{ V}$, $V_f = 176 \text{ V}$ e $R_{SN} = 876,33 \text{ K}\Omega$, então: $P_{SN} = 58,28 \text{ mW}$

Após terminar este tempo, o circuito continua a oscilar, o que é uma das limitações do limitador RCD, devido ao uso do diodo 30CTH03 que é um componente não ideal. Deve-se ao seu tempo inverso de recuperação (36nS) que permite à corrente na indutância de fugas fluir na direção oposta no diodo, resultando numa ondulação na tensão. Este diodo é muito importante para o *snubber* RCD, tendo sido escolhido por ter uma resposta muito rápida para a tensão pretendida.

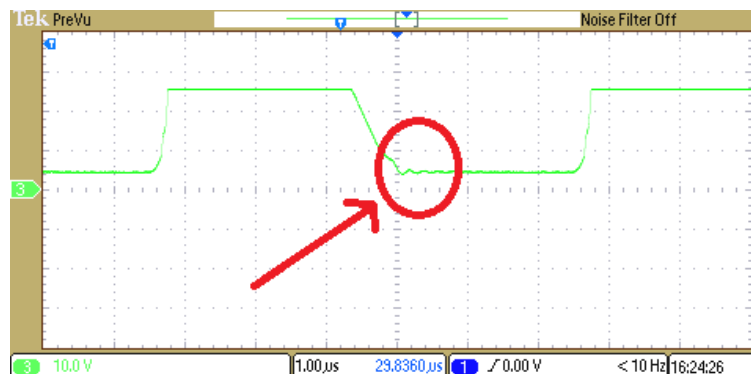


Figura 28 – Ondulação devida ao diodo 30CTH03.

Esta ondulação pode ser subsequentemente amortecida na saída (no secundário) com a introdução dum *snubber* RC, projetado como descrito anteriormente.

3.5.5.3 *Snubber* RC para o secundário

Os *snubbers* do lado do circuito primário protegem de forma eficaz a comutação do *mosfet*, e uma vez implementados levam a que as formas de onda vistas do lado do primário estejam perfeitas, mas outra fonte de ruído e esforço como a devida à corrente inversa de recuperação do diodo é muitas vezes desprezada.

Esta ondulação pode ser minimizada de um modo análogo ao que foi feito do lado primário, pois este pico de tensão não controlado pode levar a que o diodo fique sujeito a uma corrente de valor para além da sua zona de funcionamento, conduzindo a sua destruição.

A aplicação do *snubber* RC no secundário poderia ser colocado sobre o diodo (um paralelo ao diodo formado por uma resistência em série com um condensador).

O procedimento de projeto para o *snubber* RC secundário é semelhante ao do *snubber* RC primário. Fazendo os cálculos obtém-se: $R = 0,72 \Omega$; $C = 54,95 \text{ nF}$ e $P_{sn} = 9,5 \text{ W}$.

Perante o valor elevado da potência dissipada pelo *snubber* e uma vez que as oscilações observadas na transição para o bloqueio do diodo retificador são inferiores às características do componente escolhido, não havendo perigo de destruição ou mau funcionamento, optou-se pela não montagem de qualquer *snubber* no secundário. Até porque estando o circuito limpo no primário, não haveria certamente qualquer interferência eletromagnética significativa.

Os cálculos do *snubber* RC para o secundário, aqui efetuados serviram para mostrar, que nem sempre é vantajosa a implementação deste, sendo necessário efetuar um estudo caso a caso das vantagens e inconvenientes de forma a se decidir.

3.5.6 Dimensionamento do condensador usado na saída do conversor DC-DC

A variação da tensão no condensador (V_c) é dada por:

$$\Delta V_c = \frac{I_o (T_s - t_{off})}{C_o} \quad (3.20)$$

Onde C_o é a capacidade do condensador, I_o é o valor da corrente máxima na saída, T_s é o período de comutação e t_{off} é tempo de bloqueio (de forma a garantir-se o regime de funcionamento descontínuo, não deve ser inferior a 52%) [73].

Considerando-se $I_o = 2 \text{ A}$, $T_s = \frac{1}{200 \times 10^3} \text{ s}$, $t_{off} = 0.52 \times \frac{1}{200 \times 10^3} \text{ s}$ e $\Delta V_c = 5 \text{ mV}$, obteve-se para C_o o valor de $960 \text{ } \mu\text{F}$, tendo sido aplicados $2000 \text{ } \mu\text{F}$.

Concluído o dimensionamento do conversor, o passo seguinte consiste em testar experimentalmente o conversor DC-DC. Este será o tema abordado na seção seguinte.

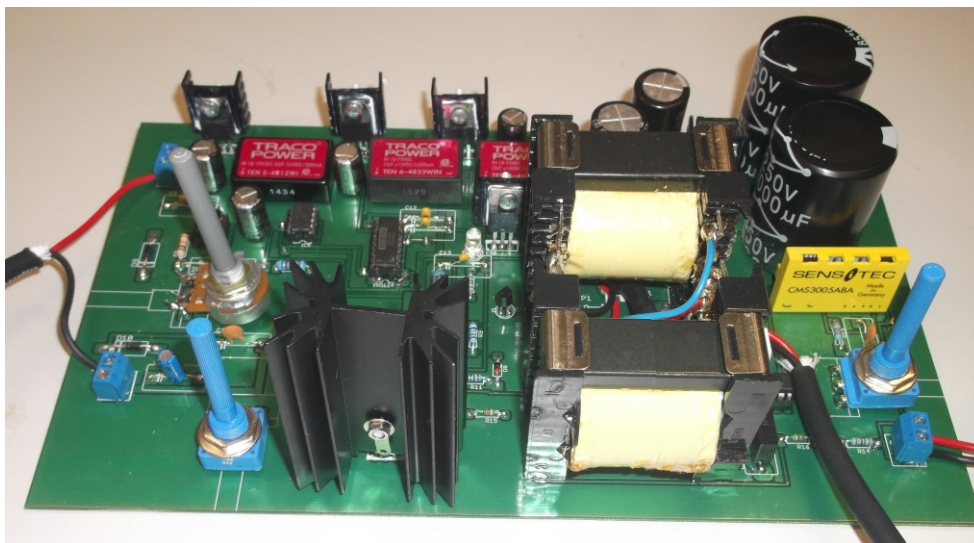


Figura 29 – Fotografia com o conversor flyback implementado.

3.5.7 Teste do conversor DC-DC num barramento DC

Após a fase de projeto e construção do conversor DC-DC, foi testado experimentalmente, conforme se mostra na figura 30. Este ensaio permite testar o funcionamento do conversor, com a sua saída ligada a um barramento DC.

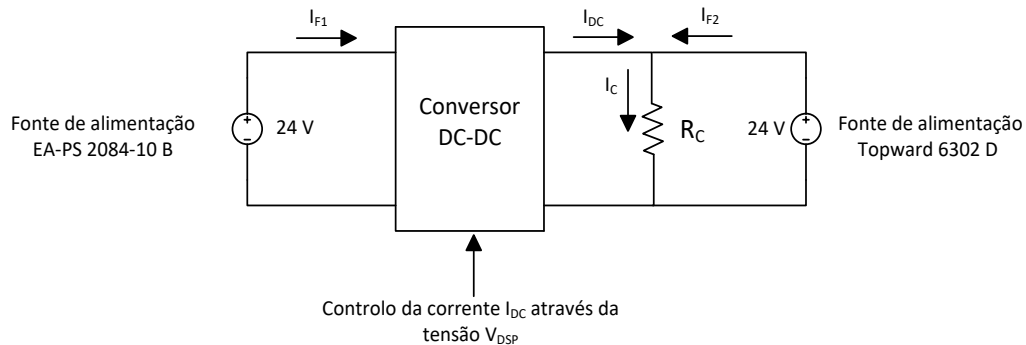


Figura 30 – Conversor DC-DC com a saída ligada a um barramento DC.

A entrada do conversor DC-DC está ligada uma fonte de alimentação EA-PS 2084-10B que o alimenta com 24 V (a tensão na entrada do conversor DC-DC pode variar entre 18 V e 75 V). A tensão DC aplicada na saída do conversor DC-DC é de 24 V, fixada pela fonte Topward 6302 D, como se mostra na figura 31. Neste barramento DC é aplicada uma carga resistiva de 16 Ω . Uma terceira fonte é ainda usada, a EA-PS 2084-10B que é responsável pelo fornecimento de uma tensão V_{DC} , que serve como base ao controlo da corrente I_{DC} que o conversor é capaz de fornecer na sua saída ficando disponível no barramento DC.

Aplicando diferentes tensões de controlo, foram obtidos os valores da tabela 3.

Tabela 3– Corrente na saída do conversor com diferentes valores de V_{DSP} .

Tensão de Controlo: V_{DSP} (V)	I_{F1} (A)	I_{F2} (A)	I_{DC} (A)	Rendimento do conversor DC-DC (%)
0	0,08	1,49	0	0
0,1	0,09	1,48	0,01	11,11
0,2	0,09	1,47	0,02	23,08
0,3	0,18	1,42	0,07	38,89
0,4	0,42	1,25	0,23	56,67
0,5	0,59	1,12	0,37	62,20
0,6	0,82	0,96	0,53	64,63
0,7	1,15	0,74	0,72	62,61
0,8	1,47	0,63	0,84	57,28
0,9	1,78	0,49	0,98	55,11
1	2,21	0,27	1,15	52,04

O conversor pode, assim, ser integrado num barramento DC, controlando a corrente que disponibiliza na sua saída através de um sinal de tensão. Este controlo de corrente é fundamental, pois permite que se possa fazer um despacho das energias renováveis quando associadas com armazenamento. O desempenho do conversor DC-DC pode ser calculado como a potência que têm na sua saída a dividir pela potência da entrada. A potência é o produto da tensão pela corrente. Sendo no conversor DC-DC a tensão de entrada aproximadamente igual a tensão de saída, pode dividir-se o valor

da corrente de saída pelo valor da corrente de entrada. Neste caso $\frac{I_c}{I_{F1}} \times 100\%$. O conversor DC-DC funciona entre 0 A e 1 A, mas tem um melhor desempenho entre os 50 e 70 % da carga (0,5 A a 0,7 A). Caso a carga seja outra o conversor DC-DC continua a funcionar, embora apresente desempenhos menores, como se pode observar na tabela 3.

Comparando o valor da tensão de controlo V_{DSP} (representa o valor desejado da corrente de carga) com o valor real da corrente medida I_{DC} , é possível observar-se uma maior aproximação dos valores entre os 0,4 V e 1 V de V_{DSP} , entre os 0,4 A e 1 A de I_{DC} , logo entre os 40 e 100 % da carga.

Na figura 31 pode-se ver que a tensão na entrada do conversor é mantida na ordem dos 24 V e a corrente na entrada tem a forma de dente de serra.

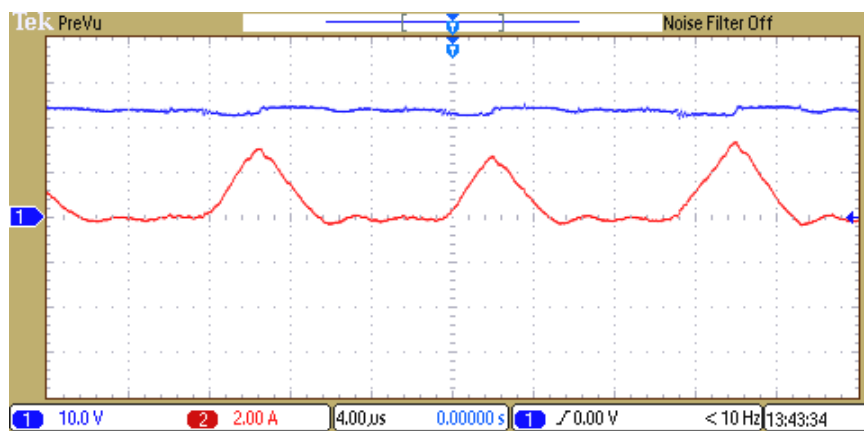


Figura 31 – Tensão e corrente na entrada do conversor.

Observando-se a saída de tensão e corrente mostradas na figura 32 e 33, pode concluir-se que o valor de tensão permanece muito estável, bem como a corrente fornecida para os diferentes valores requeridos: 0,5 A e 1 A.

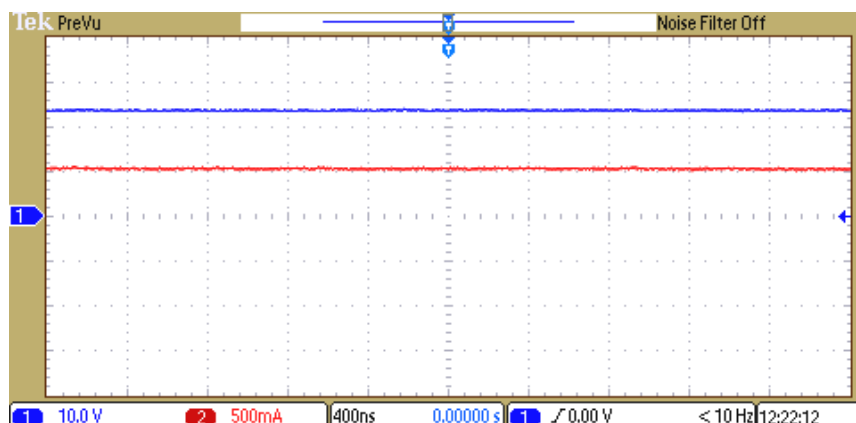


Figura 32 – Tensão e corrente requerida de 0,5 A na saída do conversor.

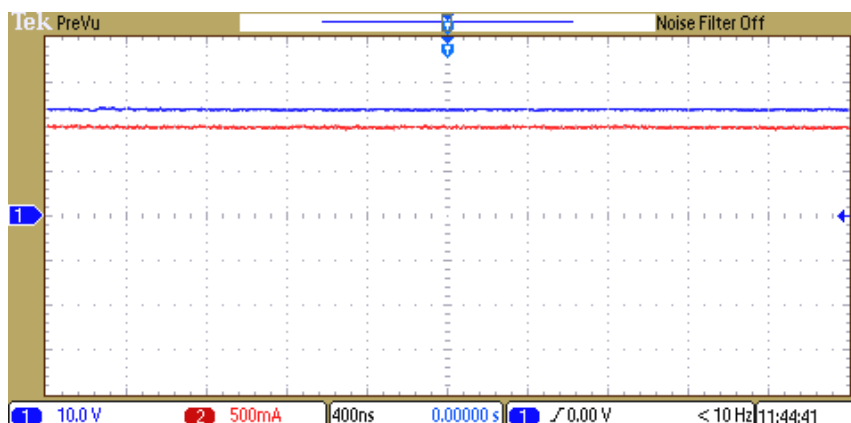


Figura 33 – Tensão e corrente requerida de 1 A na saída do conversor.

Com o *dSPACE* foi dada ordem ao conversor para fazer o arranque de 0 A até 1 A e foi registado o seu tempo de resposta. Na figura 34 pode observar-se que o conversor tem uma resposta imediata ao pedido de corrente.

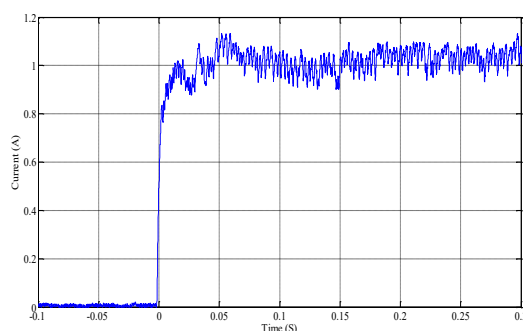


Figura 34 – Tempo de resposta para uma corrente requerida de 1 A.

Na figura 35 mostra-se o sinal de controlo PWM no pino de saída do 555 CN e o sinal de controlo aplicado entre a porta e a fonte do *mosfet* (V_{GS}). Estes têm a forma de onda semelhante, embora o valor de V_{GF} tenha uma tensão de valor ligeiramente inferior devido a perdas de tensão na interface entre o controlo e a alimentação. Observa-se também na figura 35 o valor da queda de tensão entre o dreno e a fonte (V_{DS}), que com uma tensão próxima de 0 V se encontra à condução e quando o sinal de controlo V_{GS} se encontra num nível de tensão alto. O V_{DS} está ao corte para um nível de tensão alto e quando o sinal de controlo V_{GF} está próximo de 0 V.



Figura 35 – PWM e tensões no *mosfet* (V_{GS} e V_{DS})

Terminada a fase da implementação, controlo e teste do conversor DC-DC, pode ser integrado num barramento DC. Aqui desempenha a função de permitir a gestão energética, ao ser possível controlar a corrente que tem na sua saída. Existe a oportunidade de serem integrados em sistemas onde há produção e armazenamento da energia, se procura adaptar a produção de energia às necessidades das cargas e aproveitar eventuais intercâmbios energéticos com a rede elétrica. Este é o ponto de partida para o assunto da próxima secção.

4. Sistema de energia com barramento DC

4.1 Introdução

Atualmente, para os consumidores que tenham produção de energia renovável (fotovoltaica ou eólica), começa a haver um incentivo ao uso de armazenamento por parte de consumidores de baixa tensão de modo a melhor ajustarem a produção ao consumo e assim aumenta a integração das energias renováveis no consumo de energia elétrica.

O recurso a elementos de armazenamento, apesar de um investimento adicional, resulta em benefícios económicos para os consumidores de baixa tensão, pelo melhor aproveitamento da produção para o seu consumo e resultando daí uma menor quantidade de energia comprada à rede. Além disso, poderão surgir oportunidades de negócio com a venda de serviços à rede que o uso de armazenamento pode proporcionar, com benefícios partilhados com a rede.

Uma vez que existem poucas soluções ou produtos no mercado orientados para este tipo de instalações consumidoras finais de baixa tensão, nasce aqui uma forte motivação de trabalho. Mas, surge a questão de como deve ser feito, todo este controlo de forma eficiente através de um modelo de gestão de fluxos capaz de gerir as diferentes fontes de produção, armazenamento, necessidades de cargas do consumidor e permitir a interligação com a rede elétrica AC.

Nas secções seguintes, é apresentado um modelo de gestão de fluxos para autoconsumo, com aplicação numa instalação elétrica de uma casa, embora o seu modelo de gestão de fluxos possa ser usado em qualquer instalação consumidora de energia de baixa tensão.

4.2 Descrição do sistema de energia DC

Pretende-se que o sistema, como o apresentado na figura 36, seja modular, podendo o consumidor optar pela aquisição de diferentes módulos consoante as suas necessidades de energia e do grau de autonomia.

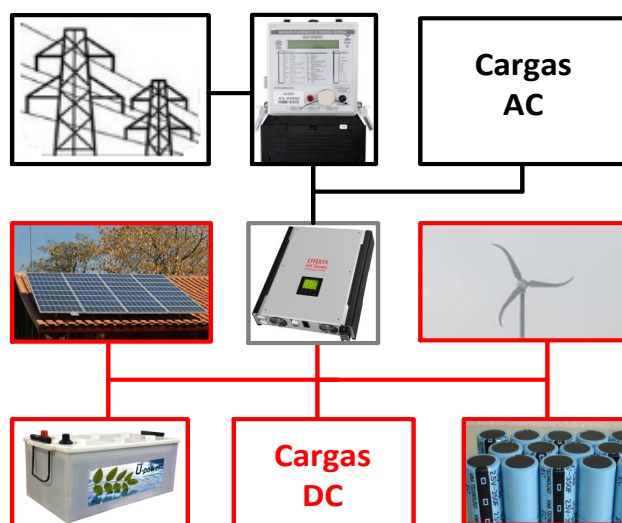


Figura 36 – Sistema de energia DC para consumidores de baixa tensão

O sistema poderá ser implementado com base na fonte de energia primária renovável mais abundante na Terra, a solar e a energia proveniente da força do vento. A energia produzida pelos painéis fotovoltaicos ou pela(s) turbina(s) eólica(s) será gerida por sistemas reguladores, podendo ser fornecida à carga DC, armazenada em baterias de acumuladores e/ou convertida por um conversor DC-AC para alimentar uma carga AC ou para fornecer a rede elétrica pública.

O armazenamento pode ser feito em baterias, mas tendo em consideração ser limitado o número de cargas/descargas que estas suportam e ao tempo de vida esperado. Também se recorre a um módulo de supercondensadores, que suportam melhor as variações nas correntes.

Os supercondensadores permitem neste sistema o carregamento / descarregamento rápido de eventuais veículos elétricos, bem como, otimizar o tempo de vida das baterias. Combina-se assim a alta capacidade de armazenamento energético das baterias, com a alta densidade de potência dos supercondensadores, resultando em alta eficiência, alta performance, baixo espaço e um sistema leve [85].

Cada conversor DC-DC é controlado para funcionar de forma cooperativa com os outros conversores e com o conversor bidirecional (AC-DC), de modo a fazerem a gestão da energia, tendo o sistema de energia a capacidade para aceitar solicitações das cargas (em DC ou AC), incluindo a possibilidade de ligação dos veículos elétricos. Estes tanto podem ser ligados ao barramento AC, como ao barramento DC, mas neste último caso o sistema em carregamento DC direto tem de estar adaptado.

Na figura 37 apresenta-se um sistema de energia para autoconsumo em DC e AC, e formado por sete módulos (seis conversores DC-DC e um inversor bidirecional), dois conversores DC-DC responsáveis pela produção de energia (solar e/ou eólica), quatro conversores DC-DC pelo armazenamento de energia (baterias e supercondensadores) e um conversor AC-DC bidirecional, que permita a conversão da corrente contínua em alternada e vice-versa, bem como, a estabilização do nível de tensão a fornecer à rede DC e às cargas.

O conversor bidirecional AC-DC é responsável por manter os 24 V no barramento DC. Caso seja verificada uma possibilidade de descida da tensão no barramento DC, este vai funcionar retirando a energia da parte AC para a DC. Se houver uma possibilidade de subida no barramento DC este conduz a energia de DC para AC. Os conversores DC-DC irão ter a função de permitir controlar a corrente na sua saída e deste modo controlar os fluxos de corrente no barramento DC.

Na entrada do conversor bidirecional AC-DC é aplicado um autotransformador com a função de permitir passar dos 230/400 V da rede AC, para uma tensão inferior que é disponibilizada na entrada do inversor. Tem também a função inversa de elevar a tensão disponibilizada na entrada do inversor para os 230/400 V da rede AC.

As duas fontes renováveis de energia poderão ser simuladas com recurso a duas fontes laboratoriais POWER SUPPLY EA-PS 2084-10B, de forma a se poder simular com as condições climáticas desejadas.

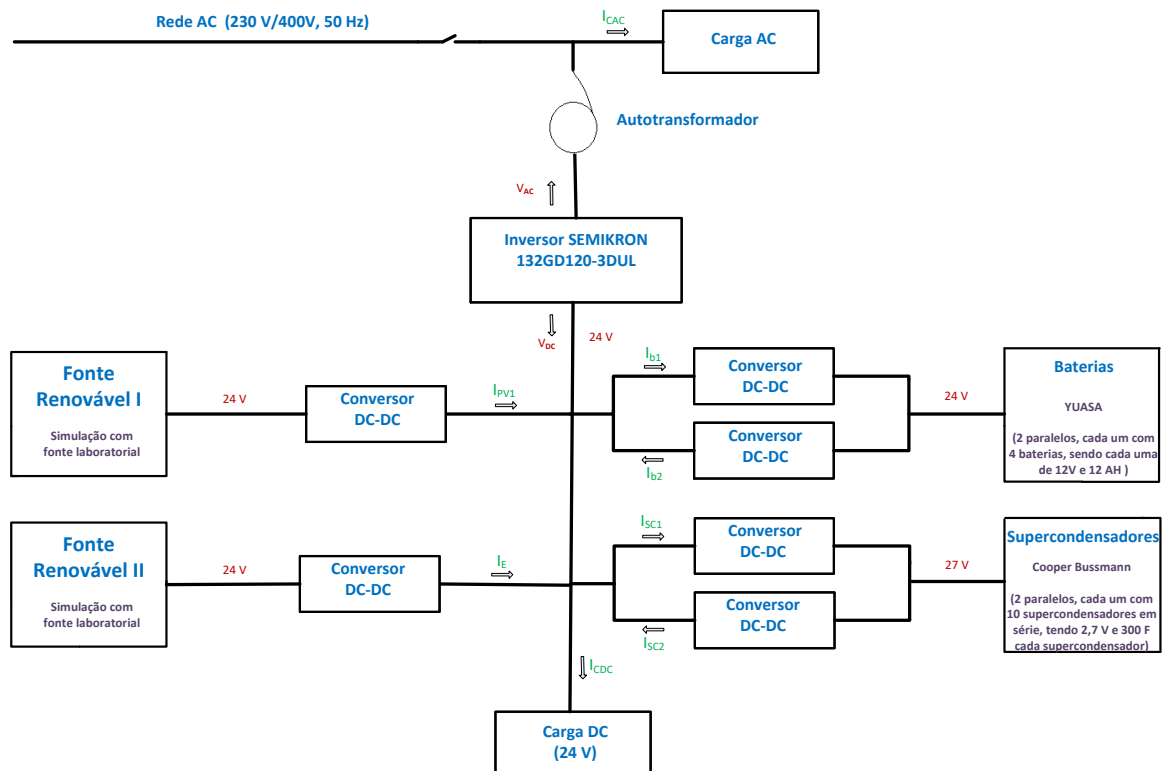


Figura 37 – Sistema de energia para autoconsumo em DC e AC.

Os despachos de energia que flui no barramento DC depende de diversos parâmetros:

- da produção de energia e da sua previsão;
- das necessidades de carga do consumidor e da sua previsão;
- do estado de carga das baterias e outros elementos de armazenamento;
- da interação com a rede fornecendo serviços de rede;
- dos custos da energia.

São ainda condições para o algoritmo, ser capaz de aceitar pedidos do gestor da rede, quer no sentido da diminuição de potência pedida à rede, bem como no aumento de potência. A diminuição de potência pedida à rede pode ser de duas formas libertando carga (deslastres) ou/e fornecendo energia armazenada nos elementos de armazenamento. O aumento de potência é conseguido ligando-se cargas e/ou armazenando energia nos elementos de armazenamento (baterias e supercondensadores).

Não havendo pedidos por parte do gestor da rede deve atender às previsões de produção (condições climáticas), de consumo e estado de carga dos elementos de armazenamento de energia. Com base na informação descrita anteriormente o modelo de gestão deve fazer uma gestão energética o mais otimizada possível evitando trocas com a rede a menos daquelas que resultem vantagens económicas, comprar a custo reduzido ou vender a preço alto em socorro da rede.

A figura 38 apresenta o fluxograma do algoritmo de gestão de fluxos de energia destinado a um consumidor de baixa tensão, com produção associado a armazenamento e na perspectiva de prestar serviços de rede.

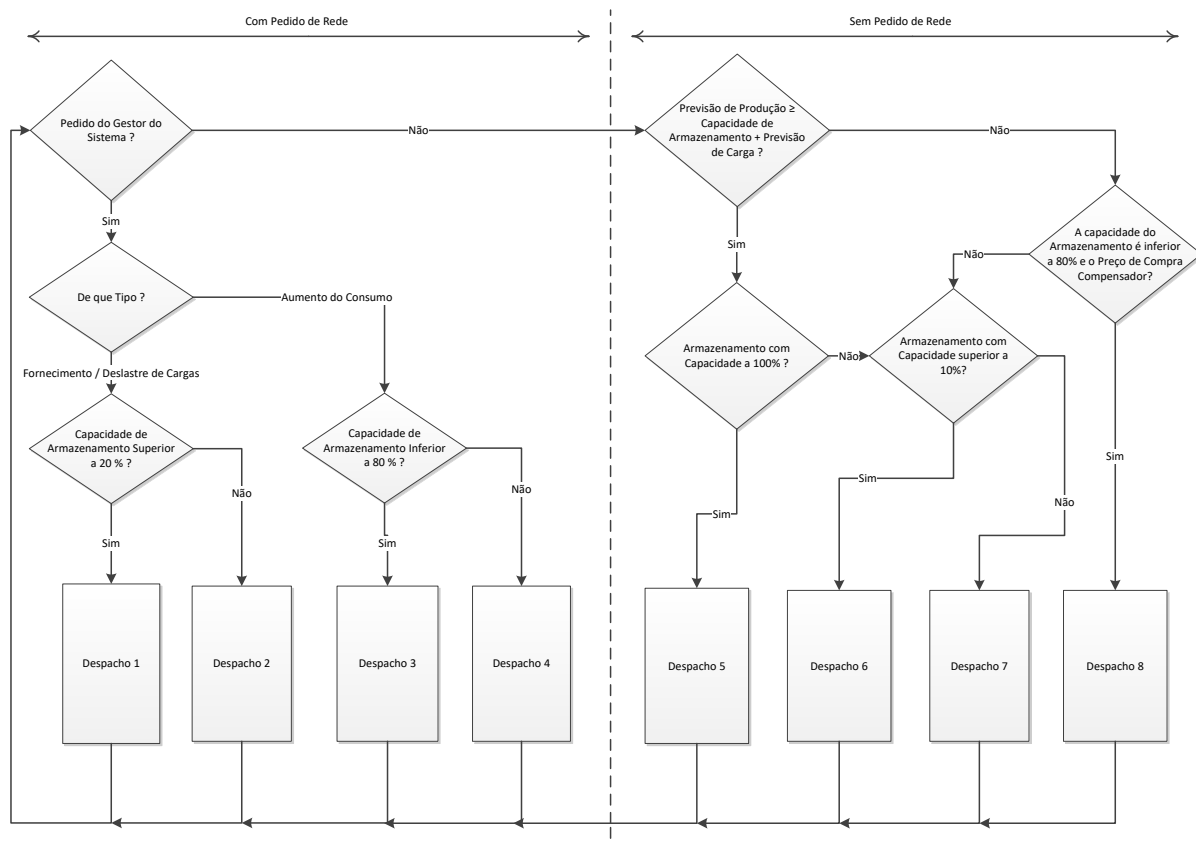


Figura 38 – Algoritmo de gestão energética do sistema.

4.3 Descrição funcional do algoritmo de gestão energética do sistema

O algoritmo inicia-se com a verificação da existência do pedido do gestor do sistema para diminuição ou aumento de potência pedida à rede. Em caso de diminuição de potência vai testar se a capacidade de armazenamento é superior a 20%. Se sim, fornece energia à rede elétrica pública e/ou alimenta as cargas internas utilizando a produção renovável ou energia do armazenamento. Usa-se primeiro os supercondensadores e se estes não derem a energia suficiente, usam-se as baterias (Despacho 1).

Se armazenamento é inferior ou igual a 20%, deslastra as cargas que não sejam críticas, fornece energia às restantes cargas a partir da produção renovável e se esta não for suficiente, do armazenamento. Só no caso da produção não ser suficiente e esgotado o armazenamento é que é permitido o uso de energia da rede elétrica pública. De forma a garantir-se uma certa capacidade de “UPS” (só enquanto o armazenamento estiver com capacidade igual ou inferior a 20%), se houver produção renovável suficiente, carregar primeiro os supercondensadores. Atingida a capacidade dos supercondensadores carregam-se as baterias (Despacho 2)

Se houver um pedido da rede para aumento de potência, vai ser verificada se a capacidade de armazenamento é inferior a 80%. Se sim, dá ordem para consumir toda a produção ou armazenar a

partir da produção renovável não usada nas cargas e da rede elétrica pública. Não faz injeção na rede e se possível usa a energia da rede para consumo ou/e para consumo e armazenamento (Despacho 3).

Se o armazenamento for superior a 80%, fornece energia às cargas internas a partir da eventual produção renovável e/ou da rede elétrica pública. A restante produção renovável, não usada nas cargas, é usada no carregamento dos supercondensadores e das baterias se ainda não estiver esgotada a capacidade de armazenamento. São ligadas também as cargas de armazenamento se as houver, como veículo elétrico, aquecimento de água (Despacho 4).

Caso não haja pedido da rede, é verificado se a previsão de produção é maior ou igual que a soma da capacidade de armazenamento com a previsão de carga. Se sim, é testado se o armazenamento está a 100% (cheio). Em caso positivo fornece energia da produção renovável às cargas internas. Se sobrar, ligar as cargas com armazenamento (veículo elétrico e aquecimento de água). Caso ainda haja excedente de energia é vendida à rede pública (Despacho 5).

Senão, se o armazenamento está com uma capacidade superior a 20%, fornece energia da produção renovável às cargas internas e se a energia não for suficiente recorre ao armazenamento. Se houver produção renovável suficiente carregar primeiro os supercondensadores. Atingida a capacidade máxima dos supercondensadores carregar as baterias (Despacho 6).

Caso o armazenamento tenha uma capacidade inferior ou igual à rede pública energia a 20%, compra-se da energia à rede pública para o fornecimento às cargas da instalação elétrica e são deslastradas as cargas não críticas (Despacho 7).

Não havendo pedido do gestor do sistema e previsão de produção for maior ou igual que a soma da capacidade de armazenamento com a previsão de carga, é verificado se a capacidade de armazenamento é inferior a 80% e se o preço de compra tem um valor inferior ao previamente definido como compensador. Em caso afirmativo, a partir da rede elétrica pública e da eventual produção renovável, carrega os supercondensadores e as baterias, são ligadas as cargas de armazenamento (Despacho 8). Em caso negativo testa se o armazenamento está com capacidade superior a 20%. Se sim faz o Despacho 6 (já descrito), senão faz o Despacho 7 (já descrito).

4.4 Validação do algoritmo de gestão energética do sistema

Para validação funcional do algoritmo de gestão energética, foi criada uma folha de cálculo (figura 39) que simula o comportamento para as diferentes situações de despacho de energia.

Dados_Consumo_VivendaPequena - Junho 2016v16 - Microsoft Excel (A Ativação do Produto Falhou)

Ficheiro

Base

Inserir

Esquema de Página

Fórmulas

Dados

Rever

Ver

W40

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1		Armazenamento Inicial	Definição da Capacidade de Armazenamento																				
2		em %:	50	em Wh:	10000																		
3																							
4	Tempo h:m	Pedido Gest. Despach	1ª Semana	Energia Consumida	Produção	Rede	Qt? (W	Transf	armazenamento	Desl	Lugar Cargas?	PP	CAD	PC	PP 2 CA-PC	Preço Compr	Preço Compra	Custo /	Sem Sist	Sem Siste			
5		da Rede?	Período	Wh	Wh	Wh	Arm Wh		50 Cargas	Carro + Cg	Bat Sup	wh/dia	wh/dia	wh/dia	Tempo Real	Compensador		Rentabil	em Proc Com Prod	Prod - A			
6	00:15 Sem Pedido	6	24-01-2016 00:15	33	0	0	180	-36,3	49,637	Não	0	0	11762	5036,3	7000	Não	0,12	Não	0	-0,00396	-0,00396		
7	00:30 Sem Pedido	6	24-01-2016 00:30	26	0	0	220	-28,6	49,351	Não	0	0	11762	5064,9	7000	Não	0,12	Não	0	-0,00312	-0,00312		
8	00:45 Sem Pedido	8	24-01-2016 00:45	333	0	0	100	-366,3	45,688	Não	0	0	11762	5431,2	7000	Não	0,08	Sim	0	-0,02664	-0,02664		
9	01:00 Sem Pedido	8	24-01-2016 01:00	143	0	0	-1145	50	50,398	Não	500	500	11762	4981,2	7000	Não	0,08	Sim	-0,09144	-0,01144	-0,01144		
10	01:15 Sem Pedido	6	24-01-2016 01:15	23	0	0	-1023	30	54,688	Não	500	500	11762	4531,2	7000	Sim	0,08	Sim	-0,08184	-0,00184	-0,00184		
11	01:30 Sem Pedido	6	24-01-2016 01:30	20	0	0	10	-22	54,468	Não	0	0	11762	4553,2	7000	Sim	0,08	Sim	0	-0,0016	-0,0016		
12	01:45 Sem Pedido	6	24-01-2016 01:45	21	0	0	10	-23,1	54,237	Não	0	0	11762	4576,3	7000	Sim	0,08	Sim	0	-0,00168	-0,00168		
13	02:00 Sem Pedido	6	24-01-2016 02:00	10	0	0	10	-11	54,127	Não	0	0	11762	4587,3	7000	Sim	0,08	Sim	0	-0,0008	-0,0008		
14	02:15 Sem Pedido	6	24-01-2016 02:15	8	0	0	50	-8,8	54,039	Não	0	0	11762	4596,1	7000	Sim	0,08	Sim	0	-0,00064	-0,00064		
15	02:30 Sem Pedido	6	24-01-2016 02:30	8	0	0	33	-8,8	53,951	Não	0	0	11762	4604,9	7000	Sim	0,08	Sim	0	-0,00064	-0,00064		
16	02:45 Sem Pedido	6	24-01-2016 02:45	8	0	0	85	-8,8	53,863	Não	0	0	11762	4613,7	7000	Sim	0,08	Sim	0	-0,00064	-0,00064		
17	03:00 Sem Pedido	6	24-01-2016 03:00	8	0	0	200	-8,8	53,775	Não	0	0	11762	4622,5	7000	Sim	0,08	Sim	0	-0,00064	-0,00064		
18	03:15 Sem Pedido	6	24-01-2016 03:15	8	0	0	50	-8,8	53,687	Não	0	0	11762	4631,3	7000	Sim	0,1	Não	0	-0,0008	-0,0008		
19	03:30 Sem Pedido	6	24-01-2016 03:30	7	0	0	50	-7,7	53,61	Não	0	0	11762	4639	7000	Sim	0,08	Sim	0	-0,00056	-0,00056		
20	03:45 Sem Pedido	6	24-01-2016 03:45	6	0	0	50	-6,6	53,544	Não	0	0	11762	4645,6	7000	Sim	0,1	Não	0	-0,0006	-0,0006		
21	04:00 Sem Pedido	6	24-01-2016 04:00	6	0	0	50	-6,6	53,478	Não	0	0	11762	4652,2	7000	Sim	0,1	Não	0	-0,0006	-0,0006		
22	04:15 Sem Pedido	6	24-01-2016 04:15	6	0	0	50	-6,6	53,412	Não	0	0	11762	4658,8	7000	Sim	0,1	Não	0	-0,0006	-0,0006		
23	04:30 Sem Pedido	6	24-01-2016 04:30	6	0	0	50	-6,6	53,346	Não	0	0	11762	4665,4	7000	Sim	0,1	Não	0	-0,0006	-0,0006		
24	04:45 Sem Pedido	6	24-01-2016 04:45	6	0	0	50	-6,6	53,28	Não	0	0	11762	4672	7000	Sim	0,1	Não	0	-0,0006	-0,0006		
25	05:00 Sem Pedido	6	24-01-2016 05:00	6	0	0	50	-6,6	53,214	Não	0	0	11762	4678,6	7000	Sim	0,1	Não	0	-0,0006	-0,0006		
26	05:15 Sem Pedido	6	24-01-2016 05:15	6	0	0	50	-6,6	53,148	Não	0	0	11762	4685,2	7000	Sim	0,1	Não	0	-0,0006	-0,0006		
27	05:30 Sem Pedido	6	24-01-2016 05:30	6	0	0	50	-6,6	53,082	Não	0	0	11762	4691,8	7000	Sim	0,1	Não	0	-0,0006	-0,0006		
28	05:45 Sem Pedido	6	24-01-2016 05:45	6	0	0	75	-6,6	53,016	Não	0	0	11762	4698,4	7000	Sim	0,1	Não	0	-0,0006	-0,0006		
29	06:00 Sem Pedido	6	24-01-2016 06:00	11	0	0	75	-12,1	52,895	Não	0	0	11762	4710,5	7000	Sim	0,1	Não	0	-0,0011	-0,0011		
30	06:15 Sem Pedido	6	24-01-2016 06:15	20	0	0	75	-22	52,675	Não	0	0	11762	4732,5	7000	Sim	0,1	Não	0	-0,002	-0,002		
31	06:30 Sem Pedido	6	24-01-2016 06:30	20	0	0	80	-22	52,455	Não	0	0	11762	4754,5	7000	Sim	0,1	Não	0	-0,002	-0,002		
32	06:45 Sem Pedido	6	24-01-2016 06:45	18	0	0	50	-19,8	52,257	Não	0	0	11762	4774,3	7000	Não	0,1	Não	0	-0,0018	-0,0018		
33	07:00 Sem Pedido	6	24-01-2016 07:00	18	0	0	50	-19,8	52,059	Não	0	0	11762	4794,1	7000	Não	0,1	Não	0	-0,0018	-0,0018		
34	07:15 Sem Pedido	6	24-01-2016 07:15	18	0	0	25	-19,8	51,861	Não	0	0	11762	4813,9	7000	Não	0,12	Não	0	-0,00216	-0,00216		
35	07:30 Sem Pedido	6	24-01-2016 07:30	17	0	0	75	-18,7	51,674	Não	0	0	11762	4832,6	7000	Não	0,12	Não	0	-0,00204	-0,00204		
36	07:45 Sem Pedido	6	24-01-2016 07:45	18	0	0	50	-19,8	51,476	Não	0	0	11762	4852,4	7000	Não	0,12	Não	0	-0,00216	-0,00216		
37	08:00 Sem Pedido	6	24-01-2016 08:00	18	0	0	10	-19,8	51,278	Não	0	0	11762	4872,2	7000	Não	0,12	Não	0	-0,00216	-0,00216		
38	08:15 Sem Pedido	6	24-01-2016 08:15	28	8	0	10	-22	51,058	Não	0	0	11762	4894,2	7000	Não	0,12	Não	0	-0,00336	-0,00336		
39	08:30 Sem Pedido	6	24-01-2016 08:30	29	30	0	25	0,9	51,067	Não	0	0	11761	4893,3	7000	Não	0,16	Não	0	-0,00464	-0,00464		
40	08:45 Sem Pedido	6	24-01-2016 08:45	28	130	0	25	91,8	51,985	Não	0	0	11765	4801,5	7000	Não	0,16	Não	0	-0,00448	-0,00448		

H < > 1

simulação 1

Gráficos s1

simulação 2

Gráficos s2

simulação 1 - Px0,5

Gráficos s1 - Px0,5

simulação 1 + Ax2

Gráficos s1 - Ax2

simulação 2 - Ax2

Gráficos s2 - Ax2

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

35

36

37

38

39

40

Pronto

80%

Figura 39 – Folha de cálculo do algoritmo de gestão energética.

Foram usados consumos de eletricidade reais de uma pequena vivenda situada na cidade de Coimbra, com exemplo de carga de um consumo residencial. Estes foram monitorados durante duas semanas (24-1-2016 a 30-1-2016 e de 31-1-2016 a 7-2-2016) tendo sido os valores adquiridos em períodos de 15 minutos em 15 minutos.

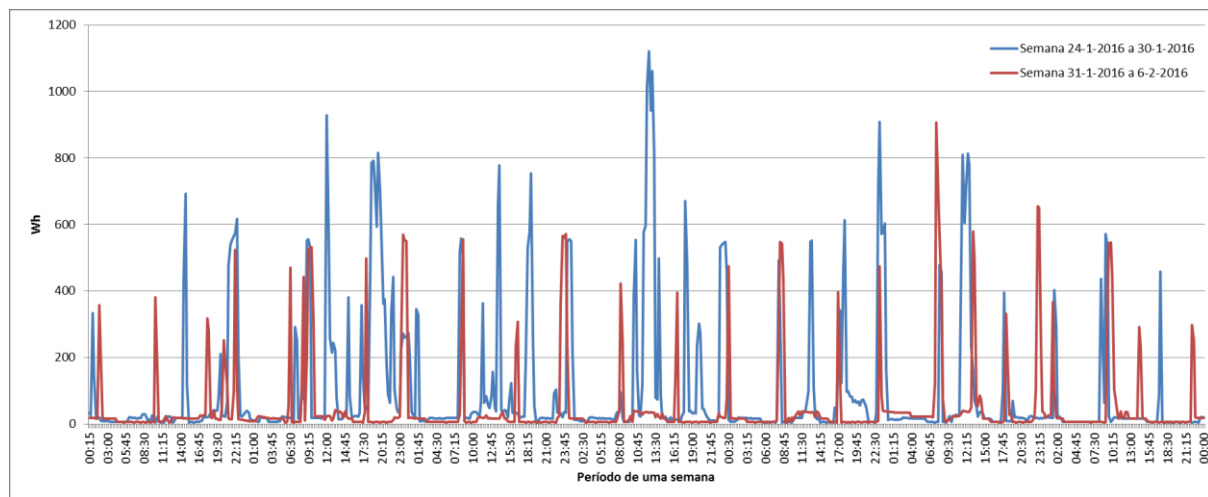


Figura 40 – Consumo de eletricidade na residência durante o período de duas semanas.

O diagrama de carga do período de uma semana de 24-1-2016 a 30-1-2016 corresponde a um consumo de 68,6 kWh (DC1), e o da semana de 31-1-2016 a 7-2-2016 corresponde a 35,2 kWh (DC2).

Para a produção de energia renovável foram usadas previsões também em períodos de 15 minutos em 15 minutos (somatório das 24 horas seguintes).

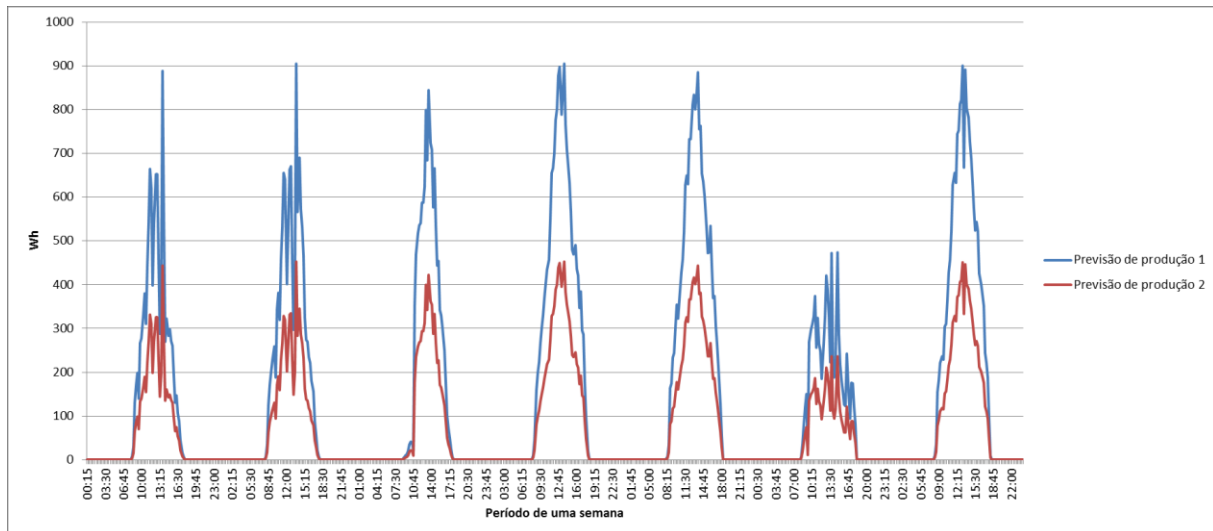


Figura 41 – Previsões de produção para o período de uma semana.

A produção correspondente ao período 1 é igual a 103,5 kWh (DP1) e a do período 2 a 51,8 kWh (DP2).

Na folha de cálculo é possível monitorar o valor e a capacidade de armazenamento a partir do armazenamento inicial em percentagem da capacidade instalada, tendo em conta as perdas no armazenamento por carga e descarga. Foram usados na simulação dois valores de capacidade de armazenamento de 10 kWh (CA1) e de 20 kWh (CA2).

No que respeita ao preço de venda à rede elétrica pública, considerou-se como ponto de partida, a situação normal de autoconsumo, ou seja 90% do custo médio praticado no mercado de energia, que ronda os 50 euros por MWh. Para a simulação usou-se o valor de 5 centimos por kWh injetado na rede elétrica pública. O sistema de gestão procura minimizar as injeções de energia na rede elétrica pública, maximizando a utilização da energia da produção instalada para uso nas cargas do consumidor, alimentando diretamente a partir da produção e gerindo especificamente o armazenamento instalado.

O preço de compra em tempo real foi considerado o valor de venda de energia ao consumidor final em função do contrato de venda que o consumidor final tenha que pode ser em função da hora do dia. Atualmente é usada a tarifa bi-horária ou tri-horária, mas num futuro próximo poderão aparecer tarifas em tempo real, cujos preços poderão variar de hora a hora em função das condições do mercado.

Para qualquer uma das situações seguintes, vão ser usados os valores da tabela 4.

Tabela 4– Preços de compra e de venda da energia elétrica.

Descrição da situação:	Valor em euros:
Preço de compra abaixo do qual o consumidor considera compensador.	0,10 (definido pelo consumidor)
Preço de venda à rede elétrica pública.	0,05 (contrato com a rede)
Preço de venda da energia em auxílio à rede elétrica pública.	0,25 (contrato com a rede)
Preço de compra da energia em auxílio à rede elétrica pública.	0,01 (contrato com a rede)
Preço de compra em tempo real.	(valor de venda ao consumidor)

Relativamente ao valor do armazenamento inicial em percentagem é usado o valor inicial de 50% e para as perdas no armazenamento de 10% na carga e 10% na descarga.

Para o teste de funcionalidade do algoritmo de gestão energética do sistema, foram criados cinco cenários, sendo caracterizados conforme se mostra na tabela 5.

Tabela 5– Caracterização dos Cenários usados no teste de funcionalidade.

	Diagrama de carga	Diagrama de Produção	Capacidade de Armazenamento:
Cenário A	DC1	DP1	CA1
Cenário B	DC2	DP1	CA1
Cenário C	DC1	DP2	CA1
Cenário D	DC1	DP1	CA2
Cenário E	DC2	DP1	CA2

São usados 66 pedidos de rede em cada um dos cenários. Destes, 37 pedidos são de diminuição de potência, aos quais o modelo de gestão de fluxos vai responder com o despacho 1 ou com o despacho 2 e 29 pedidos são de aumento de potência sendo executados o despacho 3 ou o despacho 4. Em termos de aplicação dos despachos, a soma do despacho 1 com o despacho 2 corresponde 5,5% do tempo total e da soma do despacho 3 com o 4 corresponde a 4,3%. Sendo assim, para os pedidos dos serviços de rede (despacho 1 a 4) dá um total de 9,8%. Nos restantes 90,2% do tempo, foram executados os despachos 5 a 8.

Cenário A:

Refere-se à semana de 24-1-2016 até 30-1-2016, sendo o consumo energético total de 68,6 kWh, a produção total das renováveis é 103,5 kWh, com uma capacidade total de armazenamento de 10,0 kWh. Obtém-se então:

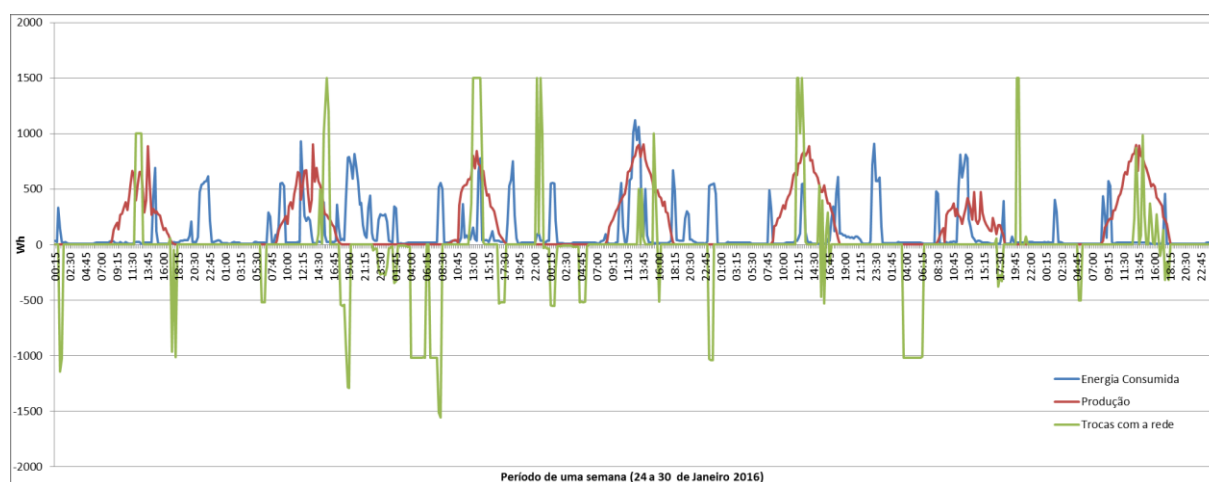


Figura 42 – Para o cenário A: Mostra a Energia Consumida, Produção e Trocas com a rede.

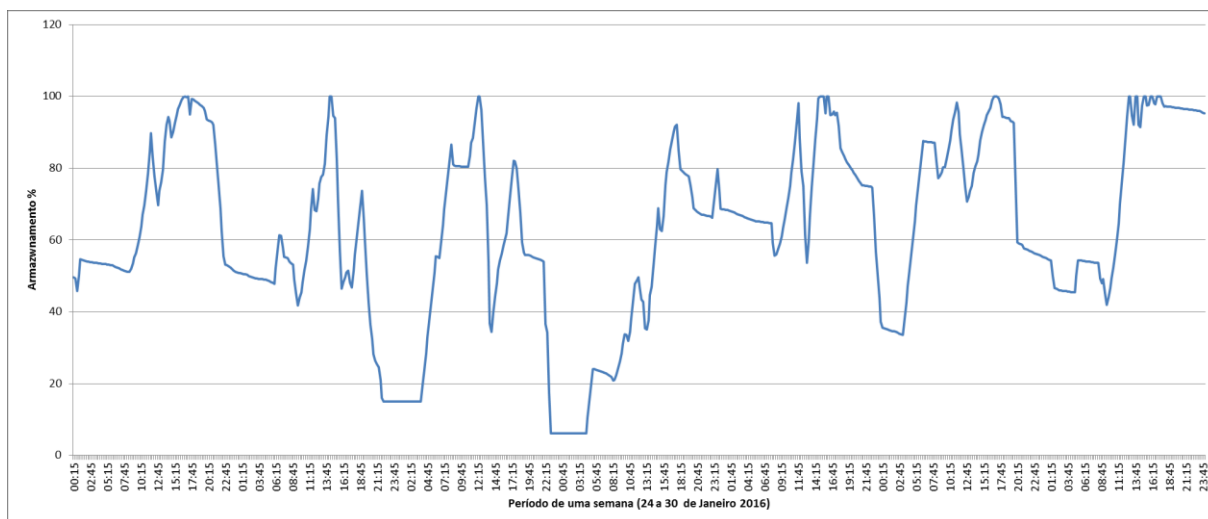


Figura 43 – Para a cenário A: Estado de carga do armazenamento ao longo do tempo.

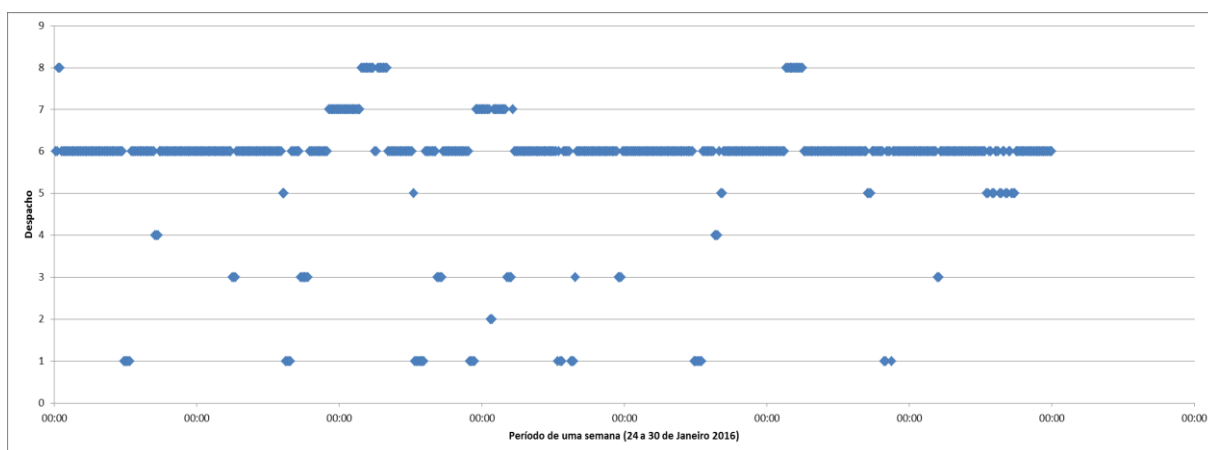


Figura 44 – Para o cenário A: Despachos em uso ao longo do tempo.

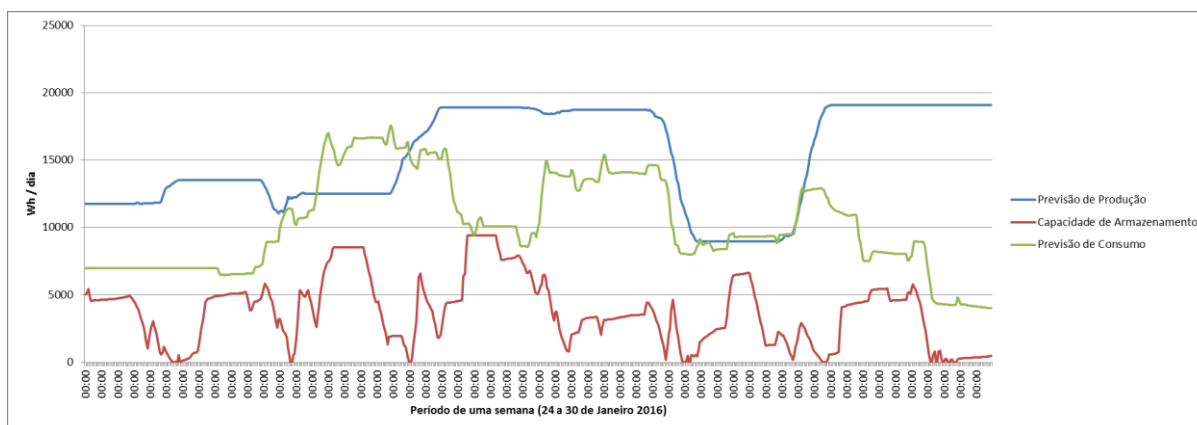


Figura 45– Para o cenário A: Comparação entre a previsão de produção, a capacidade de armazenamento e a previsão de consumo.

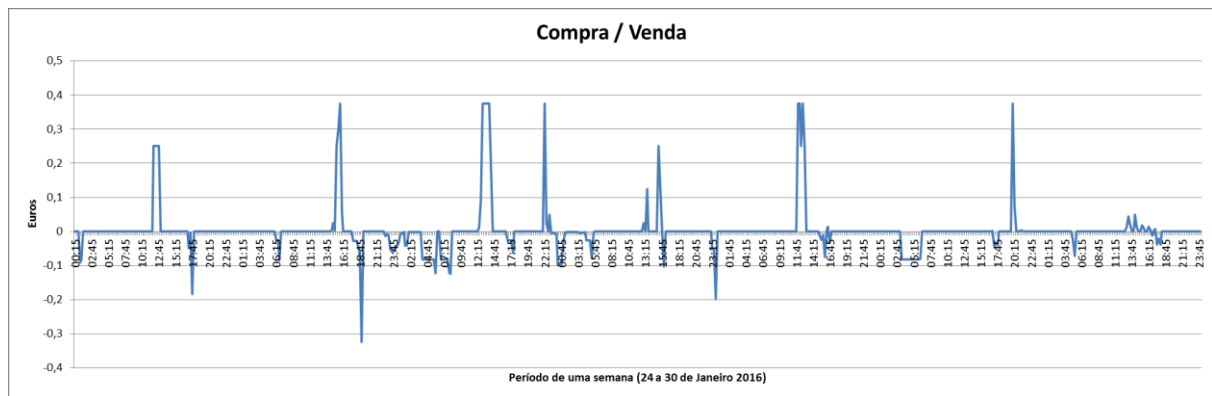


Figura 46 – Para o cenário A: Desempenho económico com o algoritmo ao longo do tempo.

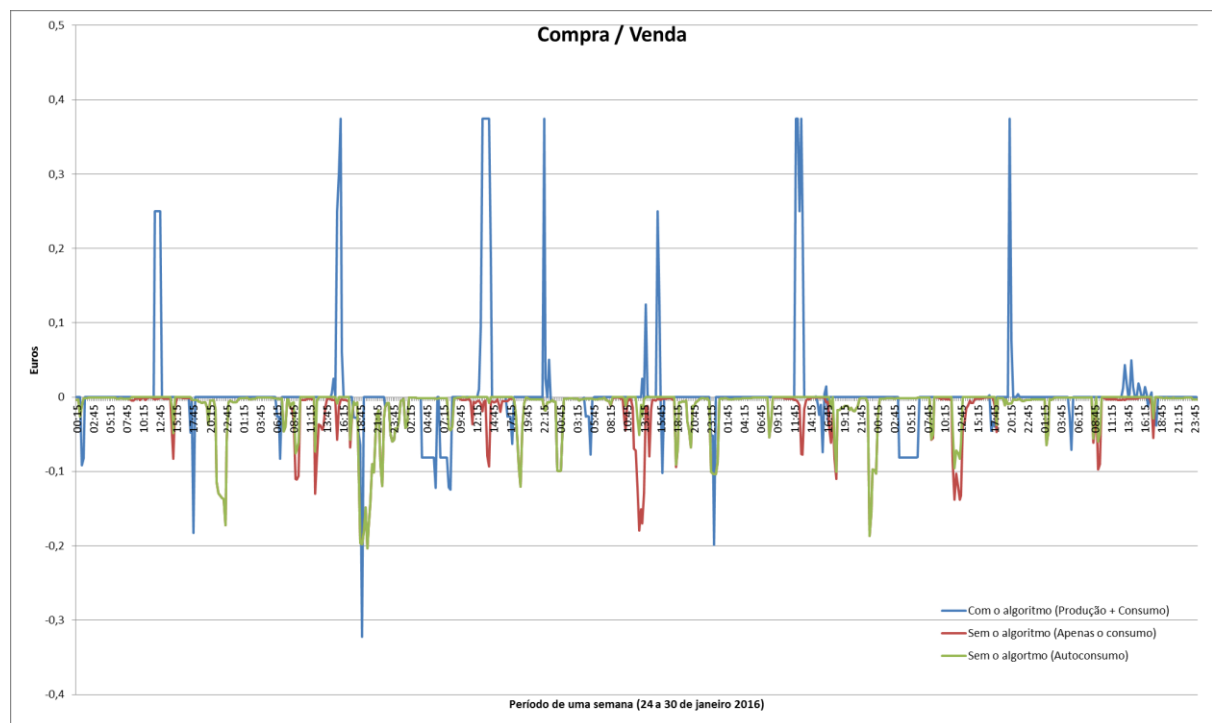


Figura 47 – Para o cenário A: Comparação entre o desempenho económico com o algoritmo e sem o algoritmo apenas com o consumo e com o autoconsumo ao longo do tempo.

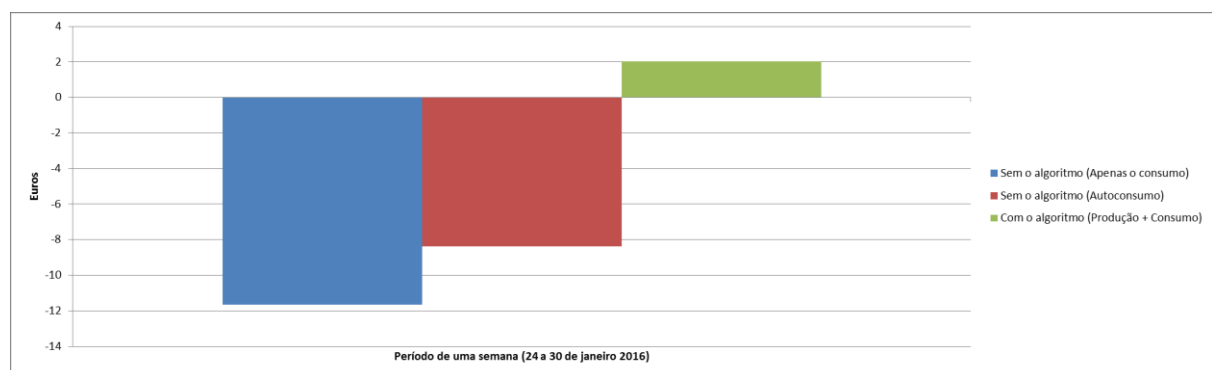


Figura 48 – Para o cenário A: Resultados económicos da semana de 24 a 30 de janeiro sem o uso do algoritmo com apenas o consumo e com o autoconsumo e com aplicação do algoritmo com a produção mais o consumo.

Ao longo da semana, o valor médio da utilização do armazenamento de 10 kWh instalado foi de 63%.

Na tabela 6, que apresenta o número de ocorrências e respetivo tempo de permanência que cada despacho esteve em ação foi elaborada, pode observar-se que durante 16,5 horas são prestados serviços de rede (despachos 1 a 4) e que durante 151,5 horas (despacho 5 a 8) o sistema vai procurar usar a energia das renováveis para autoconsumo, evitando as trocas com a rede e procurando aproveitar eventuais oportunidades de compra de energia em situações onde existe capacidade de armazenamento disponível (despacho 8).

Tabela 6– Número de vezes que ocorre cada despacho e respetivo tempo.

	Número de Ocorrências	Tempo em horas	Percentagem
Despacho 1	35	8,75	5,2%
Despacho 2	2	0,50	0,3%
Despacho 3	23	5,75	3,4%
Despacho 4	6	1,50	0,9%
Despacho 5	19	4,75	2,8%
Despacho 6	515	128,75	76,6%
Despacho 7	42	10,50	6,3%
Despacho 8	30	7,50	4,5%

Verifica-se que para este cenário A, o modelo de gestão de fluxos na situação de diminuição de potência (37 ocorrências), responde 35 com o despacho 1 devido à capacidade de armazenamento ser superior a 20% e apenas 2 com o despacho 2, pois a capacidade de armazenamento é igual ou inferior a 20%. No despacho 1 fornece energia à rede da produção e/ou do armazenamento. No despacho 2 vai deslastrar as cargas não críticas. Relativamente ao aumento de potência 23 ocorrências com o despacho 3 motivadas pela capacidade de armazenamento ser inferior a 80% e 6 com o despacho 4, onde a capacidade é igual ou superior a 80%. No despacho 3 se possível vai usar energia da rede para consumo e armazenamento e no despacho 4, ainda carrega o armazenamento (baterias e/ou supercondensadores) e também são ligadas as cargas de armazenamento.

Sempre que não haja pedidos (90,2% do período temporal), o sistema funciona nos despachos 5 a 8, onde aproveita a energia das renováveis para autoconsumo, evitando as trocas com a rede. Este evitar de trocas resulta numa redução considerável da fatura energética do consumidor.

Durante 7,5 horas (despacho 8), existem oportunidades de compra de energia em condições vantajosas e havia capacidade disponível de armazenamento para aproveitar as oportunidades. O modelo de gestão de fluxos, aproveita estas condições para tirar proveito económico, quer seja para o consumidor usar a energia na sua instalação, quer seja para vir a prestar serviços de rede.

Tabela 7– Caracterização do cenário A.

Consumo (kWh)	68,6
Produção (kWh)	103,5
Capacidade instalada (kWh)	10,0
Capacidade média de Armazenamento utilizada (%)	63%
Fatura da energia com o algoritmo (euros)	-2,02
Fatura da energia sem produção e sem o algoritmo (euros)	11,65
Fatura da energia com produção e sem o armazenamento (euros)	8,39

A partir da tabela 7, pode constatar-se que usando apenas a produção instalada a redução de fatura seria apenas 3,26 euros, com o armazenamento e o sistema de gestão, para a mesma capacidade de produção, o consumidor ainda recebe 2,02 euros o que se traduz numa vantagem económica de 13,67 euros.

Cenário B:

Passa-se na semana de 31-1-2016 até 6-2-2016, sendo o consumo energético total de 35,2 kWh (pouco mais de metade do cenário A), a produção total das renováveis é 103,5 kWh (valor igual ao do cenário A), com uma capacidade total de armazenamento de 10,0 kWh. Traçando o mesmo tipo de gráficos vem:

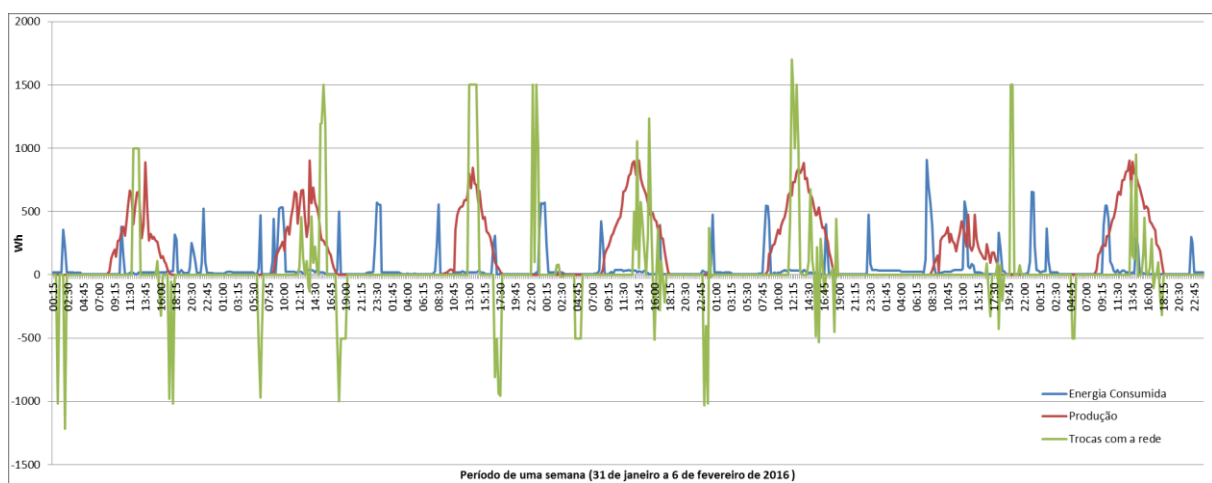


Figura 49 – Para o cenário B: Mostra a Energia Consumida, Produção e Trocas com a rede.

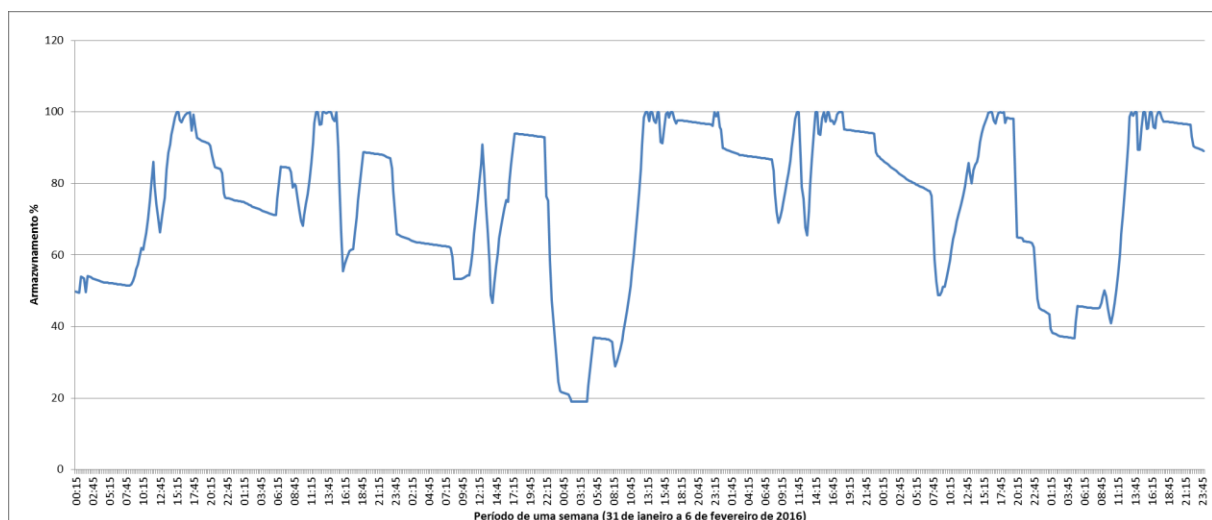


Figura 50 – Para o cenário B: Estado de carga do armazenamento ao longo do tempo.

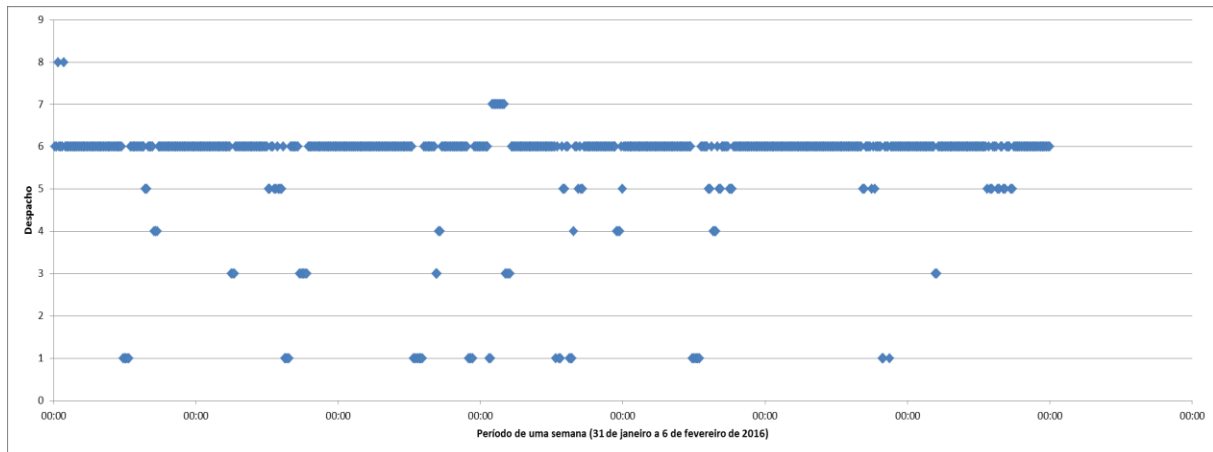


Figura 51 – Para o cenário B: Despachos em uso ao longo do tempo.

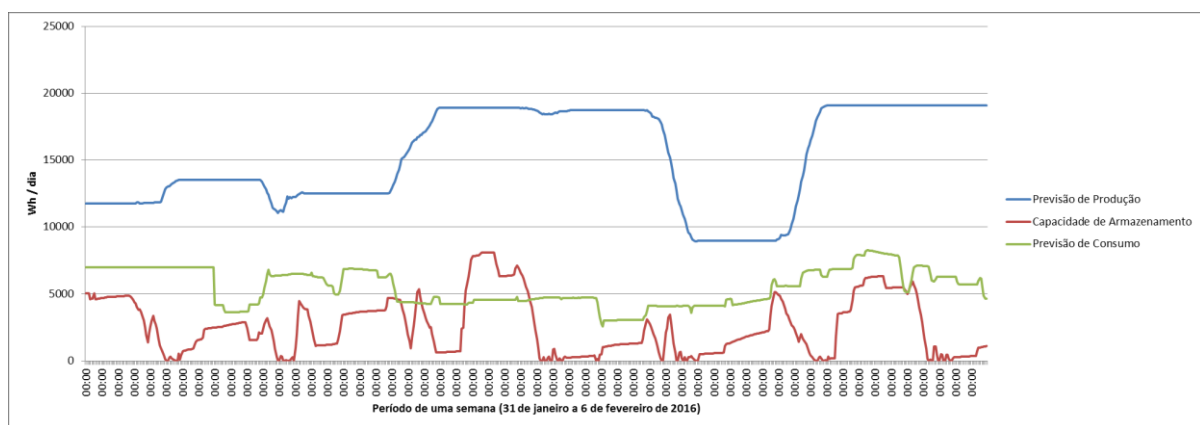


Figura 52 – Para o cenário B: Comparação entre a previsão de produção, a capacidade de armazenamento e a previsão de consumo.

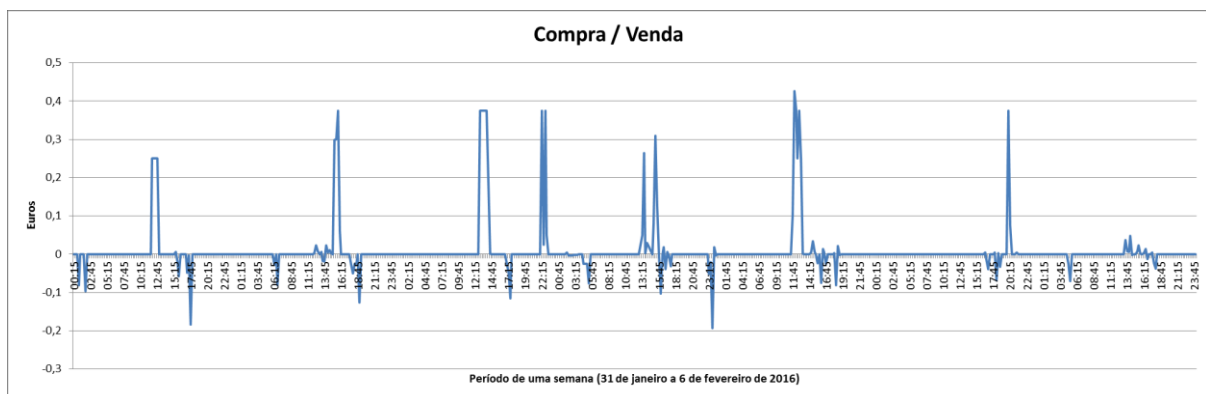


Figura 53 – Para o cenário B: Desempenho económico com o algoritmo ao longo do tempo.

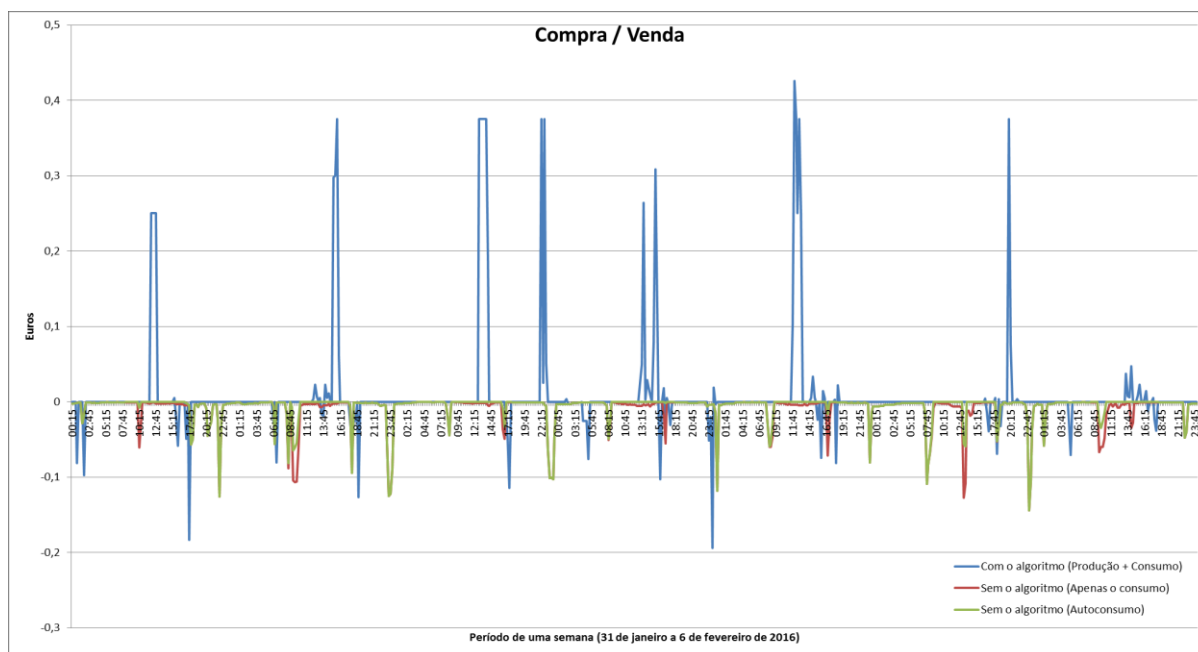


Figura 54 – Para o cenário B: Comparação entre o desempenho económico com o algoritmo e sem o algoritmo apenas com o consumo e com o autoconsumo ao longo do tempo.

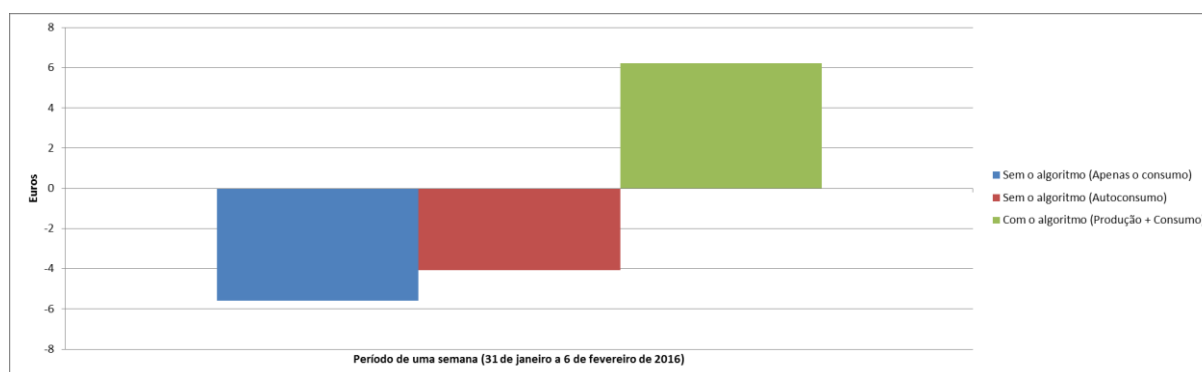


Figura 55 – Para o cenário B: Resultados económicos da semana de 31 de janeiro a 6 de fevereiro de 2016 sem o uso do algoritmo com apenas o consumo e com o autoconsumo e com aplicação do algoritmo com a produção mais o consumo.

Ao longo da semana, o valor médio da utilização do armazenamento de 10 kWh instalado foi de 75%.

Na tabela 8, que apresenta o número de vezes e respetivo tempo de permanência de cada despacho para o cenário B, pode-se observar também a percentagem correspondente a cada despacho.

Tabela 8– Número de vezes que ocorre cada despacho e respetivo tempo.

	Número de Ocorrências	Tempo em horas	Percentagem
Despacho 1	37	9,25	5,5%
Despacho 2	0	0,00	0,0%
Despacho 3	17	4,25	2,5%
Despacho 4	12	3,00	1,8%
Despacho 5	35	8,75	5,2%
Despacho 6	560	140,00	83,3%
Despacho 7	9	2,25	1,3%
Despacho 8	2	0,50	0,3%

Para o cenário B, o modelo de gestão de fluxos na situação de diminuição de potência (37 ocorrências), responde 37 com o despacho 1 devido à capacidade de armazenamento ser superior a 20% e nenhuma vez com o despacho 2, pois a capacidade de armazenamento nunca é igual ou inferior a 20%. No despacho 1 fornece energia à rede da produção e/ou do armazenamento. No que respeita ao aumento de potência 17 ocorrências com o despacho 3 motivadas pela capacidade de armazenamento ser inferior a 80% e 12 com o despacho 4, onde a capacidade é igual ou superior a 80%. No despacho 3 se possível vai trazer a energia da rede para consumo e armazenamento e no despacho 4, ainda carrega o armazenamento (baterias e/ou supercondensadores) e também são ligadas as cargas de armazenamento.

Durante meia hora (despacho 8), existem oportunidades de compra de energia em condições vantajosas e havia capacidade disponível de armazenamento para aproveitar as oportunidades. O modelo de gestão de fluxos aproveitou estas condições para tirar proveito económico, para o consumidor usar a energia na sua instalação e para poder vir a prestar serviços de rede.

Tabela 9– Caracterização do cenário B.

Consumo (kWh)	35,2
Produção (kWh)	103,5
Capacidade instalada (kWh)	10,0
Capacidade média de Armazenamento utilizada (%)	75%
Fatura da energia com o algoritmo (euros)	-6,23
Fatura da energia sem produção e sem o algoritmo (euros)	5,59
Fatura da energia com produção e sem o armazenamento (euros)	4,08

A partir da tabela 9, pode constatar-se que usando apenas a produção instalada a redução de fatura seria apenas 1,51 euros, com o armazenamento e o sistema de gestão, para a mesma capacidade de produção, o consumidor ainda recebe 6,23 euros o que se traduz numa vantagem económica de 11,82 euros.

Cenário C:

Parte do consumo energético total de 68,6 kWh da semana de 24-1-2016 a 30-1-2016 (igual ao cenário A), mas com a produção total das renováveis de 51,8 kWh (valor igual a aproximadamente metade do cenário A), com uma capacidade total de armazenamento de 10,0 kWh. Elaborando-se o mesmo tipo de gráficos vem:

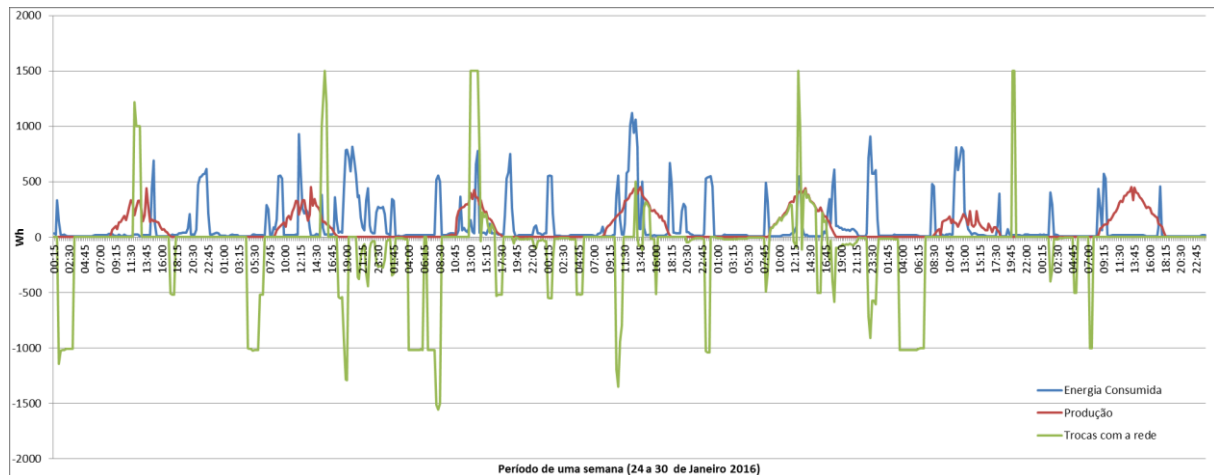


Figura 56 – Para o cenário C: Mostra a Energia Consumida, Produção e Trocas com a rede.

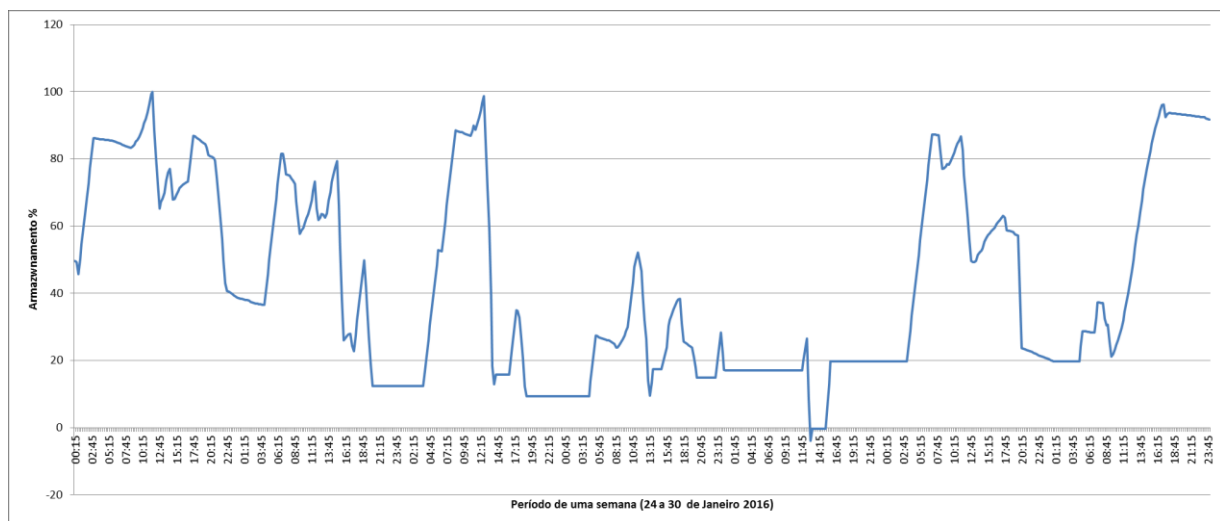


Figura 57 – Para o cenário C: Estado de carga do armazenamento ao longo do tempo.

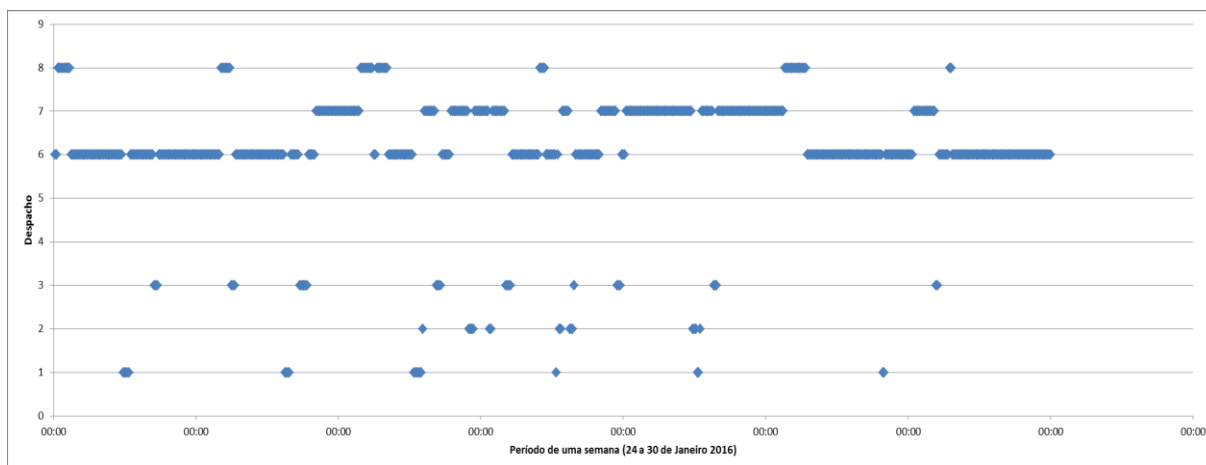


Figura 58 – Para o cenário C: Despachos em uso ao longo do tempo.

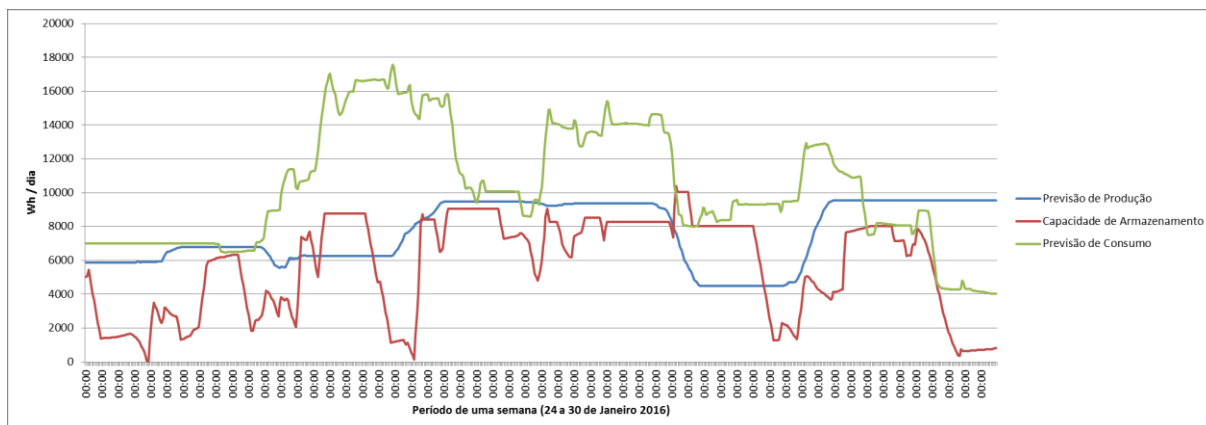


Figura 59 – Para o cenário C: Comparação entre a previsão de produção, a capacidade de armazenamento e a previsão de consumo.

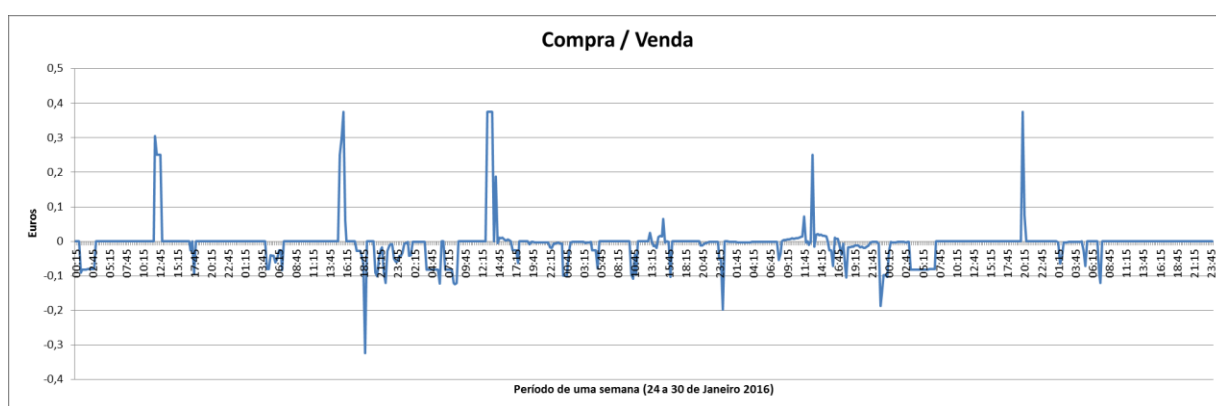


Figura 60 – Para o cenário C: Desempenho económico com o algoritmo ao longo do tempo.

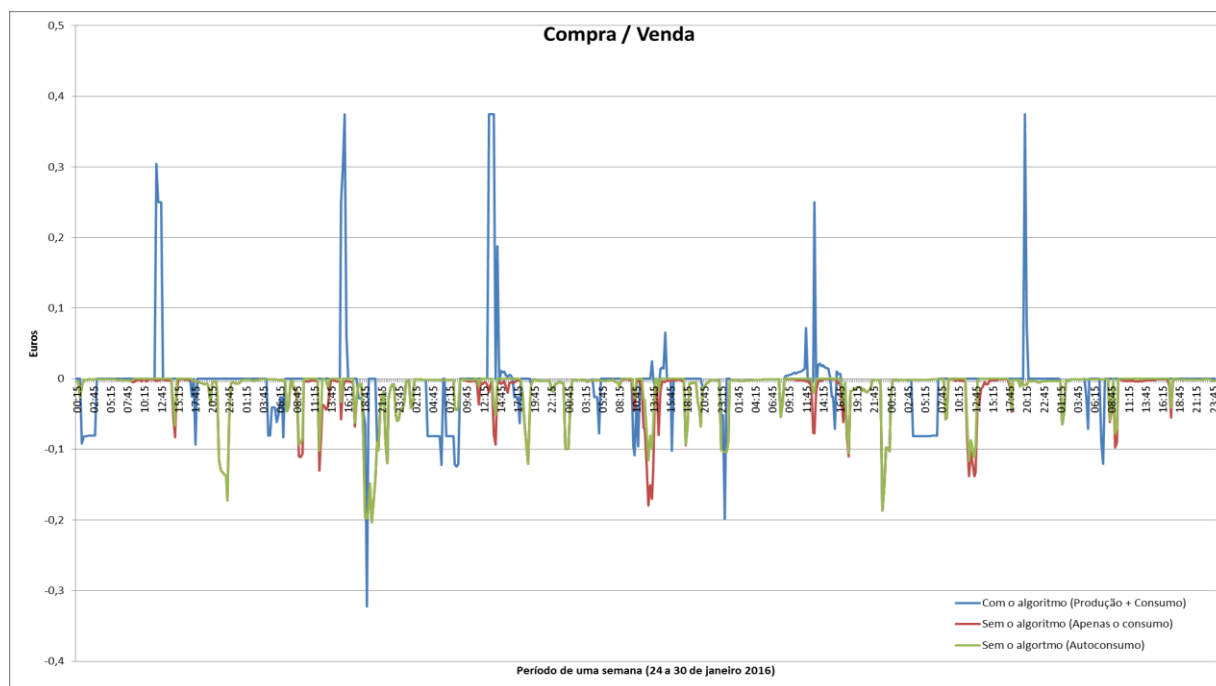


Figura 61 – Para o cenário C: Comparação entre o desempenho económico com o algoritmo e sem o algoritmo apenas com o consumo e com o autoconsumo ao longo do tempo.

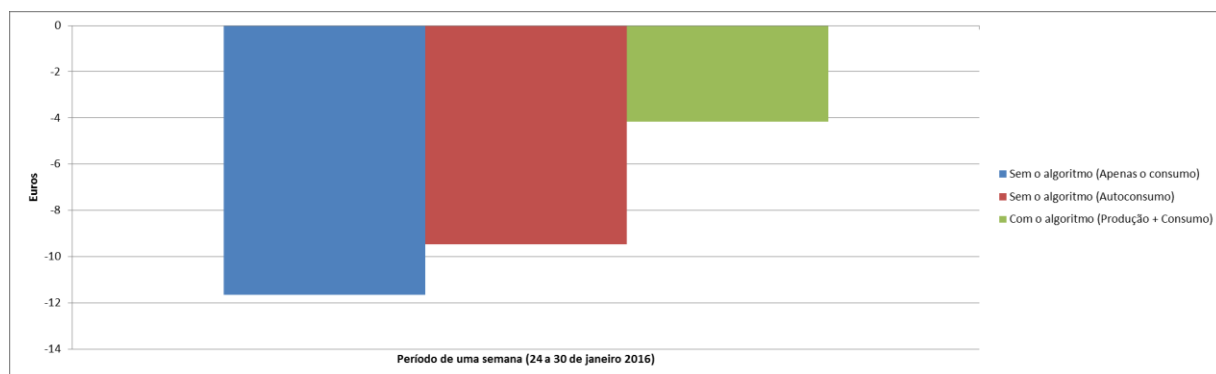


Figura 62 – Para o cenário C: Resultados económicos da semana de 24 a 30 de janeiro do ano 2016 sem o uso do algoritmo com apenas o consumo e com o autoconsumo e com aplicação do algoritmo com a produção mais o consumo.

Ao longo da semana, o valor médio da utilização do armazenamento de 10 kWh instalado foi de 43%.

Na tabela 10, que apresenta o número de vezes e respetivo tempo de permanência de cada despacho para o cenário C, pode-se observar também a percentagem correspondente a cada despacho.

Tabela 10– Número de vezes que ocorre cada despacho e respetivo tempo

	Número de Ocorrências	Tempo em horas	Porcentagem
Despacho 1	20	5,00	3,0%
Despacho 2	16	4,00	2,4%
Despacho 3	29	7,25	4,3%
Despacho 4	0	0,00	0,0%
Despacho 5	0	0,00	0,0%
Despacho 6	355	88,75	52,8%
Despacho 7	198	49,50	29,5%
Despacho 8	54	13,50	8,0%

Verifica-se que para este cenário C, o modelo de gestão de fluxos na situação de diminuição de potência (37 ocorrências), responde 20 com o despacho 1 devido à capacidade de armazenamento ser superior a 20% e 16 com o despacho 2, pois a capacidade de armazenamento é igual ou inferior a 20%. No despacho 1 fornece energia à rede da produção e/ou do armazenamento. No despacho 2 vai deslastrar as cargas não críticas. Relativamente ao aumento de potência 29 ocorrências com o despacho 3 motivadas pela capacidade de armazenamento ser inferior a 80% e nenhuma com o despacho 4, pois a capacidade nunca é igual ou superior a 80%. No despacho 3 se possível vai trazer a energia da rede para consumo e armazenamento.

O despacho 7 ocorreu durante 29,5% do período temporal, devido a capacidade de armazenamento ser igual ou inferior a 20%.

Durante 13,5 horas (despacho 8), existem oportunidades de compra de energia em condições vantajosas e havia capacidade disponível de armazenamento para aproveitar as oportunidades. O modelo de gestão de fluxos, aproveita estas condições para tirar proveito económico, quer seja para o consumidor usar a energia na sua instalação, quer seja para vir a prestar serviços de rede.

Tabela 11– Caracterização do cenário C.

Consumo (kWh)	68,6
Produção (kWh)	51,8
Capacidade instalada (kWh)	10,0
Capacidade média de Armazenamento utilizada (%)	43%
Fatura da energia com o algoritmo (euros)	4,15
Fatura da energia sem produção e sem o algoritmo (euros)	11,65
Fatura da energia com produção e sem o armazenamento (euros)	9,47

A partir da tabela 11, pode constatar-se que usando apenas a produção instalada a redução de fatura seria apenas 2,18 euros, com o armazenamento e o sistema de gestão, para a mesma capacidade de produção, o consumidor ainda recebe 4,15 euros o que se traduz numa vantagem económica de 7,5 euros.

Cenário D:

Parte do consumo energético total de 68,6 kWh da semana de 24-1-2016 a 30-1-2016 (igual ao cenário A), com a produção total das renováveis de 103,5 kWh (valor igual ao do cenário A), mas agora com uma capacidade total de armazenamento de 20,0 kWh (o dobro do cenário A). Fazendo-se o mesmo tipo de gráficos vem:

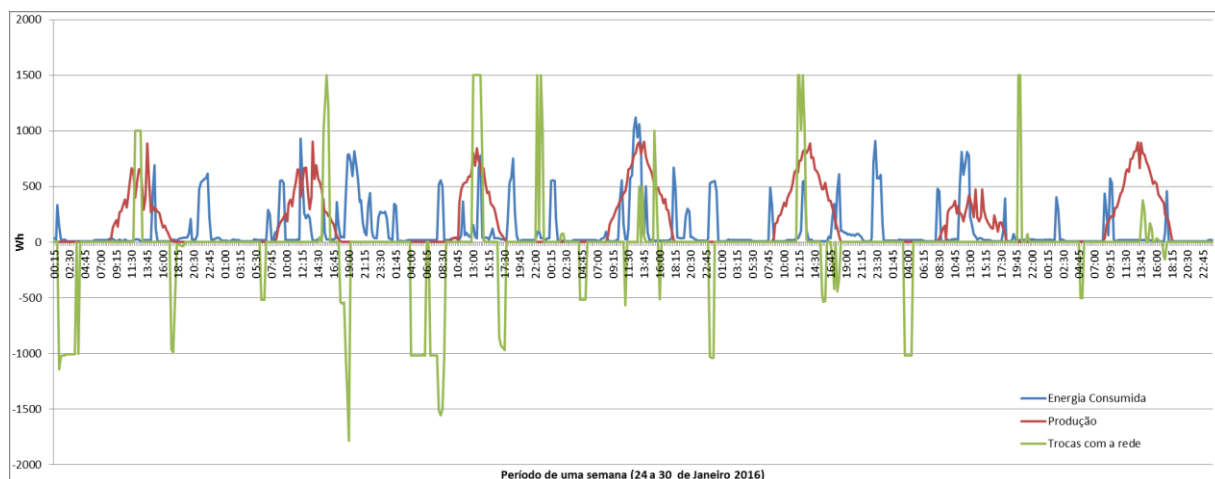


Figura 63 – Para o cenário D: Mostra a Energia Consumida, Produção e Trocas com a rede.

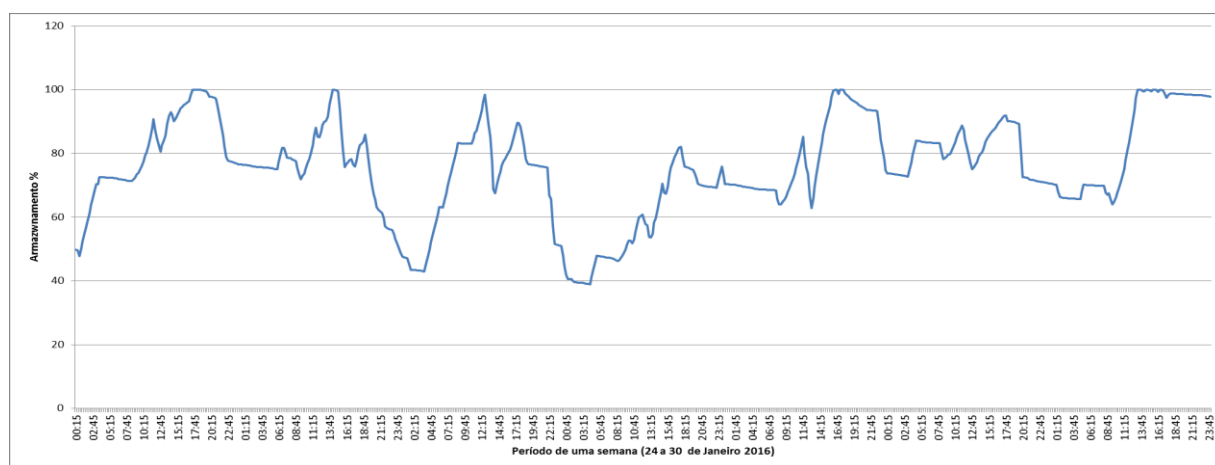


Figura 64 – Para o cenário D: Estado de carga do armazenamento ao longo do tempo.

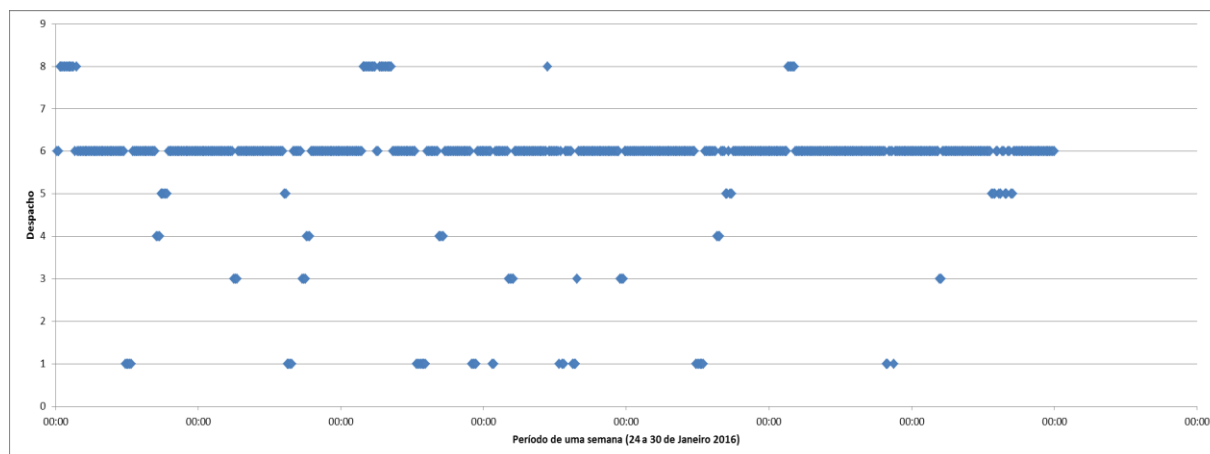


Figura 65 – Para o cenário D: Despachos em uso ao longo do tempo.

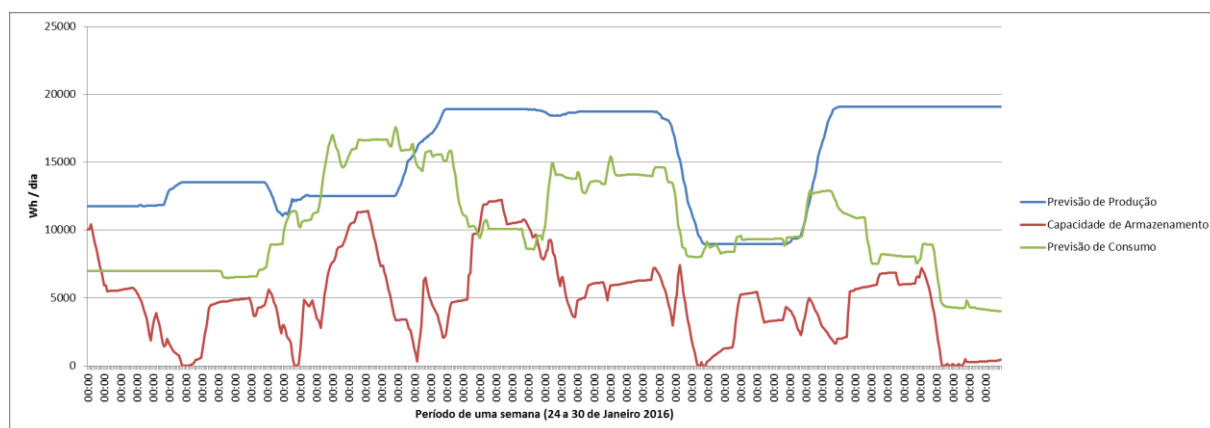


Figura 66 – Para o cenário D: Comparação entre a previsão de produção, a capacidade de armazenamento e a previsão de consumo.

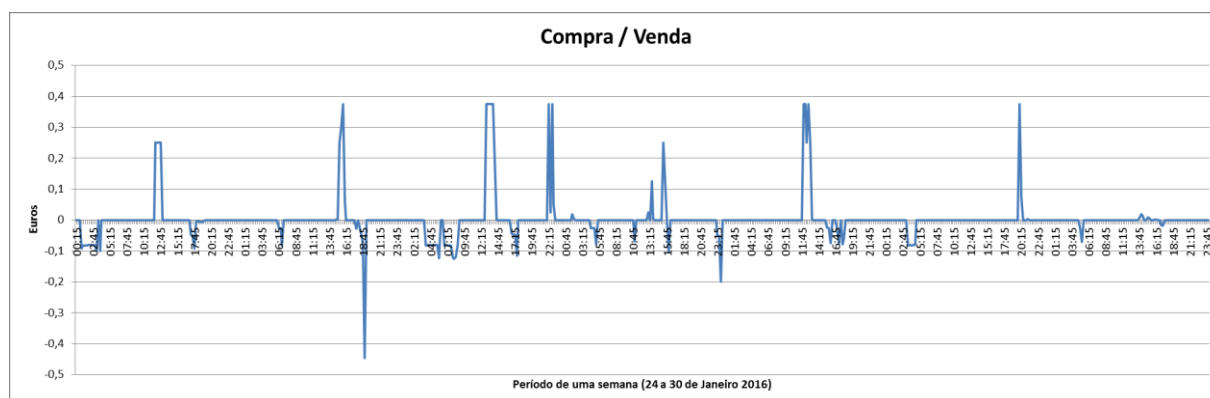


Figura 67 – Para o cenário D: Desempenho económico com o algoritmo ao longo do tempo.

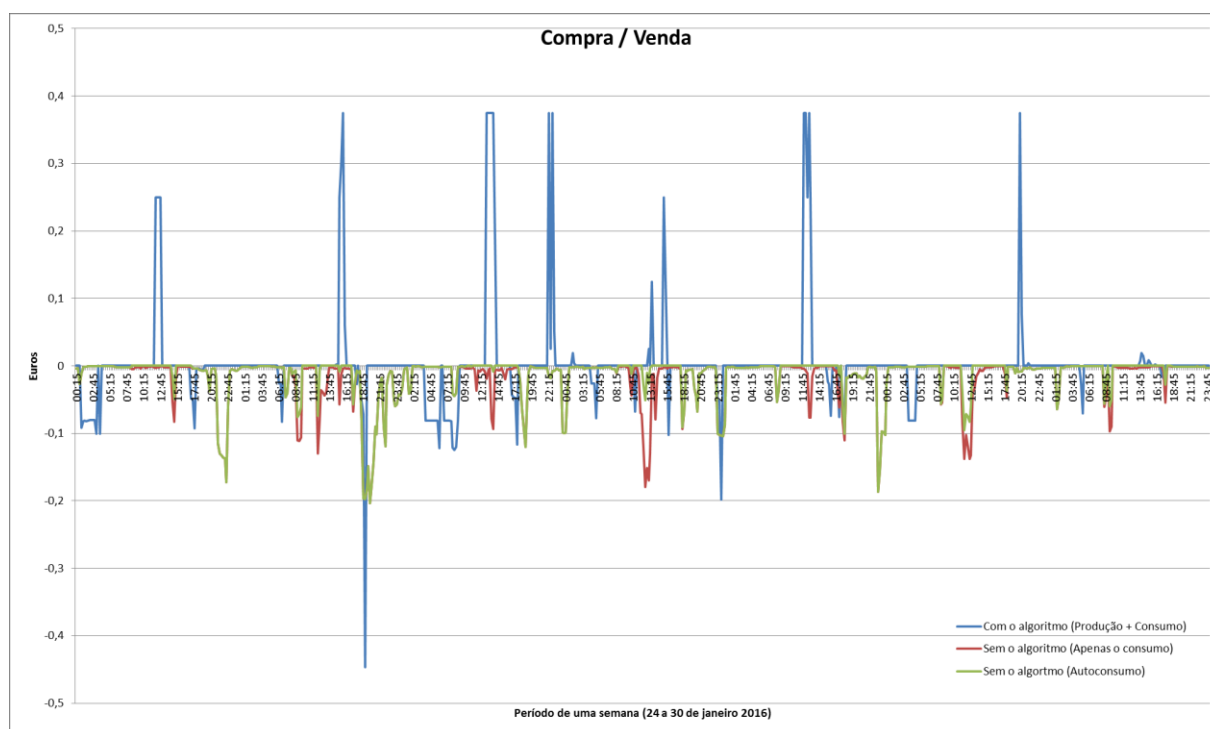


Figura 68 – Para o cenário D: Comparação entre o desempenho económico com o algoritmo e sem o algoritmo apenas com o consumo e com o autoconsumo ao longo do tempo.

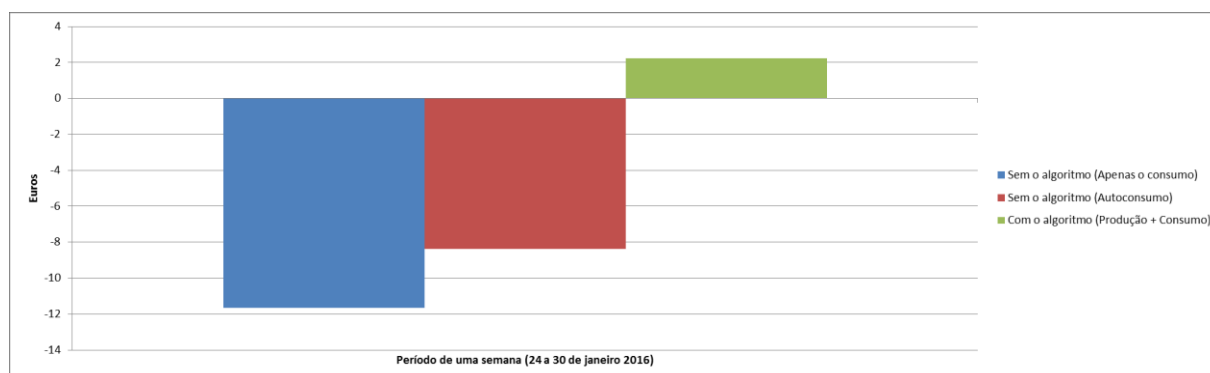


Figura 69 – Para o cenário D: Resultados económicos da semana de 24 a 30 de janeiro do ano 2016 sem o uso do algoritmo com apenas o consumo e com o autoconsumo e com aplicação do algoritmo com a produção mais o consumo.

Ao longo da semana, o valor médio da utilização do armazenamento de 20 kWh instalado foi de 76%.

Na tabela 12, que apresenta o número de vezes e respetivo tempo de permanência de cada despacho para o cenário D, pode-se observar também a percentagem correspondente a cada despacho.

Tabela 12– Número de vezes que ocorre cada despacho e respetivo tempo

	Número de Ocorrências	Tempo em horas	Percentagem
Despacho 1	37	9,25	5,5%
Despacho 2	0	0,00	0,0%
Despacho 3	16	4,00	2,4%
Despacho 4	13	3,25	1,9%
Despacho 5	20	5,00	3,0%
Despacho 6	551	137,75	82,0%
Despacho 7	0	0,00	0,0%
Despacho 8	35	8,75	5,2%

Verifica-se que para este cenário D, o modelo de gestão de fluxos na situação de diminuição de potência (37 ocorrências), responde 37 com o despacho 1 devido à capacidade de armazenamento ser superior a 20% e nenhuma vez com o despacho 2, pois a capacidade de armazenamento nunca é igual ou inferior a 20%. No despacho 1 fornece energia à rede da produção e/ou do armazenamento. Relativamente ao aumento de potência, 16 ocorrências com o despacho 3 motivadas pela capacidade de armazenamento ser inferior a 80% e 13 com o despacho 4, onde a capacidade é igual ou superior a 80%. No despacho 3 se possível vai trazer a energia da rede para consumo e armazenamento e no despacho 4, ainda carrega o armazenamento (baterias e/ou supercondensadores) e também são ligadas as cargas de armazenamento.

Durante 8,75 horas (despacho 8), existem oportunidades de compra de energia em condições vantajosas e havia capacidade disponível de armazenamento para aproveitar as oportunidades. O modelo de gestão de fluxos, aproveita estas condições para tirar proveito económico, quer seja para o consumidor usar a energia na sua instalação, quer seja para vir a prestar serviços de rede.

Tabela 13– Caracterização do cenário D.

Consumo (kWh)	68,6
Produção (kWh)	103,5
Capacidade instalada (kWh)	20,0
Capacidade média de Armazenamento utilizada (%)	76%
Fatura da energia com o algoritmo (euros)	-2,23
Fatura da energia sem produção e sem o algoritmo (euros)	11,65
Fatura da energia com produção e sem o armazenamento (euros)	8,39

A partir da tabela 13, pode constatar-se que usando apenas a produção instalada a redução de fatura seria apenas 3,26 euros, com o armazenamento e o sistema de gestão, para a mesma capacidade de produção, o consumidor ainda recebe 2,23 euros o que se traduz numa vantagem económica de 13,88 euros.

Cenário E:

Parte do consumo energético total de 35,2kWh da semana de 31-1-2016 a 6-2-2016, com a produção total das renováveis de 103,5 kWh, com uma capacidade total de armazenamento de 20,0 kWh. Traçando-se o mesmo tipo de gráficos vem:

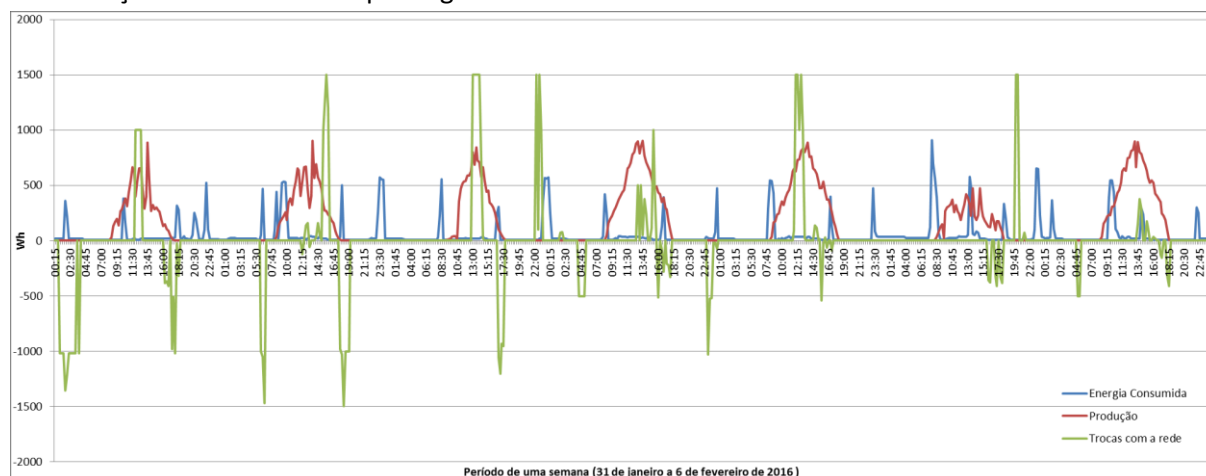


Figura 70 – Para o cenário E: Mostra a Energia Consumida, Produção e Trocas com a rede.

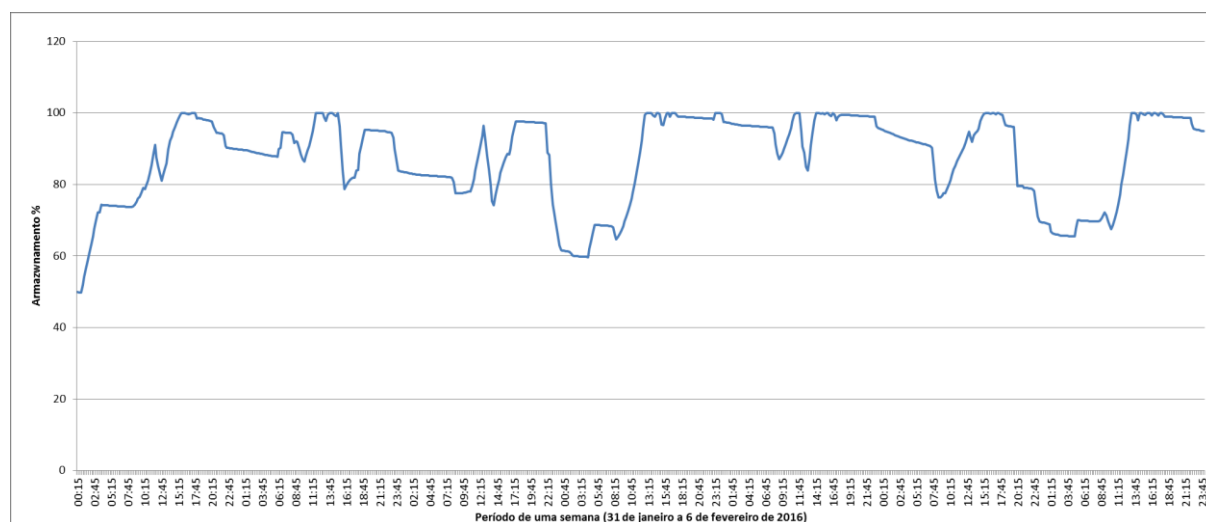


Figura 71 – Para o cenário E: Estado de carga do armazenamento ao longo do tempo.

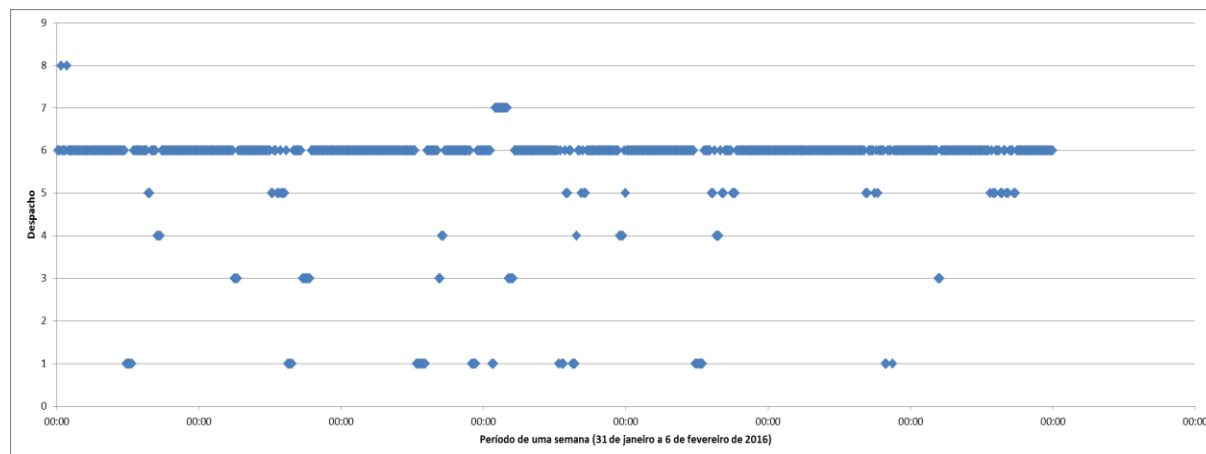
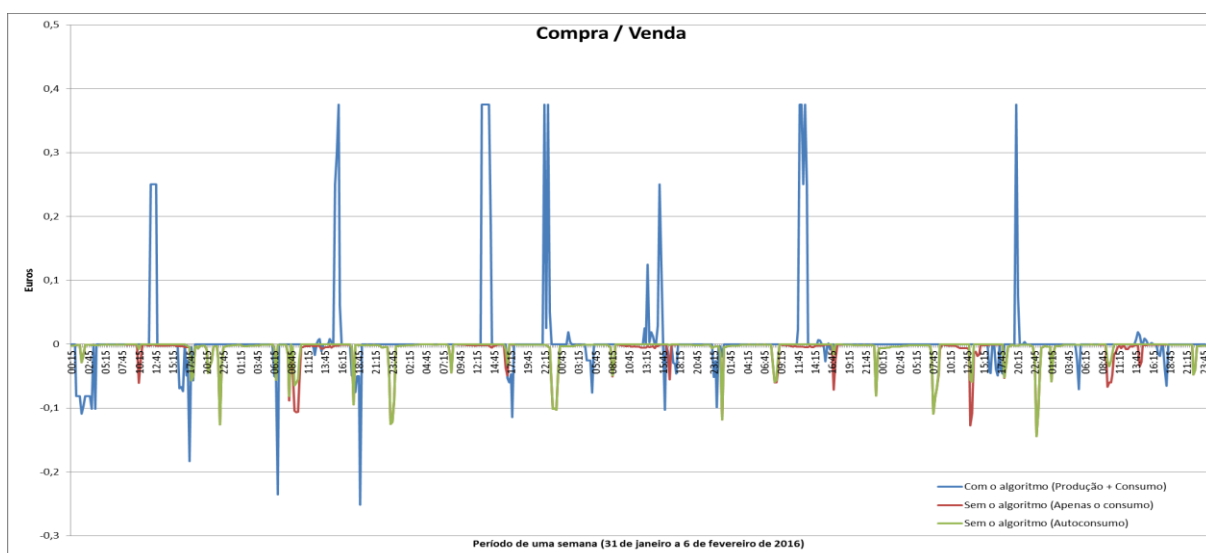
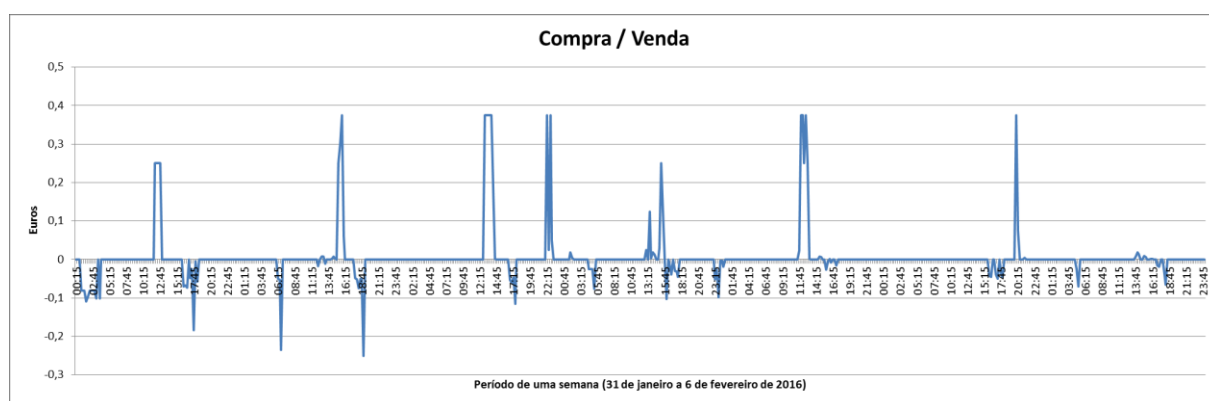
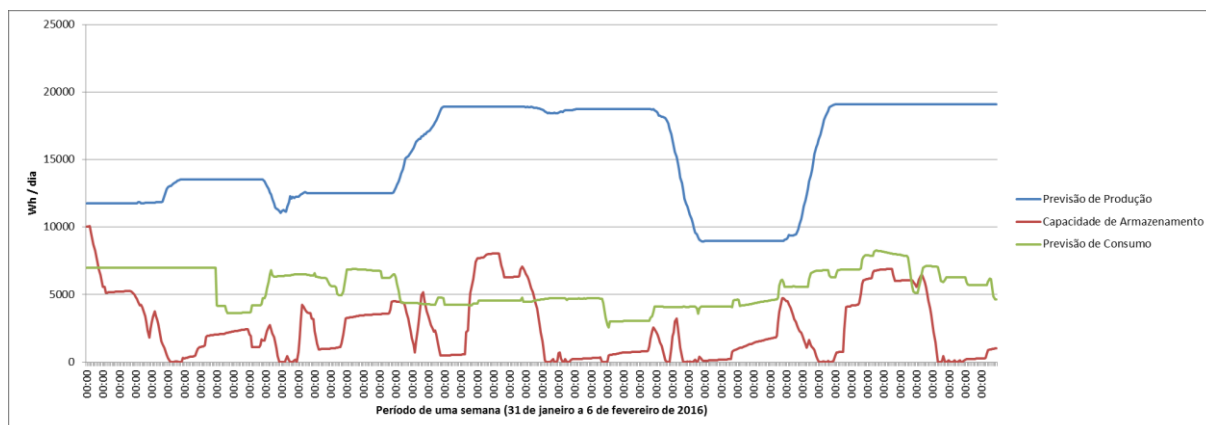


Figura 72 – Para o cenário E: Despachos em uso ao longo do tempo.



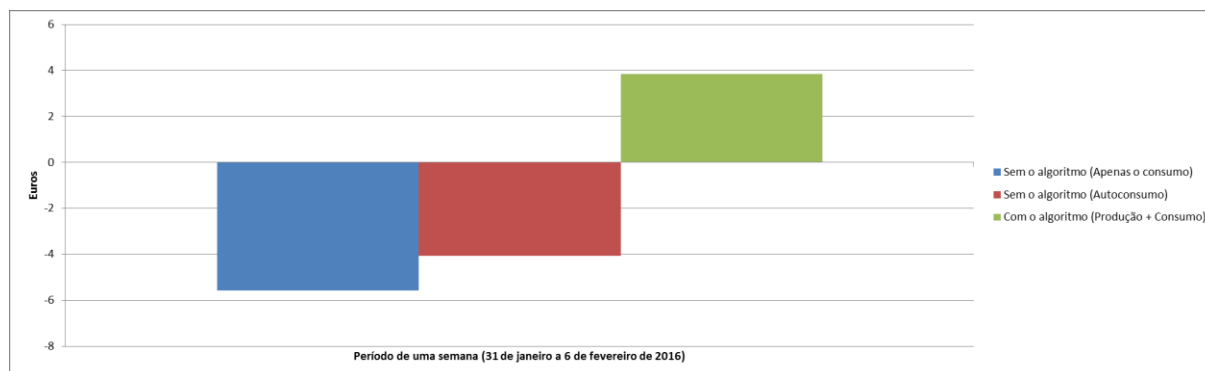


Figura 76 – Para o cenário E: Resultados económicos da semana de 31 de janeiro a 6 de fevereiro do ano 2016 sem o uso do algoritmo com apenas o consumo e com o autoconsumo e com aplicação do algoritmo com a produção mais o consumo.

Ao longo da semana, o valor médio da utilização do armazenamento de 20 kWh instalado foi de 87%.

Na tabela 14 apresenta-se o número de vezes e respetivo tempo de permanência de cada despacho para o cenário E, bem como a percentagem correspondente a cada despacho.

Tabela 14– Número de vezes que ocorre cada despacho e respetivo tempo

	Número de Ocorrências	Tempo em horas	Percentagem
Despacho 1	37	9,25	5,5%
Despacho 2	0	0,00	0,0%
Despacho 3	6	1,50	0,9%
Despacho 4	23	5,75	3,4%
Despacho 5	47	11,75	7,0%
Despacho 6	548	137,00	81,6%
Despacho 7	0	0,00	0,0%
Despacho 8	11	2,75	1,6%

Verifica-se que para este cenário E, o modelo de gestão de fluxos na situação de diminuição de potência (37 ocorrências), responde 37 com o despacho 1 devido à capacidade de armazenamento ser superior a 20% e nenhuma com o despacho 2, pois a capacidade de armazenamento nunca é igual ou inferior a 20%. No despacho 1 fornece energia à rede da produção e/ou do armazenamento. Relativamente ao aumento de potência, 6 ocorrências com o despacho 3 motivadas pela capacidade de armazenamento ser inferior a 80% e 23 com o despacho 4, onde a capacidade é igual ou superior a 80%. No despacho 3 se possível vai trazer a energia da rede para consumo e armazenamento e no despacho 4, ainda carrega o armazenamento (baterias e/ou supercondensadores) e também são ligadas as cargas de armazenamento.

Durante 2,75 horas (despacho 8), existem oportunidades de compra de energia em condições vantajosas e havia capacidade disponível de armazenamento para aproveitar as oportunidades. O modelo de gestão de fluxos, aproveita estas condições para tirar proveito económico, quer seja para o consumidor usar a energia na sua instalação, quer seja para vir a prestar serviços de rede.

Tabela 15– Caraterização do cenário E.

Consumo (kWh)	35,2
Produção (kWh)	103,5
Capacidade instalada (kWh)	20,0
Capacidade média de Armazenamento utilizada (%)	88%
Fatura da energia com o algoritmo (euros)	-3,84
Fatura da energia sem produção e sem o algoritmo (euros)	5,59
Fatura da energia com produção e sem o armazenamento (euros)	4,08

A partir da tabela 15, pode constatar-se que usando apenas a produção instalada a redução de fatura seria apenas 1,51 euros, com o armazenamento e o sistema de gestão, para a mesma capacidade de produção, o consumidor ainda recebe 3,84 euros o que se traduz numa vantagem económica de 9,43 euros.

Na tabela 16 faz-se uma análise comparativa dos vários cenários, mostrando-se o desempenho do modelo de gestão de fluxos.

Tabela 16– Caraterização dos cenários.

		Cenário A:	Cenário B:	Cenário C:	Cenário D:	Cenário E:
Energia consumida: (kWh)		68,552	35,248	68,552	68,552	35,248
Produção renovável: (kWh)		103,458	103,458	51,783	103,458	103,458
Capacidade de armazenamento: (kWh)		10,000	10,000	10,000	20,000	20,000
Valor médio de uso do armazenamento (%):		63	75	43	76	88
Aplicação dos despachos em percentagem:	Despacho 1:	5,21%	5,51%	2,98%	5,51%	5,51%
	Despacho 2:	0,30%	0,00%	2,38%	0,00%	0,00%
	Despacho 3:	3,42%	2,53%	4,32%	2,38%	0,89%
	Despacho 4:	0,89%	1,79%	0,00%	1,93%	3,42%
	Despacho 5:	2,83%	5,21%	0,00%	2,98%	6,99%
	Despacho 6:	76,64%	83,33%	52,83%	81,99%	81,55%
	Despacho 7:	6,25%	1,34%	29,46%	0,00%	0,00%
	Despacho 8:	4,46%	0,30%	8,04%	5,21%	1,64%
Fatura energética (Com o algoritmo): (euros)		-2,02	-6,23	4,15	-2,24	-3,84
Fatura de energia sem sistema: (euros)		11,65	5,59	11,68	11,65	5,59
Ganho proporcionado pelo sistema de: (euros)		13,67	11,81	7,50	13,89	9,43

Em qualquer uma das cinco situações o uso do algoritmo conduz a reduções substanciais na fatura energética, face a uma situação sem produção e face a uma situação só com produção, mas sem gestão de armazenamento. Este bom desempenho resulta de a gestão de fluxos de energia usar vários despachos adaptados às diferentes situações, que minimizam a injeção na rede quando há a necessidade de satisfazer pedidos nesse sentido.

Comparando o cenário A, com o cenário B, quando a energia consumida na residência diminui, vai dar-se um aumento no valor médio da capacidade de armazenamento usada 63% para 75%. Este aumento, facilita a resposta no sentido da diminuição de potência com o despacho 1 (em detrimento do despacho 2), mas em contrapartida dificulta a resposta a pedidos no sentido de aumento de potência, ou seja, diminui o tempo de funcionamento do despacho 3 e aumenta o tempo do despacho 4.

Quando se aumenta a capacidade de armazenamento (cenário D e cenário E), em comparação com os restantes, pode observar-se que o valor médio da capacidade de armazenamento usada também sobe devido a maior quantidade de energia vinda da rede elétrica pública. Analisando os dados, no caso do pedido de diminuição de potência, uma vez que a capacidade de armazenamento é superior a 20% é sempre usado o despacho 1. Caso seja feito um pedido de aumento de potência, especialmente no cenário E, a percentagem do despacho 3 tende a diminuir em favor do despacho 4, devido à capacidade de armazenamento ser igual ou superior a 80% durante períodos de tempos maiores.

Ao comparar-se o cenário A e o cenário C, se a produção de energia renovável for maior pode concluir-se que o valor médio do uso do armazenamento também é maior. Neste caso, o cenário A com uma produção renovável de 103,5 kWh tem com um valor médio de uso de capacidade do armazenamento igual a 63%, já o cenário C, com produção renovável de 51,8 kWh apresenta um valor médio de uso da capacidade de armazenamento de 43%.

Maioritariamente ocorreu o despacho 6, porque na maior parte do período semanal em simulação não havia pedidos da rede e na maioria das vezes o armazenamento está com uma capacidade superior a 20% e inferior a 100%, limites que se procura não sejam ultrapassados.

5. Simulação do algoritmo de gestão interligado ao sistema físico

5.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo fazer a ligação do modelo de gestão de fluxos apresentado anteriormente com o sistema de hardware desenvolvido, para testar o modelo em ambiente próximo do real.

Para tal, foi necessário executar um conjunto de etapas. Uma primeira consiste na elaboração das especificações do algoritmo de gestão energética através da construção de fluxogramas que servem de base para a elaboração da programação. Esta elaboração foi dividida em vários fluxogramas mais específicos de forma a simplificar a implementação e a compreensão.

Com os fluxogramas construídos, a etapa seguinte consistiu na escolha de uma linguagem de programação e/ou programa para a sua implementação e na simulação do modelo de gestão de fluxos, tendo sido escolhido para tal, o *simulink*.

Por fim foi a validação do algoritmo de gestão energética do sistema, através do teste de um conjunto de situações típicas e na obtenção de um conjunto de resultados de forma a verificar o funcionamento correto do sistema de controlo.

5.2 Fluxograma do algoritmo de gestão energética do sistema

O fluxograma descrito nesta secção serve de base à programação de forma direta para diferentes linguagens de programação, mostrando os diferentes diagramas de operação do processo.

Tendo como base a informação fornecida pelos fabricantes das baterias e supercondensadores usados, considerou-se que a tensão no armazenamento (baterias e supercondensadores) poderia variar entre 21 V (sem carga) e os 27 V (carga completa).

Assim foi elaborada a tabela 17, que relaciona o valor da tensão no armazenamento e a capacidade no armazenamento.

Tabela 17– Relação entre o valor da tensão no armazenamento e a capacidade no armazenamento.

Tensão no armazenamento (V)	Capacidade de armazenamento (%)
21	0
21,6	10
22,2	20
25,8	80
27	100

Na construção do fluxograma são usadas as abreviaturas que constam da tabela 18.

Tabela 18– Descrição das abreviaturas usadas no fluxograma.

Abreviatura:	Descrição:
CA	Cálculo do armazenamento disponível no sistema
CMA	Capacidade máxima de armazenamento do sistema (baterias e+ supercondensadores)
DeslasteCargas	Desliga todas as cargas não prioritárias
IBatCar	Valor desejado de corrente para carregar as baterias
IBatRet	Valor desejado de corrente a retirar das baterias
IC	Valor real da corrente de carga
ICargasArmazenamento	Permite a ligação das cargas de armazenamento (carro e +aquecimento)
ICP	Valor real da corrente de carga prioritária
IGB	Valor máximo de corrente com que podem ser carregadas as baterias
IGS	Valor máximo de corrente com que podem ser carregados os supercondensadores
IP1	Valor real de corrente da produção um
IP2	Valor real de corrente da produção dois
IPR	Valor da corrente pedida pela rede elétrica pública
IProd1	Valor máximo desejado da corrente de produção na fonte renovável um
IProd2	Valor máximo desejado da corrente de produção na fonte renovável dois
IRB	Valor máximo de corrente que pode ser retirada das baterias
IRS	Valor máximo de corrente que pode ser retirada dos supercondensadores
ISupCar	Valor desejado de corrente para carregar os supercondensadores
ISupRet	Valor desejado de corrente a retirar dos supercondensadores
LCA	Valor máximo de corrente com que podem ser carregadas as cargas de armazenamento
LGS	Informação da Rede
LP1	Valor máximo de corrente da produção um
LP2	Valor máximo de corrente da produção dois
PC	Previsão de cargas (num intervalo de tempo por exemplo num dia)
PCC	Preço de compra a partir do qual o consumidor considera vantajoso
PCE	Preço de compra da energia em tempo real
PP	Previsão de produção (num intervalo de tempo por exemplo num dia)
VB	Valor de tensão nas baterias
VBC (*)	Relação entre a capacidade das baterias e a capacidade total de armazenamento
VS	Valor de tensão nos supercondensadores
VSC (*)	Relação entre a capacidade dos supercondensadores e a capacidade total total
VTA	Valor ponderado da tensão no armazenamento

(*) – $VBC+VSC=1$

O Valor ponderado da tensão no armazenamento (VTA) é calculado com base no valor da tensão nos terminais de cada um dos armazenamentos (baterias e supercondensadores) tendo em conta a capacidade de armazenamento de cada um.

A capacidade máxima de armazenamento do sistema (CMA) é calculada da seguinte forma:

$$CMA = \text{Armazenamento nas baterias} + \text{Armazenamento nos supercondensadores} \quad (5.1)$$

Logo a contribuição de cada módulo do armazenamento é:

$$VBC = \frac{\text{Armazenamento nas baterias}}{CMA}; \quad (5.2)$$

$$VSC = \frac{\text{Armazenamento nos supercondensadores}}{CMA}; \quad (5.3)$$

Tendo em consideração estas contribuições e o valor das tensões reais no armazenamento nas baterias (VB) e nos supercondensadores (VS), vem:

$$VTA = VBC.VB + VSC.VS \quad (5.4)$$

Este valor de VTA, será posteriormente usado para o cálculo do armazenamento disponível no sistema (CA).

O IP representa a corrente produzida por todas as fontes de energia renováveis, neste caso de duas fontes (IP1+IP2).

O cálculo do armazenamento (CA) disponível no sistema é feito tendo em conta a gama de variação da tensão no armazenamento e a capacidade máxima de armazenamento do sistema.

Considerando que a tensão no armazenamento pode variar de 21 V a 27 V, a gama de variação é de 6 V. Então em qualquer momento, $VTA - 21 = Y$.

A energia armazenada no sistema (EAS) ou capacidade de armazenamento usada, considerando que CMA corresponde a uma variação de 6 V, determina-se da seguinte forma:

$$EAS = \frac{(VTA - 21).CMA}{6} \quad (5.5)$$

O armazenamento disponível no sistema será a capacidade máxima de armazenamento instalada menos a capacidade de armazenamento usada no sistema, ou seja:

$$CA = CMA - \frac{(VTA - 21).CMA}{6} \quad (5.6)$$

Na construção dos fluxogramas considerou-se a seguinte simbologia:

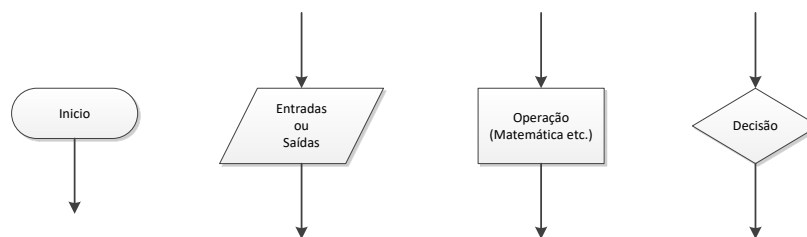


Figura 77 – Simbologia usada no fluxograma do algoritmo.

Tendo em conta o mencionado anteriormente foi elaborado o fluxograma do algoritmo de gestão energética da figura 78.

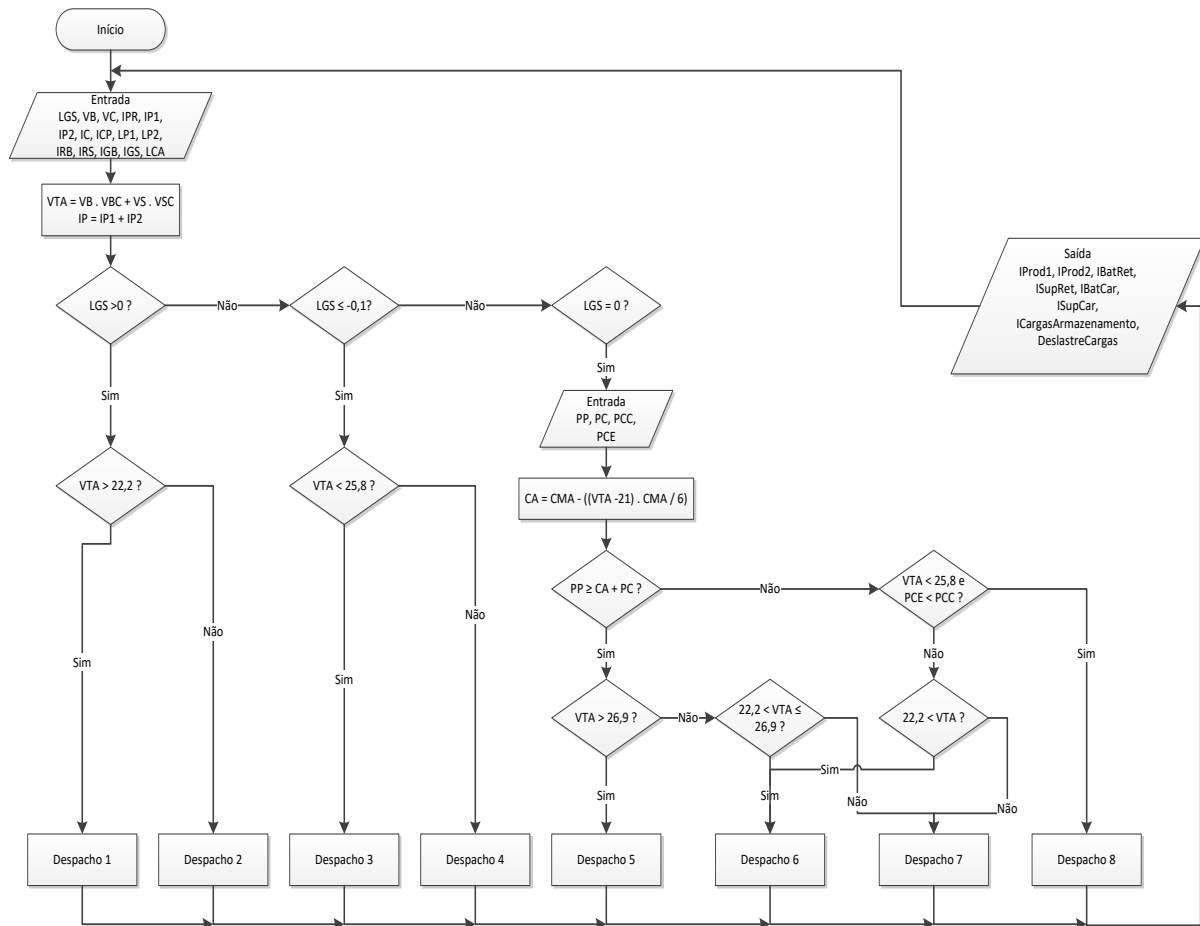


Figura 78 – Fluxograma do algoritmo de gestão energética do sistema.

De forma a facilitar-se a compreensão do fluxograma do algoritmo de gestão energética, a parte respeitante a cada um dos despachos foi construída em separado.

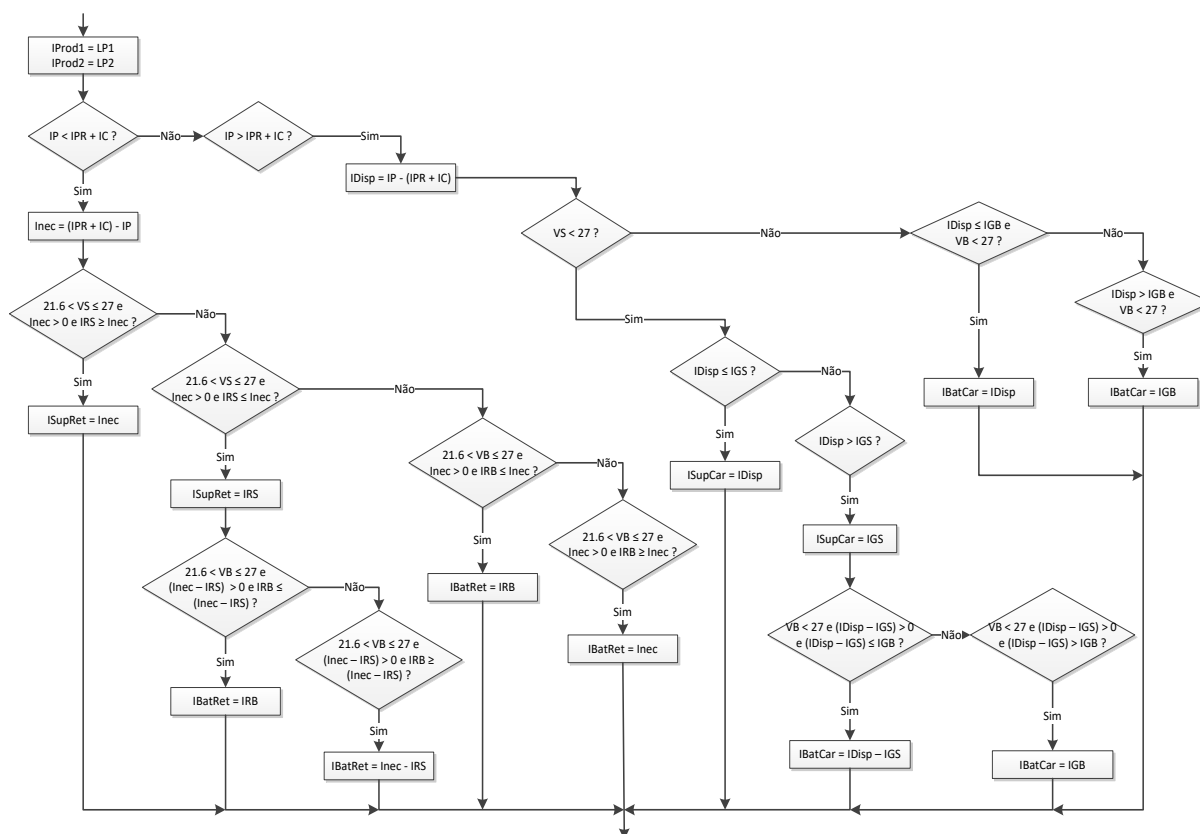


Figura 79 – Parte do fluxograma correspondente ao Despacho 1.

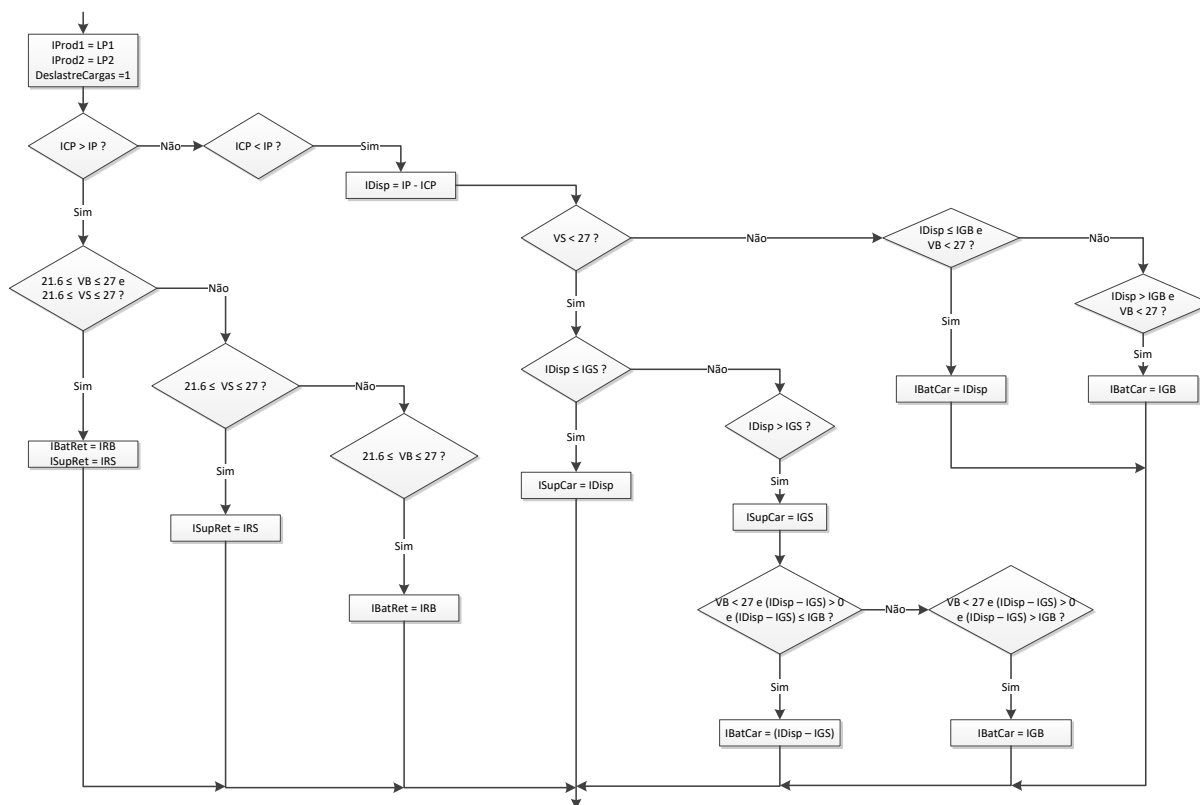


Figura 80 – Parte do fluxograma correspondente ao Despacho 2.

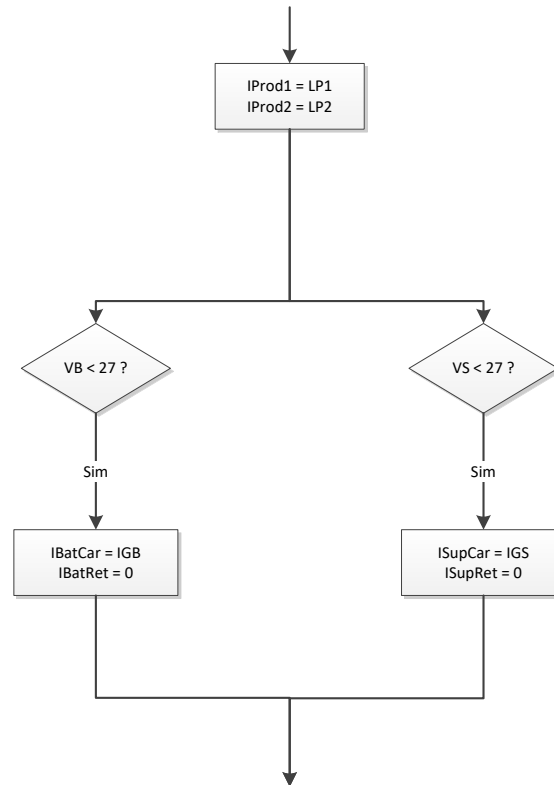


Figura 81 – Parte do fluxograma correspondente ao Despacho 3.

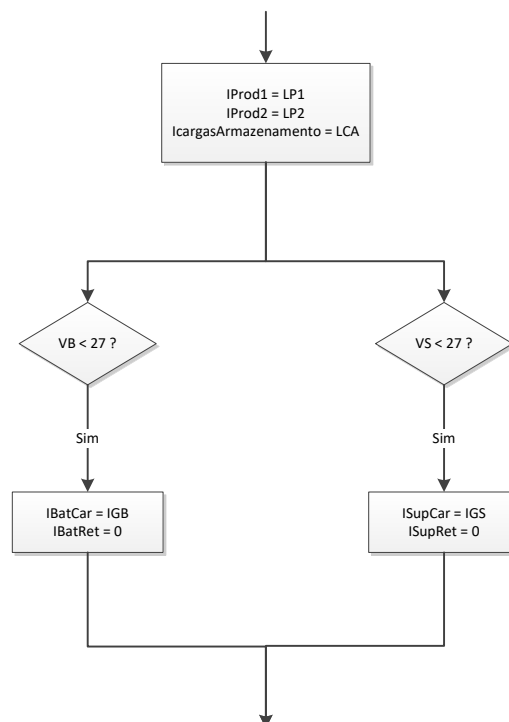


Figura 82 – Parte do fluxograma correspondente ao Despacho 4.

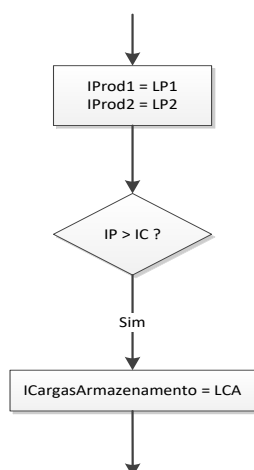


Figura 83 – Parte do fluxograma correspondente ao Despacho 5.

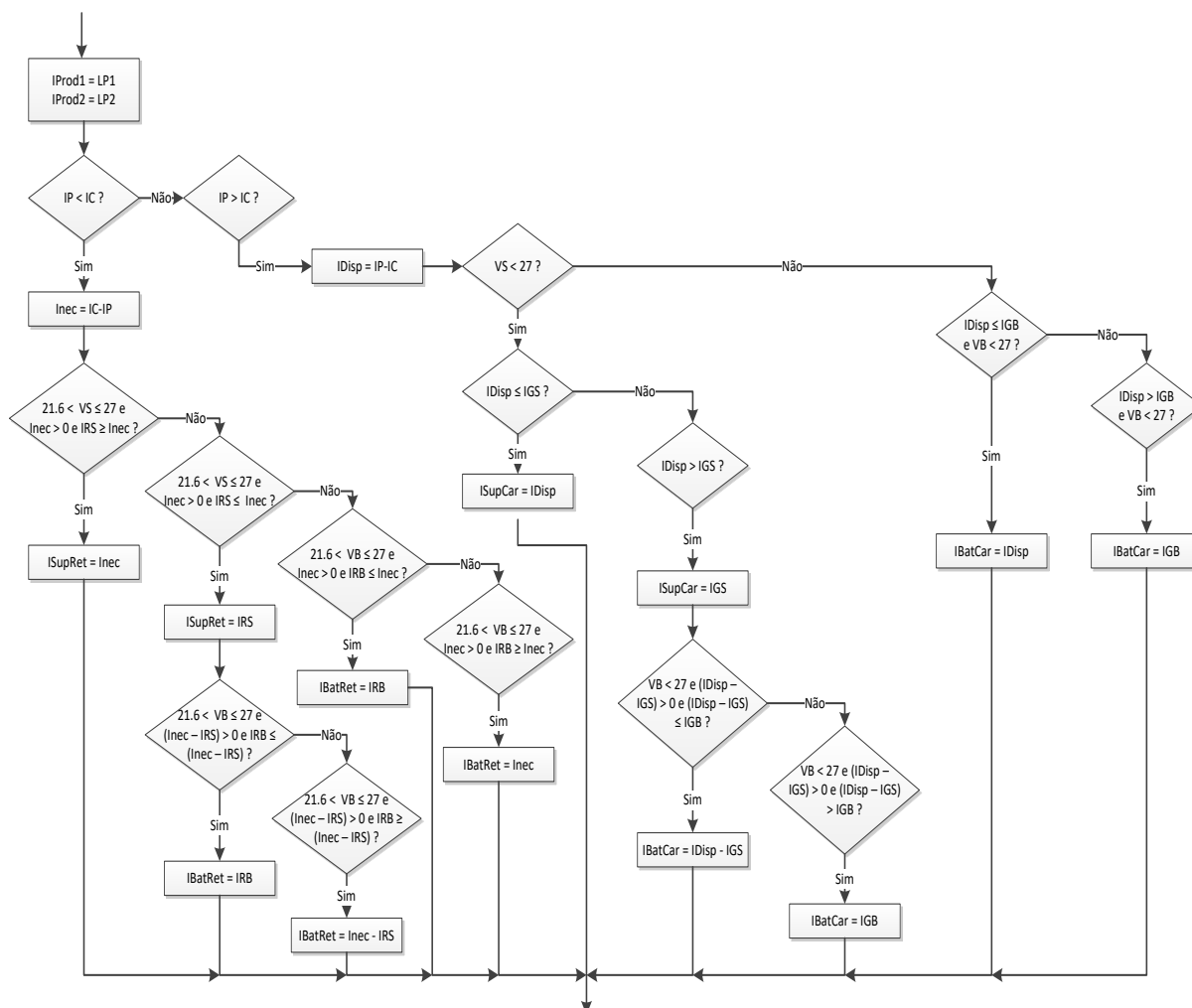


Figura 84 – Parte do fluxograma correspondente ao Despacho 6.

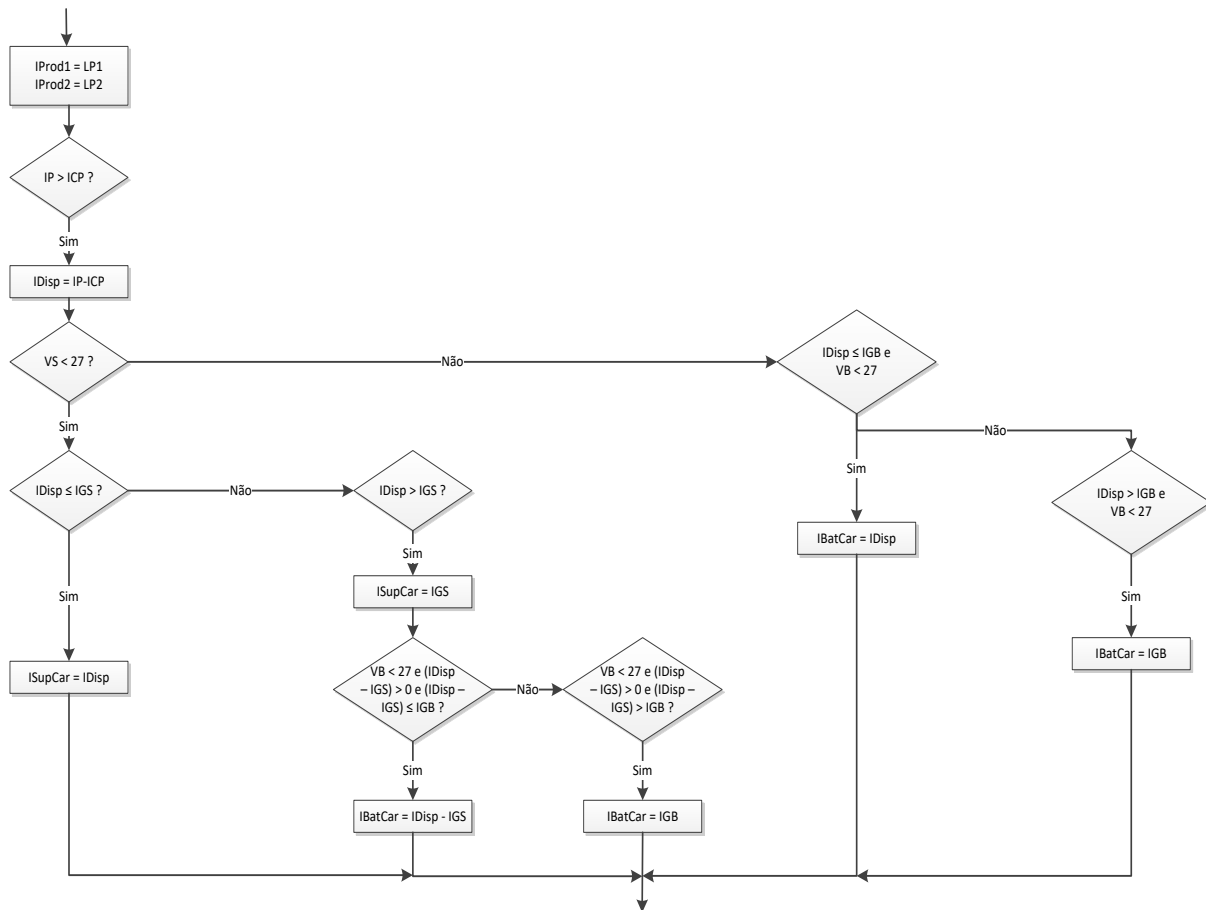


Figura 85 – Parte do fluxograma correspondente ao Despacho 7.

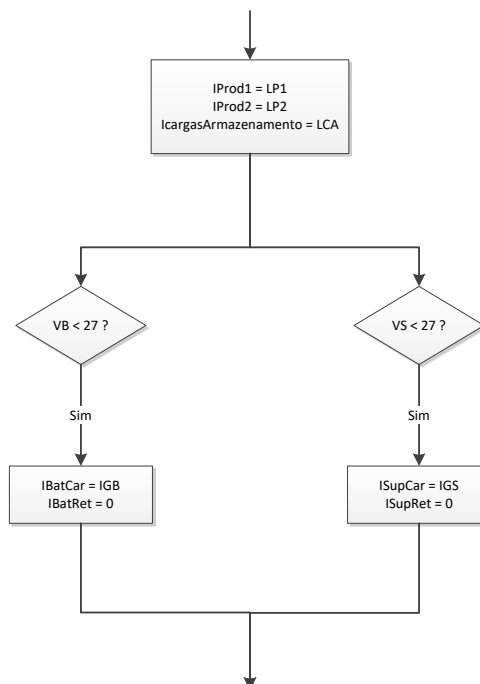


Figura 86 – Parte do fluxograma correspondente ao Despacho 8.

5.3 Simulação do algoritmo de gestão energética do sistema em *Simulink*

Para o teste da operacionalidade do algoritmo foi escolhida a ferramenta *Simulink* do *Matlab* na Versão 7.6 (R2010b).

A sua programação foi feita a partir de blocos, sendo o bloco a verde o ponto de partida inicial do algoritmo, os blocos a azul são para a tomada de decisão do despacho a seguir e nos blocos encarnados encontram-se as operações de cada um dos despachos.

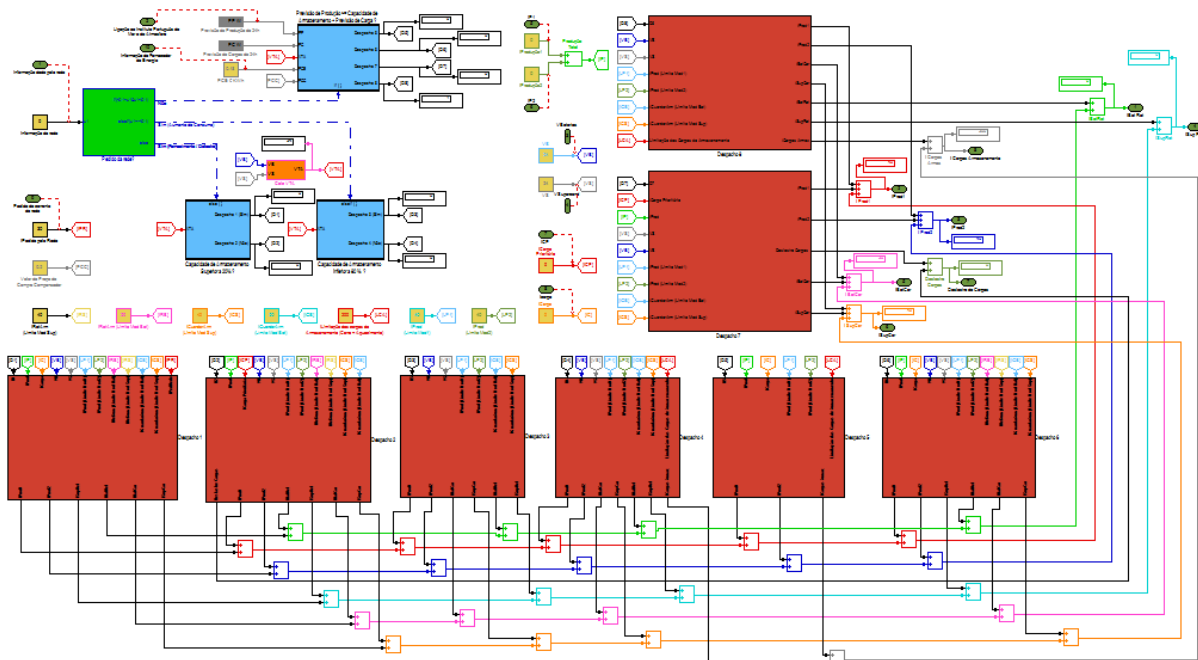


Figura 87 – Aspeto resultante da implementação do algoritmo de gestão energética no *Simulink*.

Quando se inicia a simulação, o bloco a verde recebe um sinal de tensão que representa um pedido da rede.

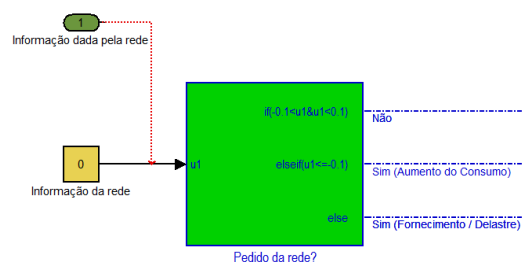


Figura 88 – Bloco aceitador do pedido da rede.

Se a informação da rede indicar uma tensão próxima de zero, significa que a rede não necessita de qualquer tipo de ajuda. Se esse valor de tensão for um valor negativo, considera-se um pedido no sentido do aumento do consumo visto pela rede. Por outro lado, se for um valor positivo, será interpretado como um pedido da rede no sentido de reduzir consumo visto pela rede seja

através de redução da carga ligada à rede, por via do deslastre de carga, seja por injeção de energia na rede.

Sendo a informação da rede um valor positivo, o caminho é o bloco azul do despacho 1 e 2. Caso seja negativo irá para o bloco azul do despacho 3 e 4. Se zero, irá para o bloco azul do despacho 5, 6, 7 e 8.

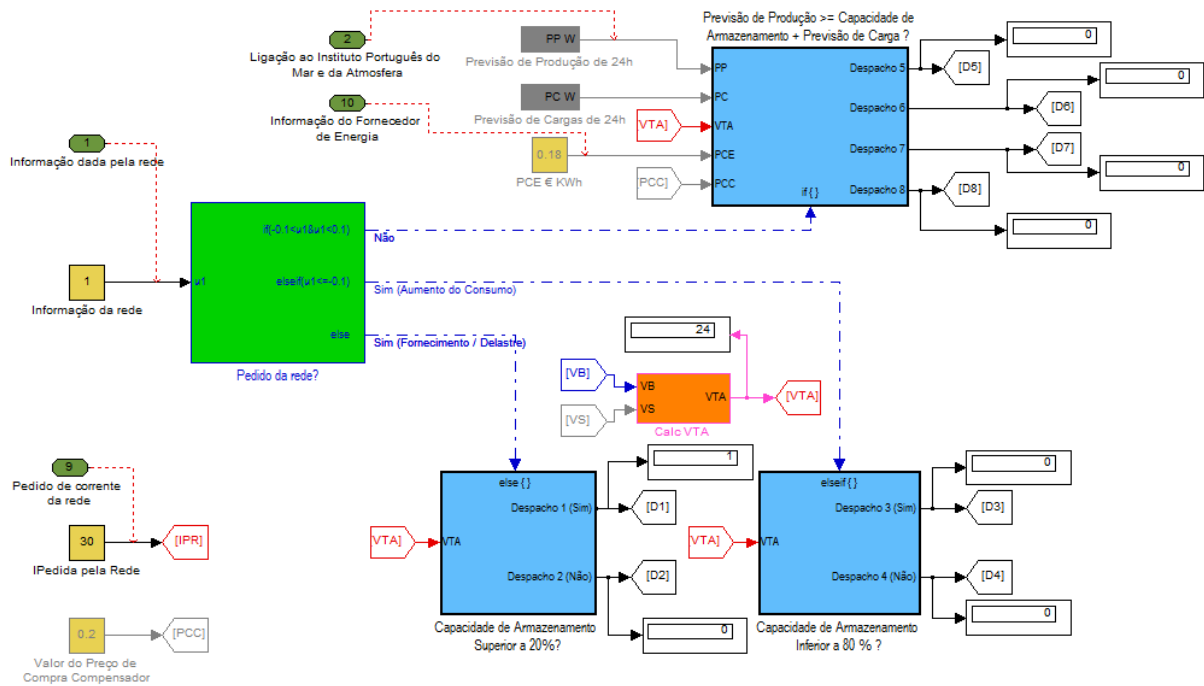


Figura 89 – Caminhos possíveis a partir da informação da rede

Sendo ativado o bloco azul do despacho 1 e 2 vai ser verificada se a capacidade de armazenamento é superior a 20%. Esta verificação é feita com base no cálculo do valor da tensão no armazenamento que é feito no bloco laranja a partir das informações das tensões das baterias e dos supercondensadores.

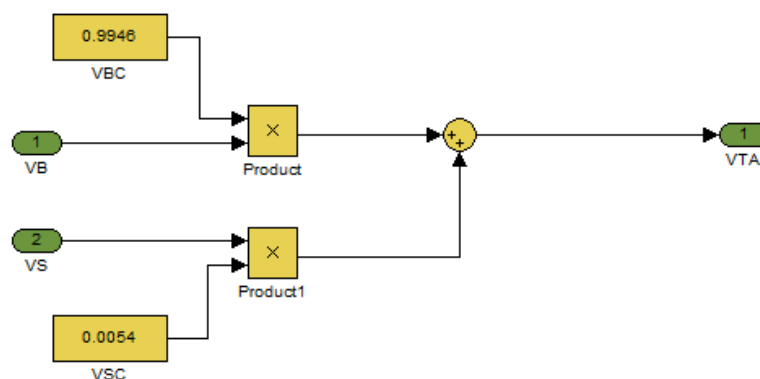


Figura 90 – Bloco de cálculo do valor da tensão no armazenamento.

Este valor da tensão no armazenamento é usado no interior do bloco azul do despacho 1 e 2, conforme se mostra na figura 91.

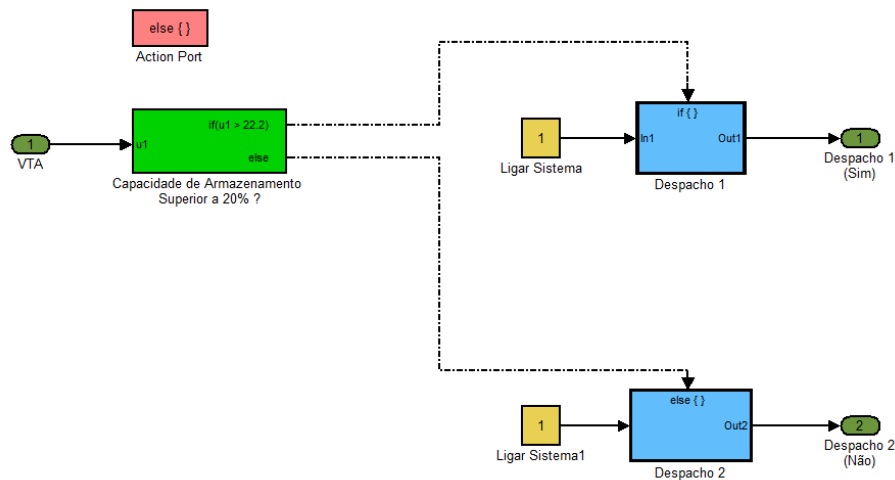


Figura 91 – Bloco do despacho 1 e 2.

Se o valor da tensão no armazenamento for superior a 22,2 V é ativado o despacho1. Senão é ativado o despacho 2.

Esta ativação é feita através de uma variável, que quando assume o valor 1, é transmitida a ordem para fora do bloco à etiqueta D1 (para o despacho 1) ou à etiqueta D2 (para o despacho 2).

Quando é ativado o bloco azul do despacho 3 e 4 vai ser verificada se a capacidade de armazenamento utilizada é inferior a 80%, verificando o valor da tensão no dispositivo de armazenamento.

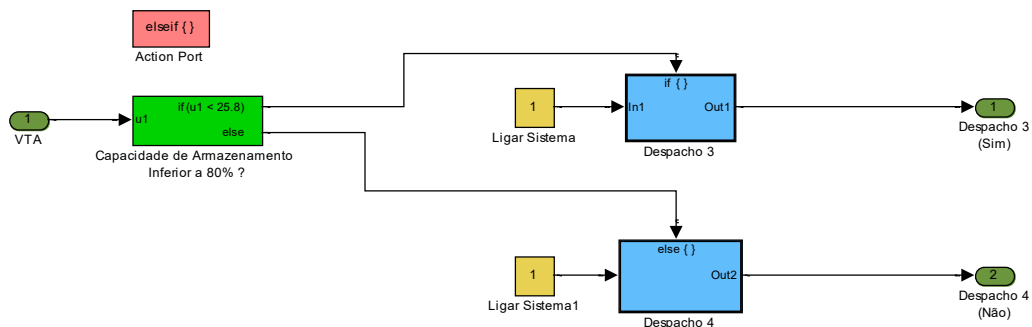


Figura 92 – Bloco do despacho 3 e 4.

Se o valor da tensão no armazenamento for inferior a 25,8 V é ativado o despacho 3. Senão é ativado o despacho 4.

A ativação é feita através de uma variável com o valor 1 que é transmitida para fora do bloco à etiqueta D3 (para o despacho 3) ou à etiqueta D4 (para o despacho 4).

Ao ser ativado o bloco azul do despacho 5, 6, 7 e 8 vai ser verificada se a Previsão de Produção é maior ou igual a soma da Capacidade de Armazenamento com a Previsão de Carga.

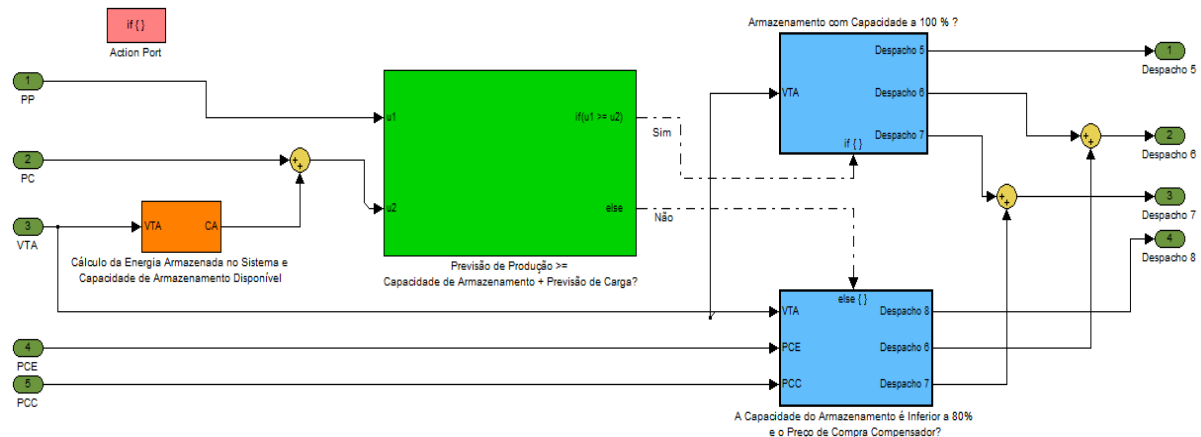


Figura 93 – Bloco do despacho 5, 6, 7 e 8.

Para se fazer a verificação é preciso a informação da Previsão de Produção passada pelo bloco Previsão de Produção de 24h que aceita um vetor com 96 valores para um dia, de 15 em 15 minutos, que são somados no interior deste bloco.

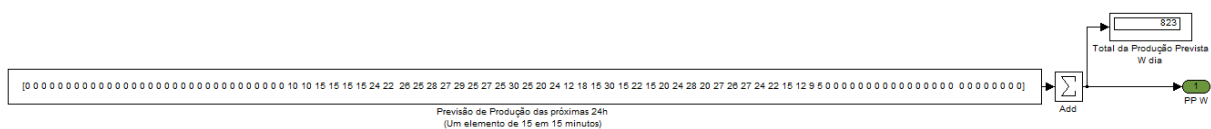


Figura 94 – Bloco de Previsão da Produção de 24 horas.

É também necessária a informação da Previsão de Cargas de um dia passada pelo bloco Previsão de Cargas de 24h que aceita um vetor com valores para um dia de 15 em 15 minutos, que são somados no interior deste bloco.

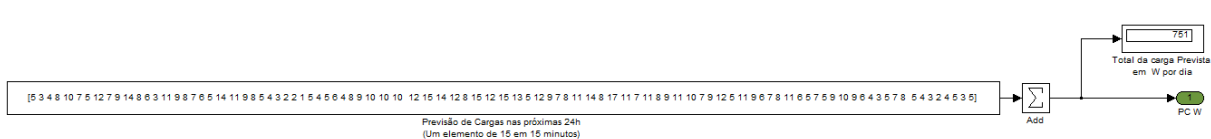


Figura 95 – Bloco de Previsão da Carga de 24 horas.

A partir do valor da tensão no armazenamento do bloco laranja da Figura 93 é feito o cálculo da energia armazenada no sistema e a capacidade de armazenamento disponível que irá ser passada para fora do bloco e somada com a previsão de cargas.

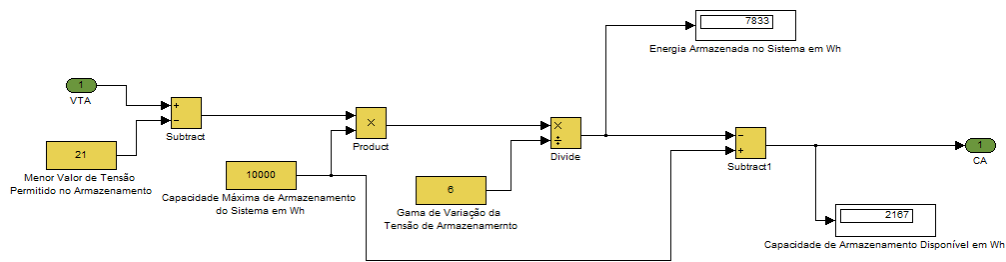


Figura 96 – Bloco de Cálculo da Energia Armazenada no Sistema e Capacidade de Armazenamento Disponível.

No bloco “Previsão de Produção $\geq$ Capacidade de Armazenamento Disponível + Previsão de Carga?”, comparam-se os valores de produção de energia com a soma da disponibilidade de armazenamento disponível com os valores de consumo. Se a produção é maior que a soma vai para o bloco com o nome “Armazenamento com capacidade a 100%?”. Senão, o caminho é o bloco “A Capacidade de Armazenamento é inferior a 80% e o Preço de Compra Compensador?”.

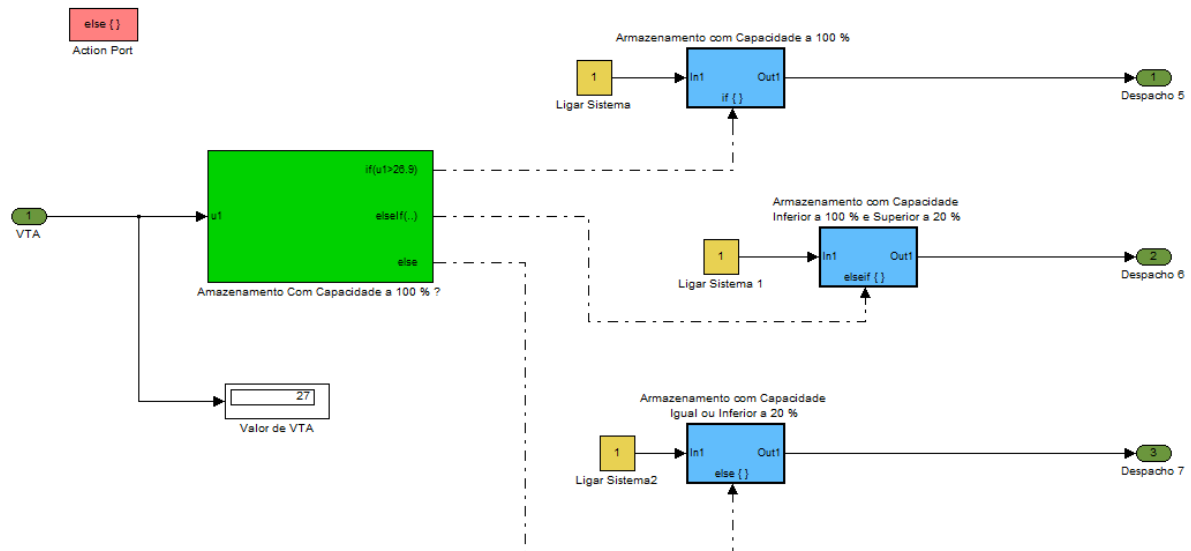


Figura 97 – Bloco “Armazenamento com capacidade a 100%?”.

No bloco “Armazenamento com capacidade a 100%?” usa-se o valor da tensão no armazenamento para verificar se o armazenamento está a 100%. Este encontra-se a 100% para valores superiores a 26,9 V. Se sim, é ativado o despacho 5.

Senão se o armazenamento é inferior a 100% e superior a 20%, ou seja, com o valor da tensão no armazenamento superior a 22,2 V e inferior ou igual a 26,9 V é ativado o despacho 6.

Caso o armazenamento seja inferior ou igual a 20% é ativado o despacho 7.

A ativação é feita através de uma variável com o valor 1 que é transmitida para fora do bloco à etiqueta D5 (para o despacho 5), à etiqueta D6 (para o despacho 6) ou à etiqueta D7 (para o despacho 7).

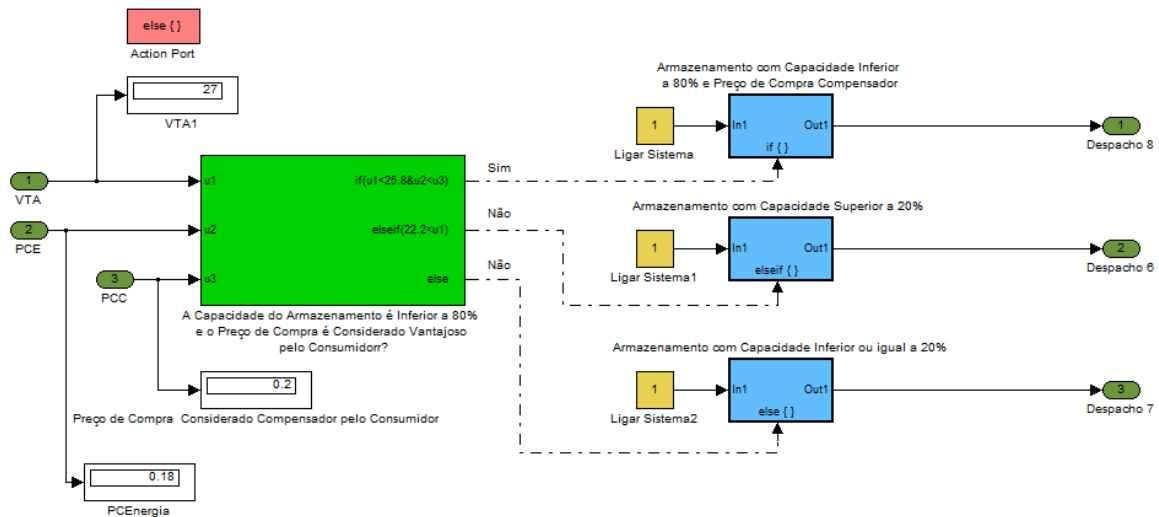


Figura 98 – Bloco “A Capacidade do Armazenamento é Inferior a 80% e o Preço de Compra Compensador?”.

Despacho 1

No despacho 1, foram implementadas as entradas e saídas indicadas na figura 99, estando as entradas na parte superior e as saídas na parte inferior.

No despacho 1 pretende-se que toda a energia proveniente das fontes renováveis possa ser aproveitada, embora o software desenvolvido permita uma limitação da produção feita nos valores máximos da corrente da produção um e da produção dois. Esta limitação é importante de forma a impedir que seja ultrapassado o valor de corrente máxima para o qual os conversores DC-DC foram dimensionados.

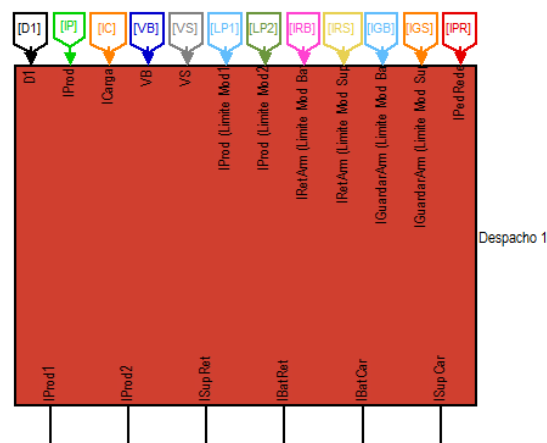


Figura 99 – Entradas e saídas do bloco do Despacho 1.

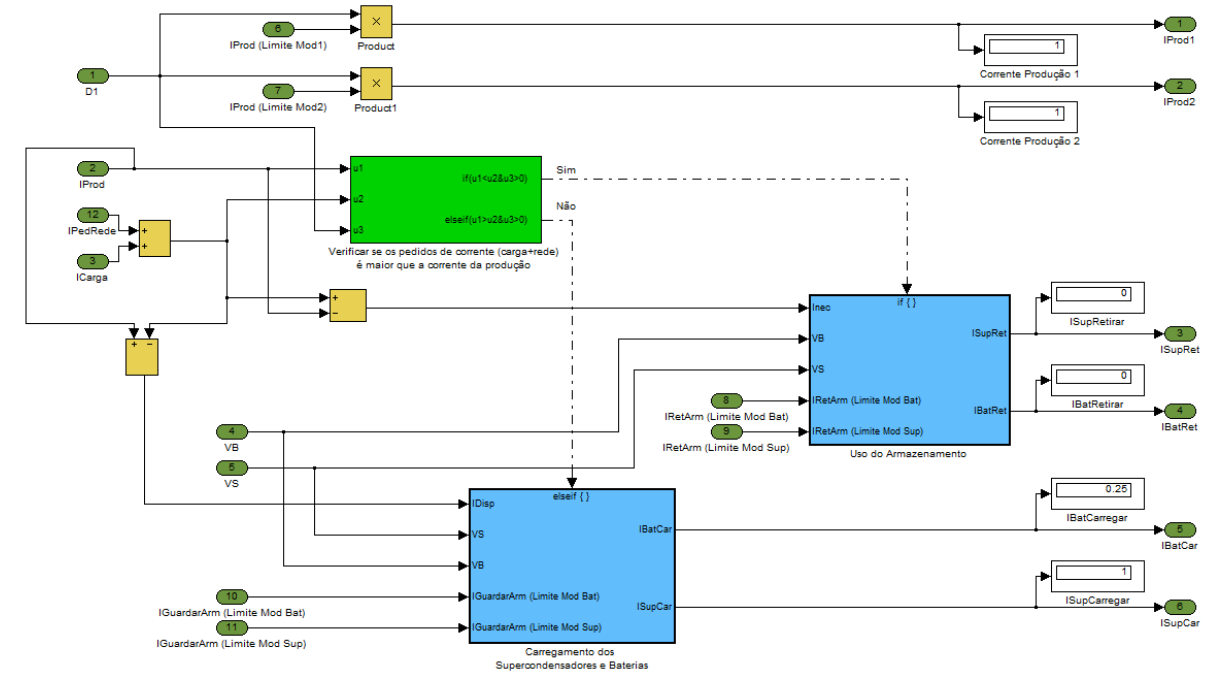


Figura 100 – Bloco do Despacho 1.

No despacho 1 é verificado se os pedidos de corrente (carga + rede) são maiores do que a corrente de produção e ainda é garantido que o bloco só funciona com D1 ativado (com o valor 1) ou seja com a indicação do funcionamento do despacho 1. Se forem verificadas e verdadeiras estas condições é executado o bloco com o nome “Uso do Armazenamento”.

Senão vai verificar-se se os pedidos de corrente (carga + rede) são menores do que a corrente de produção. Sendo verdade é executado o bloco com o nome “Carregamento dos Supercondensadores e Baterias”. De referir que nos pedidos de rede é indicado o valor para a corrente a injetar.

a) Uso do Armazenamento

Quando é ativado o bloco “Uso do Armazenamento” podem dar-se três situações: retirada de corrente dos supercondensadores; retirada de corrente dos supercondensadores e das baterias; retirada de corrente das baterias. Primeiro é dada prioridade ao uso da corrente dos supercondensadores e se esta não tiver disponível ou não for suficiente recorre-se às baterias.

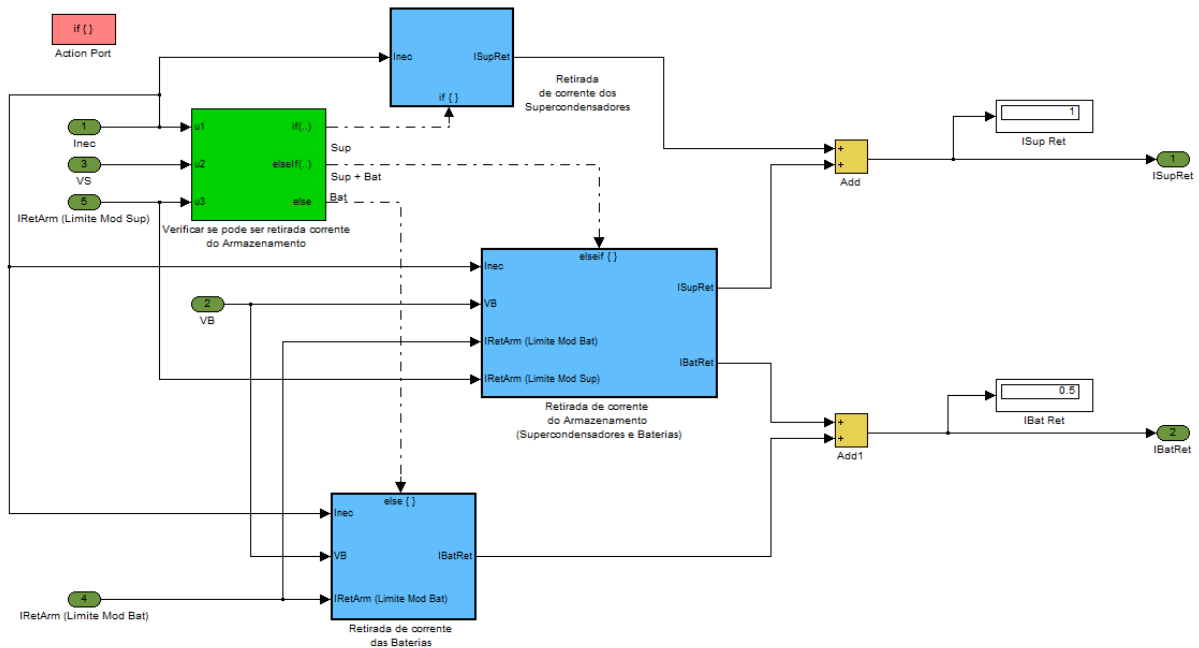


Figura 101 –Bloco do “Uso do Armazenamento”.

Se o valor de tensão nos supercondensadores se encontrar entre 21,6 V e 27 V significa que existe energia disponível nos supercondensadores. Para além disso tem que haver uma corrente necessária (soma da corrente pedida pela rede com a corrente da carga, menos a corrente da produção) e uma corrente limite que se pode retirar dos supercondensadores. Esta deve ser maior ou igual à corrente necessária. Cumpridas as condições, a corrente retirada dos supercondensadores será igual à corrente necessária.

Se existir energia nos supercondensadores (tensão entre 21,6 V e 27 V) e a corrente necessária seja positiva, mas com o valor máximo de corrente que pode ser retirada dos supercondensadores menor ou igual à corrente necessária. Nesta situação será ativado o bloco “Retirada de corrente do Armazenamento (Supercondensadores e Baterias)”. Senão é ativado o bloco “Retirada de corrente das Baterias”.

No bloco “Retirada de corrente do Armazenamento (Supercondensadores e Baterias)”, uma vez que a corrente necessária é maior do que a que o módulo dos supercondensadores pode fornecer vem que o valor desejado de corrente a retirar dos supercondensadores é igual ao valor máximo de corrente que pode ser retirada dos supercondensadores e a restante corrente terá que ser retirada das baterias.

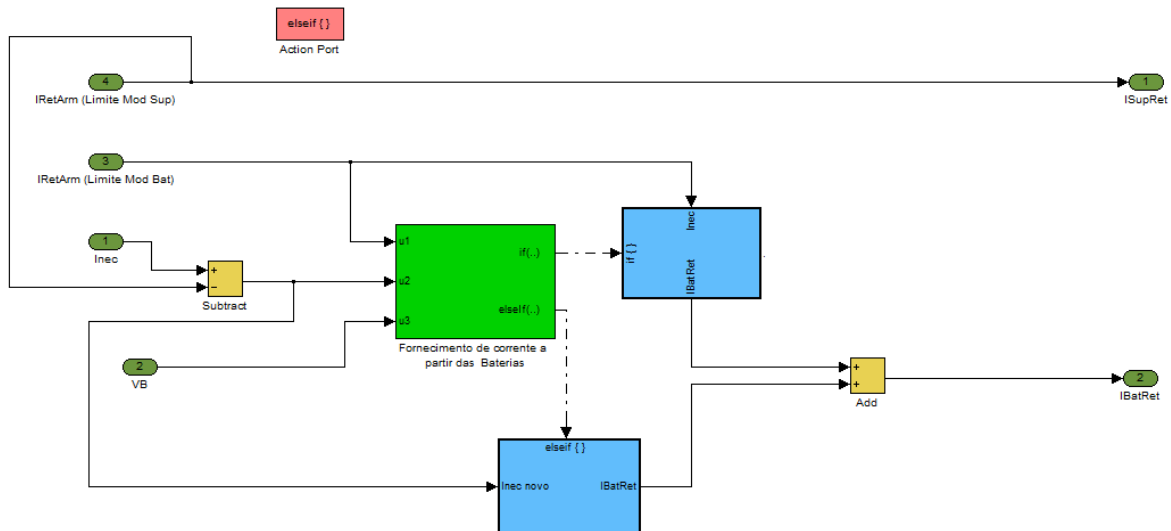


Figura 102 – Bloco “Retirada de corrente do Armazenamento (Supercondensadores e Baterias)”.

Quando é ativado o bloco “Fornecimento de corrente a partir das Baterias”, testa-se se as baterias são capazes de fornecer corrente. Verifica-se também se a corrente necessária menos o valor máximo de corrente que pode ser retirada dos supercondensadores é maior que zero. Ainda se testa se a corrente limite retirada das baterias é menor ou igual à corrente necessária menos o valor máximo de corrente que pode ser retirada dos supercondensadores. Se estas condições forem cumpridas, o valor desejado de corrente a retirar das baterias é igual ao valor máximo de corrente que pode ser retirada das baterias.

Se o valor de tensão nas baterias for superior a 21,6 V e menor ou igual a 27 V, a diferença entre a corrente necessária e o valor máximo de corrente que pode ser retirado dos supercondensadores for maior que zero e o valor máximo de corrente que pode ser retirada das baterias for maior ou igual que a diferença entre a corrente necessária e o valor máximo de corrente que pode ser retirada dos supercondensadores. Cumpridas estas condições, o valor desejado de corrente a retirar das baterias vai ser igual à diferença entre o valor de corrente necessária e o valor máximo de corrente que pode ser retirada dos supercondensadores.

Quando é percorrido o bloco “Retirada de corrente das Baterias” as baterias deverão ser capazes de fornecer a corrente, o que é garantido com um nível de tensão entre 21,6 V e 27 V, bem como a corrente necessária ser positiva e o valor máximo de corrente, que pode ser retirada das baterias, ser menor ou igual ao valor da corrente necessária. Verificando-se todos estes requisitos o valor desejado de corrente a retirar das baterias é igual ao valor máximo de corrente que pode ser retirada das baterias.

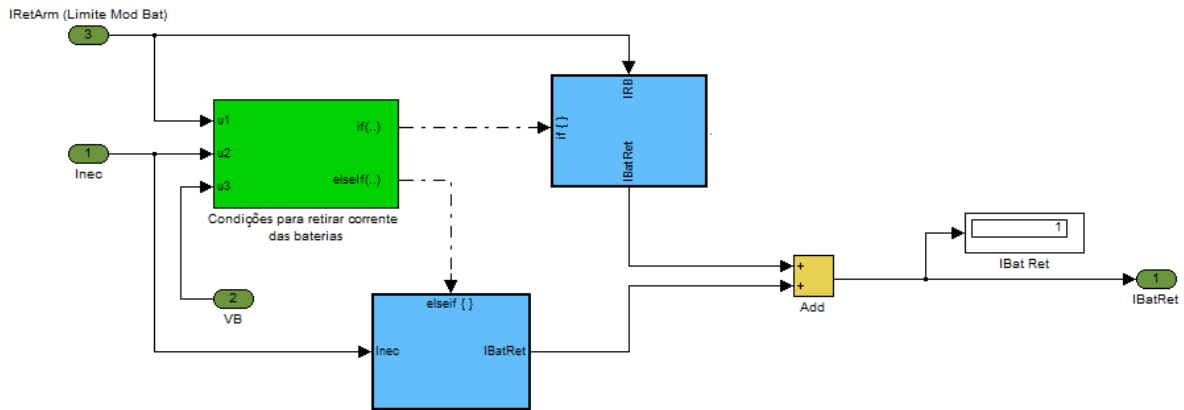


Figura 103 – Bloco “Retirada de corrente das Baterias”.

Caso as baterias forem capazes de fornecer corrente (tensão maior que 21,6 V e menor ou igual a 27 V), a corrente necessária for positiva e o valor máximo de corrente que pode ser retirada das baterias for maior ou igual que o valor de corrente necessária, o valor desejado da corrente a retirar das baterias é igual ao valor da corrente necessária.

b) Carregamento dos Supercondensadores e Baterias

Nos carregamentos é dada prioridade ao módulo dos supercondensadores e só se houver corrente disponível é que se procede à carga do módulo das baterias.

Se a tensão nos supercondensadores for inferior a 27 V, significa que estão disponíveis para serem carregados, vai ser ativado o bloco “Carregar os Supercondensadores e eventualmente as baterias”. Senão ativa-se o bloco “Carregar eventualmente as baterias”.

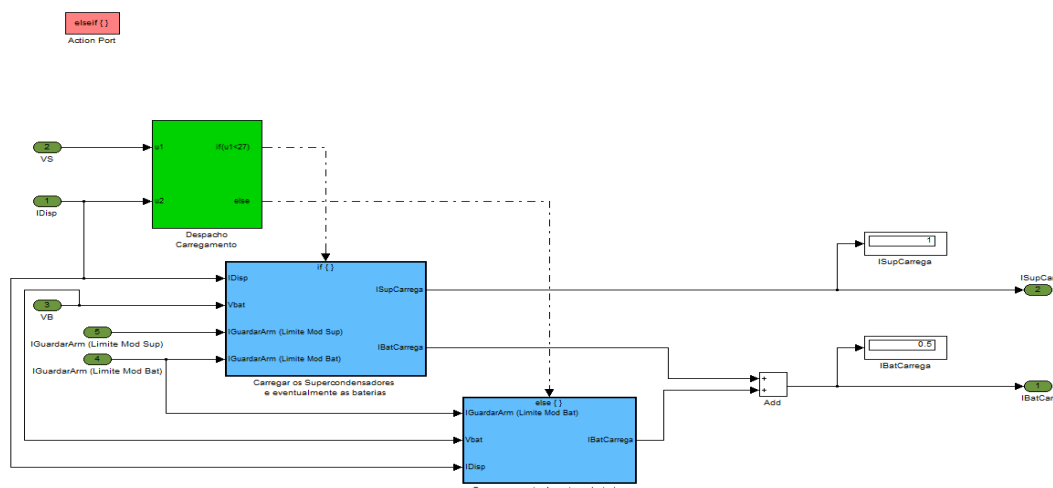


Figura 104 – Bloco “Carregamento dos Supercondensadores e Baterias”.

b1) Carregar os supercondensadores e eventualmente as baterias

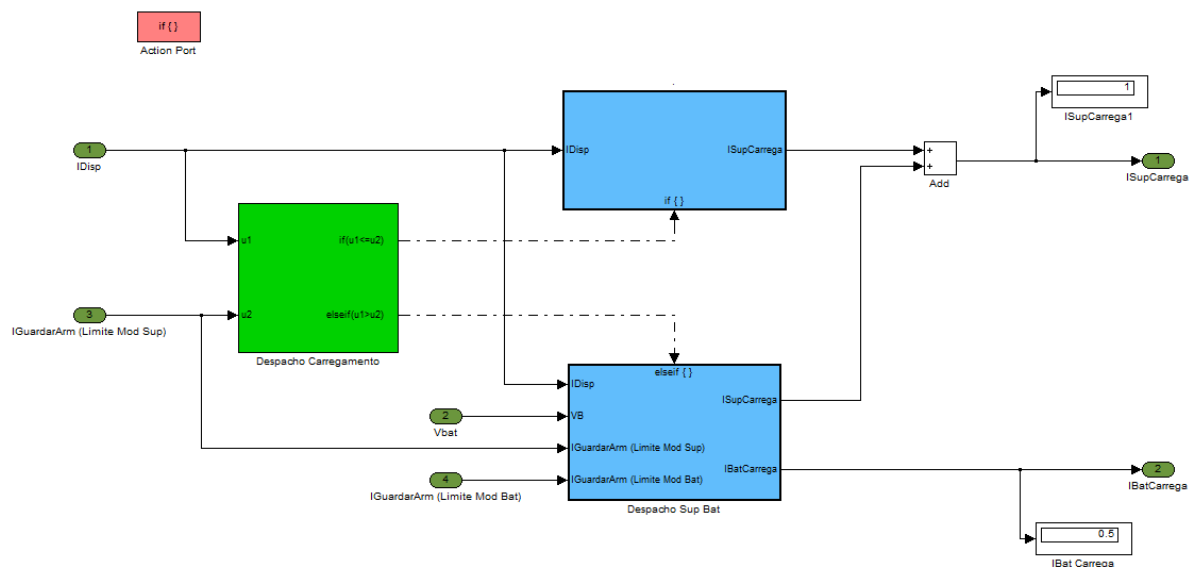


Figura 105 – Bloco “Carregar os supercondensadores e eventualmente as baterias”.

Se o valor de corrente disponível for menor ou igual ao valor máximo de corrente com que podem ser carregados os supercondensadores então o valor desejado de corrente para carregar os supercondensadores é igual ao valor da corrente disponível. Senão se o valor de corrente disponível for maior que o valor máximo de corrente com que podem ser carregados os supercondensadores é executado o bloco “Despacho Sup Bat”.

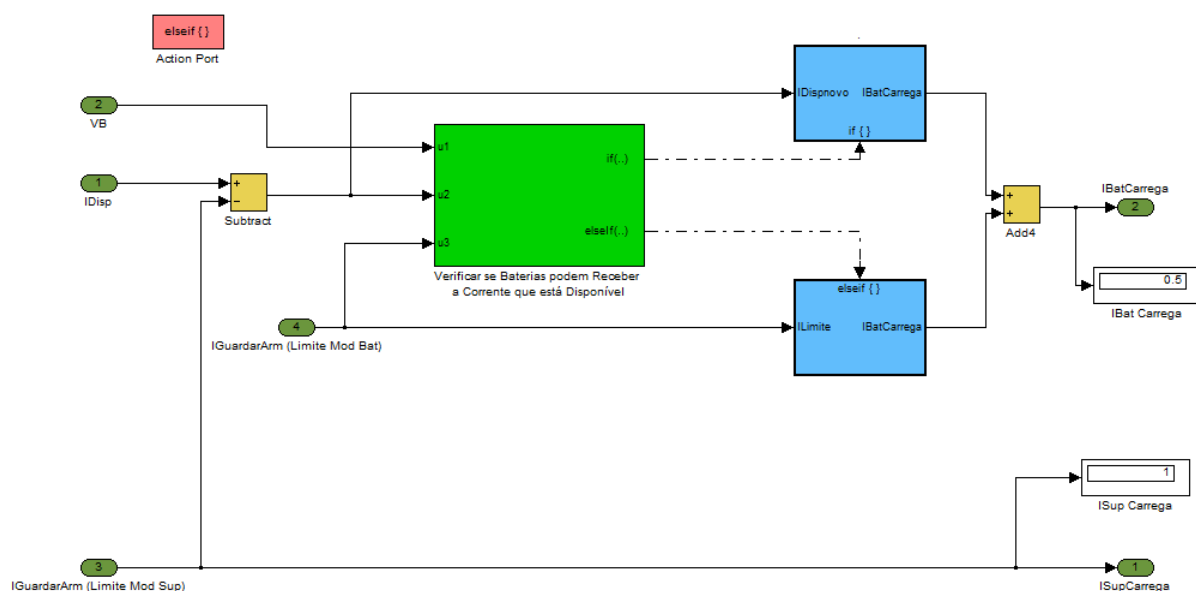


Figura 106 – Bloco “Despacho Sup Bat”.

No bloco “Despacho Sup Bat”, o valor desejado de corrente para carregar os supercondensadores é igual ao valor máximo de corrente com que podem ser carregados os supercondensadores.

Se o valor de tensão nas baterias for menor que 27 V e o valor da corrente disponível menos o valor máximo de corrente com que podem ser carregados os supercondensadores for positivo e o valor da corrente disponível menos o valor máximo de corrente com que podem ser carregados os supercondensadores for menor ou igual ao valor máximo de corrente com que podem ser carregadas as baterias vem que o valor desejado de corrente para carregar as baterias é igual ao valor da corrente disponível menos o valor máximo de corrente com que podem ser carregados os supercondensadores. Senão se o valor de tensão nas baterias for menor que 27 V e o valor da corrente disponível menos o valor máximo de corrente com que podem ser carregados os supercondensadores for positivo e o valor da corrente disponível menos o valor máximo de corrente com que podem ser carregados os supercondensadores for maior que o valor máximo de corrente com que podem ser carregadas as baterias resulta que o valor desejado de corrente para carregar as baterias é igual ao valor máximo de corrente com que podem ser carregadas as baterias.

b2) Carregar eventualmente as baterias

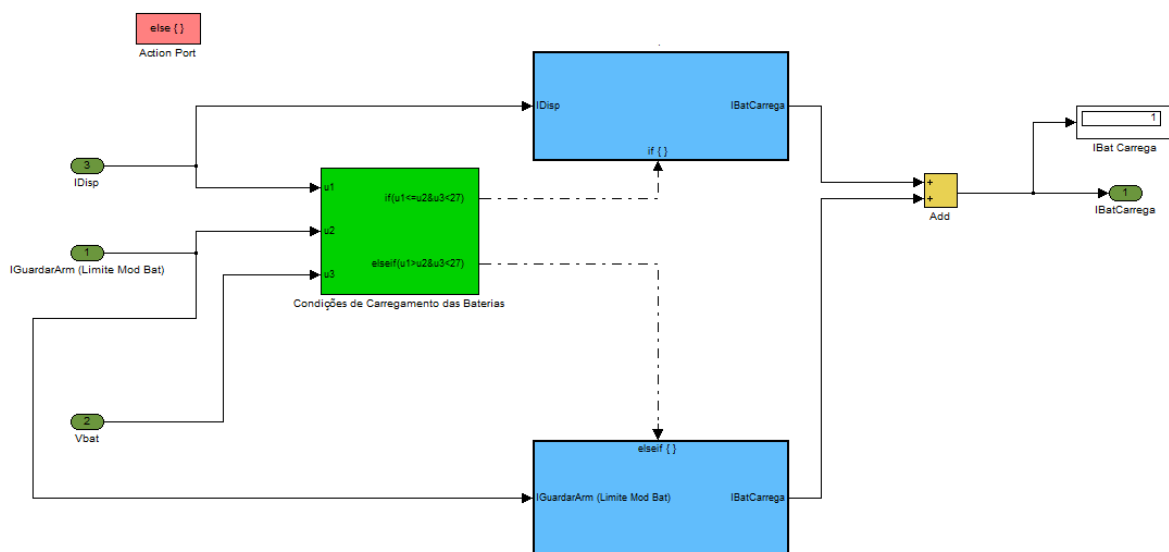


Figura 107 – Bloco “Carregar eventualmente as baterias”.

Se o valor da corrente disponível for menor ou igual ao valor máximo de corrente com que podem ser carregadas as baterias e o valor de tensão nas baterias menor que 27 V, então o valor desejado de corrente para carregar as baterias é igual ao valor da corrente disponível. Senão se o valor da corrente disponível for maior que o valor máximo de corrente com que podem ser carregadas as baterias e o valor de tensão nas baterias menor que 27 V, tem-se que o valor desejado de corrente para carregar as baterias é igual ao valor máximo de corrente com que podem ser carregadas as baterias.

Despacho 2:

No despacho 2, foram implementadas as entradas e saídas mostradas na figura 108, estando as entradas na parte superior e as saídas na parte inferior.

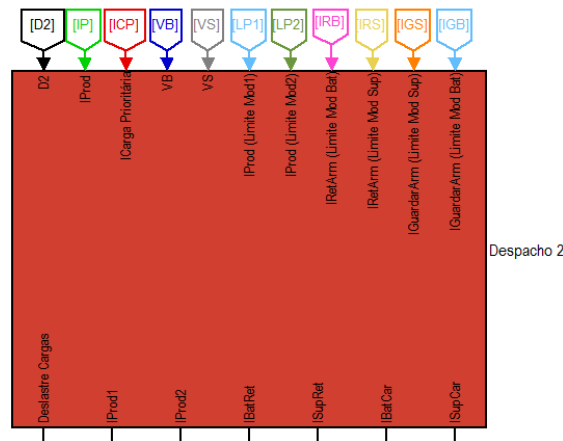


Figura 108 – Entradas e saídas do bloco do Despacho 2.

No bloco do despacho 2 vai-se aproveitar ao máximo a energia das fontes renováveis, embora possa haver uma limitação da produção feita nos valores máximos, de corrente da produção um e da produção dois.

É feito um teste no sentido de se saber se é necessária corrente ou sobra corrente.

Se o valor real da corrente de carga prioritária for maior que o valor real de corrente de produção e o despacho 2 se encontrar ativo (com o valor 1), resulta num pedido de auxílio ao armazenamento e é executado o bloco “Testar tensão VB e VS”.

Senão se o valor real da corrente de carga prioritária for menor que o valor real de corrente de produção e o despacho 2 se encontre ativo (com o valor 1), então no bloco “Quanto Sobra?” é calculada a diferença entre o valor real de corrente de produção com o valor real da corrente de carga prioritária. O resultado é transmitido ao bloco “Despacho Carregamento” que vai ser executado.

a) Bloco “Testar tensão VB e VS”

Se houver um pedido de auxílio ao armazenamento, o valor de tensão nas baterias for maior ou igual a 21.6 V e menor ou igual a 27 V e a tensão nos supercondensadores também for maior ou igual a 21.6 V e menor ou igual a 27 V faz com que o valor desejado de corrente a retirar das baterias seja o valor máximo de corrente que pode ser retirada das baterias e o valor desejado de corrente a retirar dos supercondensadores seja o valor máximo de corrente que pode ser retirada dos supercondensadores.

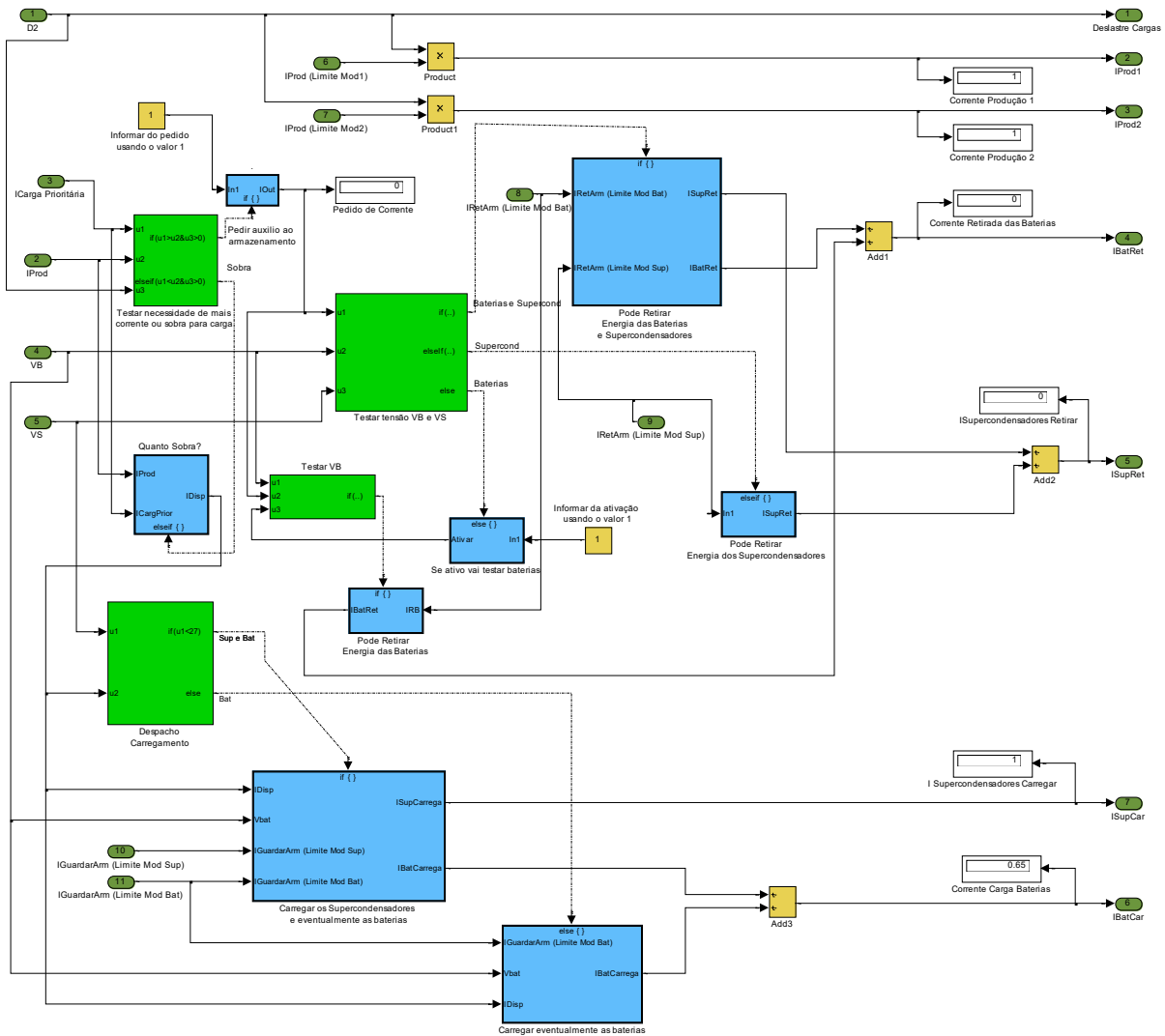


Figura 109 – Bloco do Despacho 2.

Senão se houver um pedido de auxílio ao armazenamento e o valor de tensão nos supercondensadores for maior ou igual a 21,6 V e menor ou igual a 27 V leva a que o valor desejado de corrente a retirar dos supercondensadores seja igual ao valor máximo de corrente que pode ser retirada dos supercondensadores.

Senão vai testar se o nível de tensão nas baterias é maior ou igual a 21,6 V e menor ou igual a 27 V. Se sim, o valor desejado de corrente a retirar das baterias é igual ao valor máximo de corrente que pode ser retirada das baterias.

b) Bloco “Despacho Carregamento”

A implementação do bloco “Despacho Carregamento” e dos dois resultantes a partir deste: “Carregar os supercondensadores e eventualmente as baterias” e “Carregar eventualmente as baterias” e são iguais à do conteúdo do bloco “Carregamento dos Supercondensadores e Baterias” usado no bloco do Despacho 1.

Despacho 3:

No despacho 3, foram usadas as entradas e saídas mostradas na figura 110, estando as entradas na parte superior e as saídas na parte inferior.

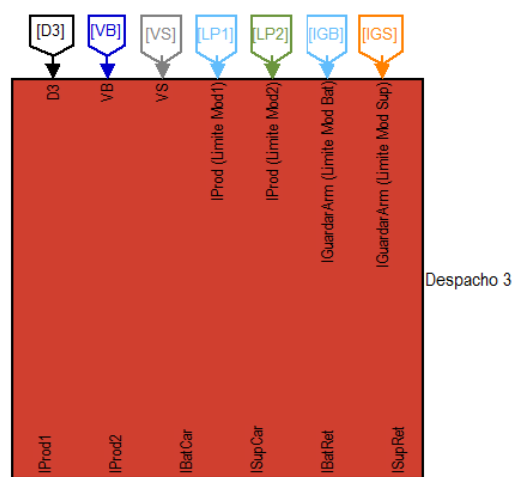


Figura 110 – Entradas e saídas do bloco do Despacho 3.

No bloco do despacho 3 também se aproveita ao máximo a energia das fontes renováveis, podendo haver uma limitação da produção feita no valor máximo, de corrente da produção um e no valor máximo de corrente da produção dois.

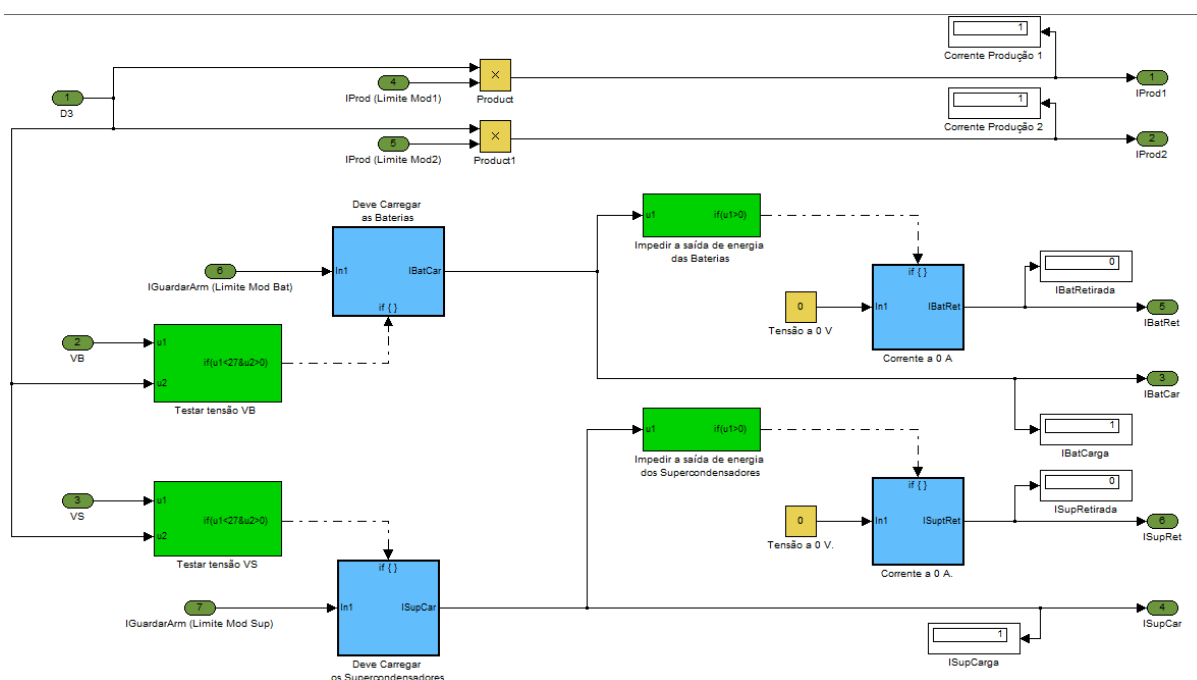


Figura 111 – Bloco do Despacho 3.

Se o despacho 3 se encontrar ativo e o valor de tensão nas baterias for inferior a 27 V, vai ser executado o bloco “Deve carregar as Baterias” fazendo com que o valor desejado de corrente para carregar as baterias seja igual ao valor máximo de corrente com que podem ser carregadas as baterias e que o valor desejado de corrente a retirar das baterias seja zero.

Se o despacho 3 se encontrar ativo e o valor de tensão nos supercondensadores for inferior a 27 V, vai ser executado o bloco “Deve carregar os Supercondensadores” levando a que o valor desejado de corrente para carregar os supercondensadores seja igual ao valor máximo de corrente com que podem ser carregados os supercondensadores e que o valor desejado de corrente a retirar dos supercondensadores seja zero.

Despacho 4:

No despacho 4, foram usadas as entradas e saídas mostradas na figura 112, estando as entradas na parte superior e as saídas na parte inferior.

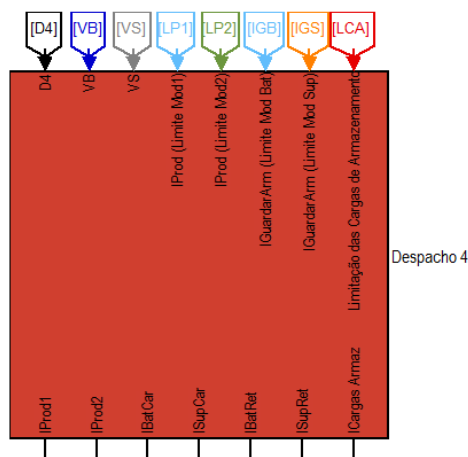


Figura 112 – Entradas e saídas do bloco do Despacho 4.

No bloco do despacho 4 aproveitam-se ao máximo a energia das fontes renováveis, podendo haver uma limitação da produção feita no valor máximo, de corrente da produção um e no valor máximo de corrente da produção dois.

Se o despacho 4 se encontrar ativo e o valor de tensão nas baterias for inferior a 27 V, vai ser executado o bloco “Deve carregar as Baterias” fazendo com que o valor desejado de corrente para carregar as baterias seja igual ao valor máximo de corrente com que podem ser carregadas as baterias e que o valor desejado de corrente a retirar das baterias seja zero.

Se o despacho 4 se encontrar ativo e o valor de tensão nos supercondensadores for inferior a 27 V, vai ser executado o bloco “Deve carregar os Supercondensadores” levando a que o valor desejado de corrente para carregar os supercondensadores seja igual ao valor máximo de corrente com que podem ser carregados os supercondensadores e que o valor desejado de corrente a retirar dos supercondensadores seja zero.

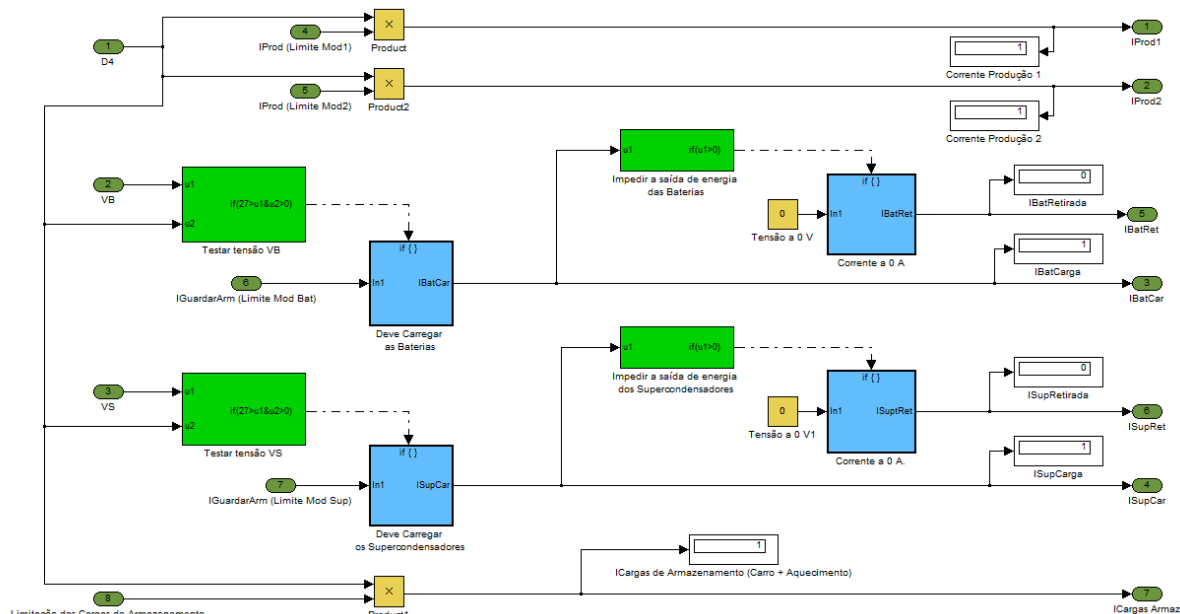


Figura 113 – Bloco do Despacho 4.

São ainda ligadas as cargas de armazenamento (carro elétrico mais aquecimento) devendo para tal estar ativo o despacho 4. Pode ainda ser definido um valor de forma a fazer-se a limitação da corrente que vai para as cargas de armazenamento.

Despacho 5:

Na figura 114, podem ver-se as entradas e saídas usadas no despacho 5, estando as entradas na parte superior e as saídas na parte inferior.

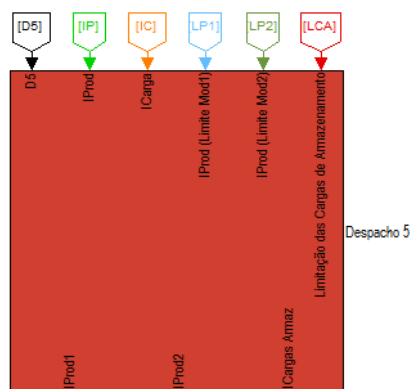


Figura 114 – Entradas e saídas do bloco do Despacho 5.

No bloco do despacho 5 procura-se o máximo aproveitamento da energia das fontes renováveis, podendo haver uma limitação da produção feita no valor máximo, de corrente da produção um e no valor máximo de corrente da produção dois.

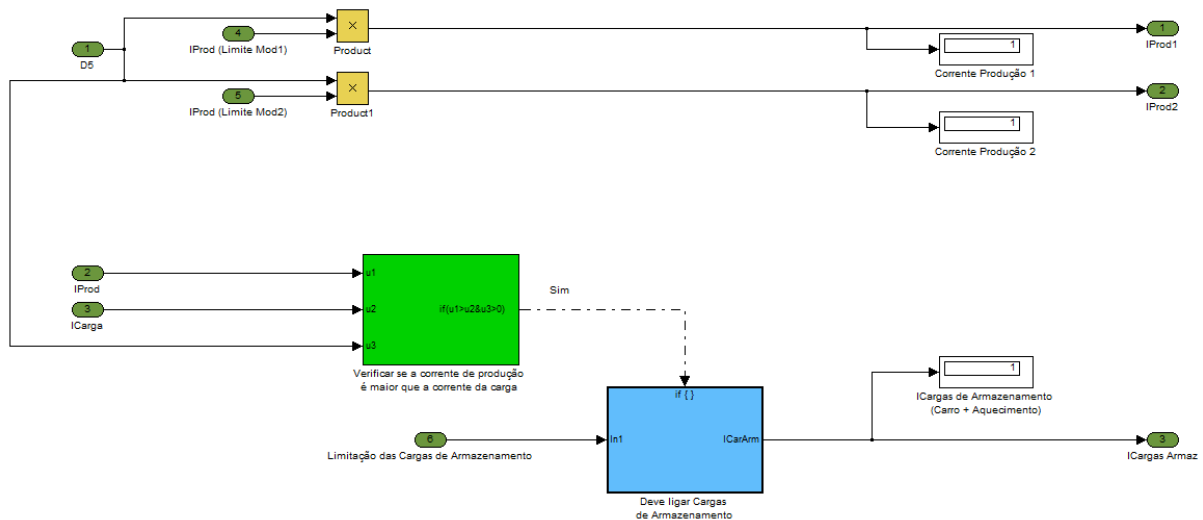


Figura 115 – Bloco do Despacho 5.

Se o despacho 5 estiver ativo e o valor real de corrente das produções for maior que a corrente de carga, vai ser ligado o bloco “Deve ligar Cargas de Armazenamento”. Deste vai sair a ligação das cargas de armazenamento (carro + aquecimento) podendo ser limitado o seu valor de corrente, através da limitação do valor das cargas de armazenamento que se encontra na entrada do bloco “Deve ligar Cargas de Armazenamento”.

Despacho 6:

Na figura 116, mostram-se as entradas e saídas usadas no despacho 6, estando as entradas na parte superior e as saídas na parte inferior.

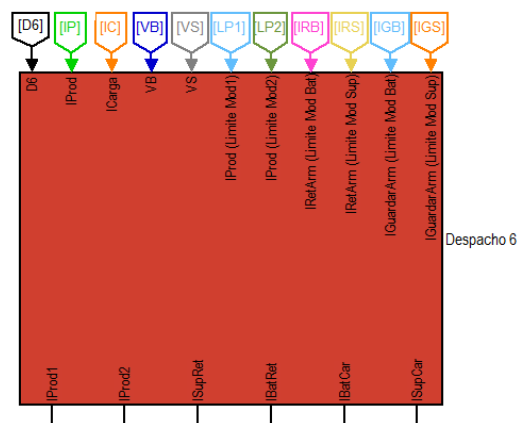


Figura 116 – Entradas e saídas do bloco do Despacho 6.

No despacho 6 pretende-se que toda a energia proveniente das fontes renováveis possa ser aproveitada, embora possa haver uma limitação da produção feita no valor máximo de corrente da produção um e no valor máximo de corrente da produção dois.

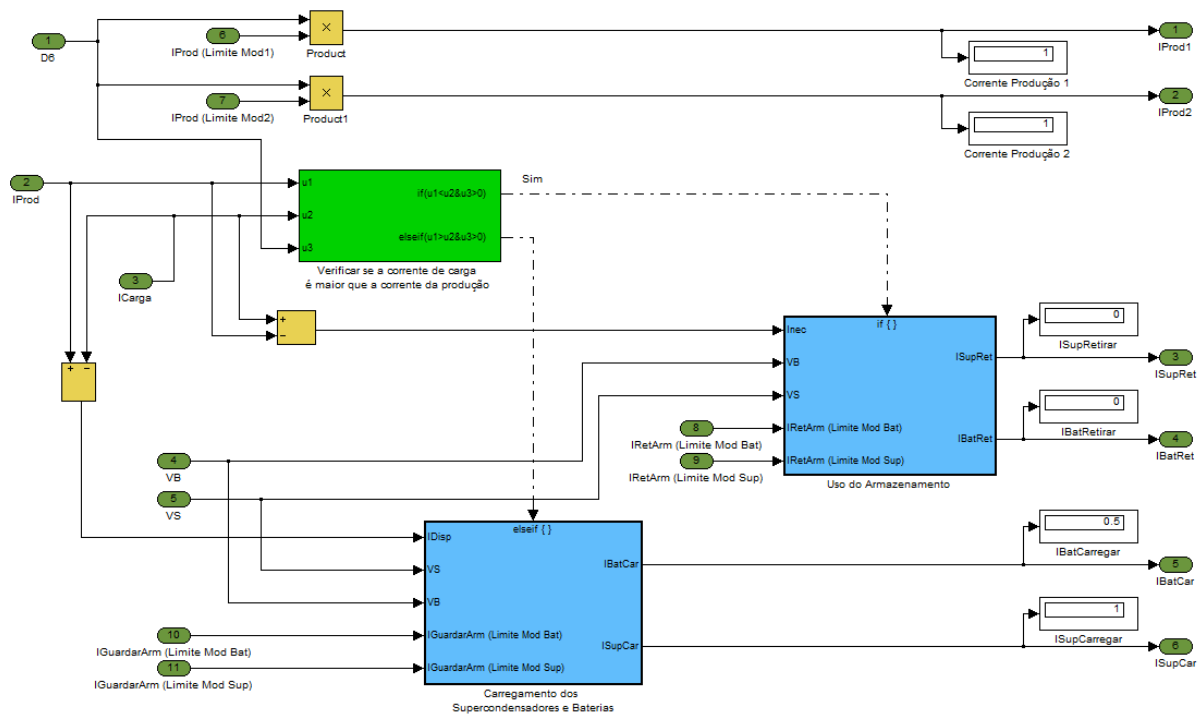


Figura 117 – Bloco do Despacho 6.

Se o despacho 6 estiver ativo e o valor real de corrente das produções for menor que o valor real da corrente de carga vai ser ligado o bloco “Uso do Armazenamento”.

Senão se o despacho 6 estiver ativo e o valor real de corrente das produções for maior que o valor real da corrente de carga liga o bloco “Carregamento dos Supercondensadores e Baterias”

As implementações dos blocos “Uso do Armazenamento” e “Carregamento dos Supercondensadores e Baterias” já se encontram feitas para o bloco do Despacho 1.

Despacho 7:

Na figura 118, podem observar-se as entradas e saídas usadas no despacho 7, estando as entradas na parte esquerda e as saídas na parte direita.

Quando o bloco do despacho 7 fica ativo são desligadas todas as cargas não prioritárias.

A energia das fontes renováveis é aproveitada ao máximo, podendo haver uma limitação da produção feita no valor máximo, de corrente da produção um e no valor máximo de corrente da produção dois.

Se o despacho 7 estiver ativo e o valor real da corrente das produções for maior que o valor real da corrente de carga prioritária vai ser executado o bloco “Carregamento dos Supercondensadores e Baterias”.

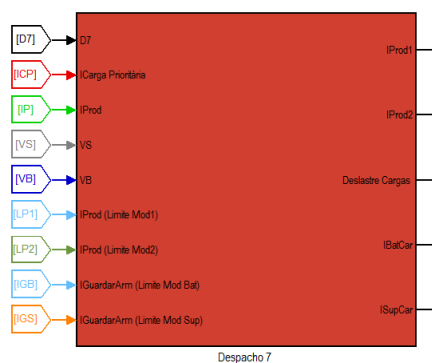


Figura 118 – Entradas e saídas do bloco do Despacho 7.

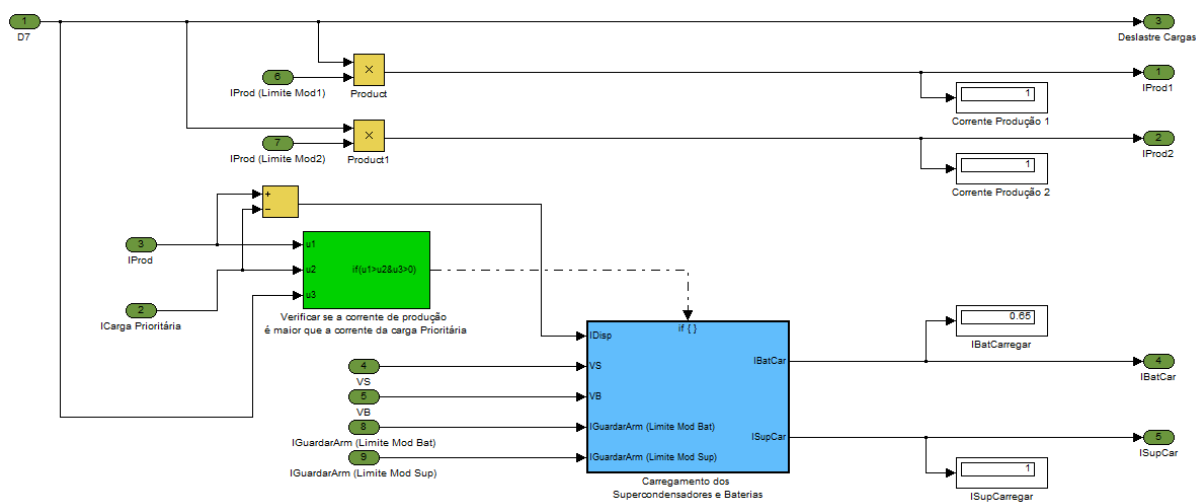


Figura 119 – Bloco do Despacho 7.

A implementação do bloco “Carregamento dos Supercondensadores e Baterias” já se encontra feita para o bloco do Despacho 1.

Despacho 8:

Na figura 120, podem ver-se as entradas e saídas usadas no despacho 8, estando as entradas na parte esquerda e as saídas na parte direita.

A energia das fontes renováveis é aproveitada ao máximo, podendo haver uma limitação da produção feita no valor máximo, de corrente da produção um e no valor máximo de corrente da produção dois.

Se o despacho 8 se encontrar ativo e o valor de tensão nas baterias for inferior a 27 V, vai ser executado o bloco “Deve carregar as Baterias” levando a que o valor desejado de corrente para carregar as baterias seja igual ao valor máximo de corrente com que podem ser carregadas as baterias e o valor desejado de corrente a retirar das baterias seja zero.

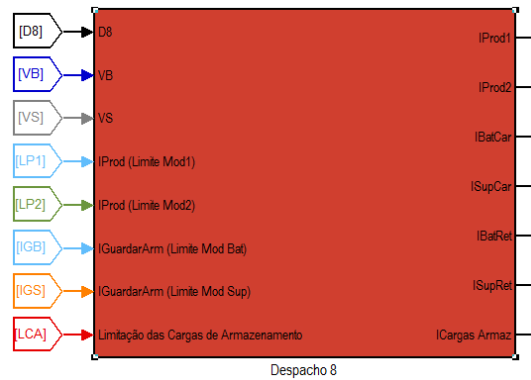


Figura 120 – Entradas e saídas do bloco do Despacho 8.

Se o despacho 8 se encontrar ativo e o valor de tensão nos supercondensadores for inferior a 27 V, vai ser executado o bloco “Deve carregar os Supercondensadores” fazendo com que o valor desejado de corrente para carregar os supercondensadores seja igual ao valor máximo de corrente com que podem ser carregados os supercondensadores e o valor desejado de corrente a retirar dos supercondensadores seja zero.

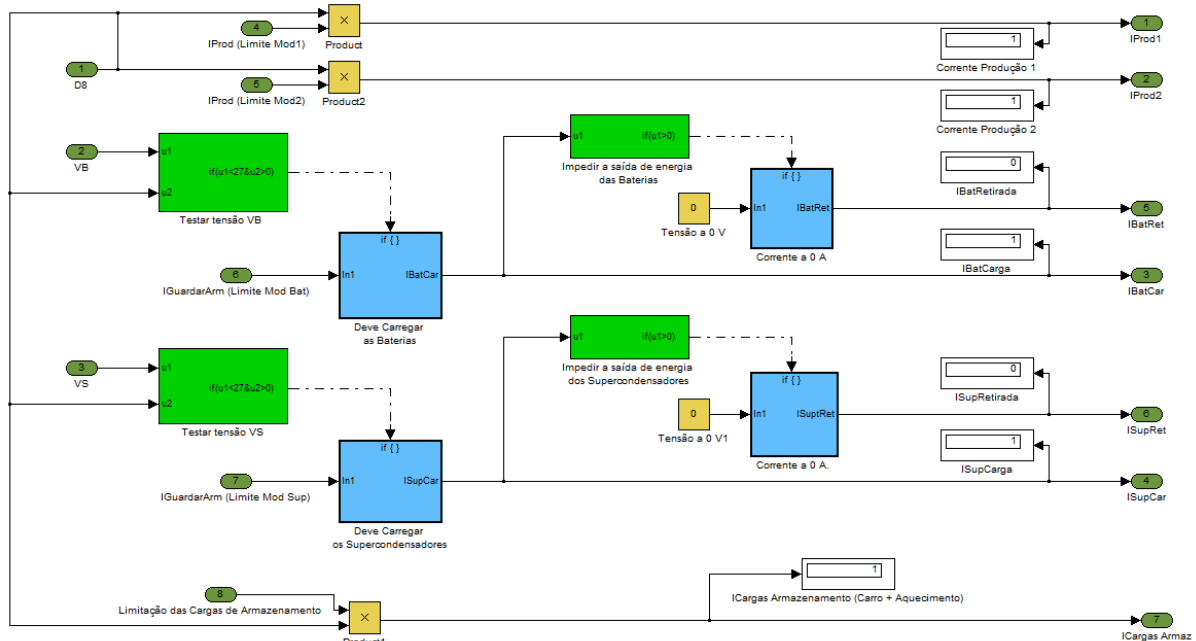


Figura 121 – Bloco do Despacho 8.

Estando o despacho 8 ativo, são também ligadas as cargas de armazenamento (carro elétrico mais aquecimento). Pode ainda ser definido um valor de forma a fazer-se a limitação da corrente que vai para as cargas de armazenamento.

5.4 Teste de controlo ao algoritmo de gestão energética do sistema

O teste de controlo ao algoritmo de gestão energética consiste em cada um dos despachos testar situações típicas. Para cada despacho vai ser elaborada uma tabela onde podem ser vistos os resultados das ações de controlo.

Para tal, parametrizou-se que $IRB = 20$ A, $IRS = 40$ A, $IGB = 20$ A, $IGS = 40$ A e o sistema tem uma capacidade máxima de armazenamento de 10 kWh, sendo 9 kWh nas baterias e 1 kWh nos supercondensadores.

Despacho 1:

Relembrando as condições para o despacho 1 são haver um pedido da rede para diminuição de potência (fornecimento) e a capacidade de armazenamento ser superior a 20 %.

Considerando-se um valor máximo desejado da corrente na produção um (I_{Prod1}) é de 10 A e o valor máximo desejado da corrente na produção dois (I_{Prod2}) é de 10 A.

Tabela 19– Resultados de ações de controlo para o despacho 1.

I_{Prod} (A)	VB (V)	VS (V)	IC (A)	IPR (A)	I_{SupRet} (A)	I_{BatRet} (A)	I_{SupCar} (A)	I_{BatCar} (A)	Trocas com a Rede (A)
0	22,3	22,3	0	5	5	0	0	0	5
10	22,3	22,3	0	5	0	0	5	0	5
20	22,3	22,3	0	5	0	0	15	0	5
0	24	21,6	0	5	0	5	0	0	5
10	24	21,6	0	5	0	0	5	0	5
20	24	21,6	0	5	0	0	15	0	5
0	24	24	0	5	5	0	0	0	5
10	24	24	0	5	0	0	5	0	5
20	24	24	0	5	0	0	15	0	5
0	24	27	0	5	5	0	0	0	5
10	24	27	0	5	0	0	0	5	5
20	24	27	0	5	0	0	0	15	5
0	27	27	0	5	5	0	0	0	5
10	27	27	0	5	0	0	0	0	5
20	27	27	0	5	0	0	0	0	5
0	24	26	0	5	5	0	0	0	5
10	24	26	0	5	0	0	5	0	5
20	24	26	0	5	0	0	15	0	5
0	26	24	0	5	5	0	0	0	5
10	26	24	0	5	0	0	5	0	5
20	26	24	0	5	0	0	15	0	5
0	22,3	22,3	0	15	15	0	0	0	15
10	22,3	22,3	0	15	5	0	0	0	15
20	22,3	22,3	0	15	0	0	5	0	15
0	24	21,6	0	15	0	15	0	0	15
10	24	21,6	0	15	0	5	0	0	15
20	24	21,6	0	15	0	0	5	0	15
0	24	24	0	15	15	0	0	0	15
10	24	24	0	15	5	0	0	0	15
20	24	24	0	15	0	0	5	0	15
0	24	27	0	15	15	0	0	0	15
10	24	27	0	15	5	0	0	0	15
20	24	27	0	15	0	0	0	5	15
0	27	27	0	15	15	0	0	0	15
10	27	27	0	15	5	0	0	0	15
20	27	27	0	15	0	0	0	0	15
0	24	26	0	15	15	0	0	0	15
10	24	26	0	15	5	0	0	0	15
20	24	26	0	15	0	0	5	0	15
0	26	24	0	15	15	0	0	0	15
10	26	24	0	15	5	0	0	0	15
20	26	24	0	15	0	0	5	0	15
0	22,3	22,3	15	15	30	0	0	0	15
10	22,3	22,3	15	15	20	0	0	0	15
20	22,3	22,3	15	15	10	0	0	0	15
0	24	21,6	15	15	0	20	0	0	5
10	24	21,6	15	15	0	20	0	0	15

IProd (A)	VB (V)	VS (V)	IC (A)	IPR (A)	ISupRet (A)	IBatRet (A)	ISupCar (A)	IBatCar (A)	Trocas com a Rede (A)
20	24	21,6	15	15	0	10	0	0	15
0	24	24	15	15	30	0	0	0	15
10	24	24	15	15	20	0	0	0	15
20	24	24	15	15	10	0	0	0	15
0	24	27	15	15	30	0	0	0	15
10	24	27	15	15	20	0	0	0	15
20	24	27	15	15	10	0	0	0	15
0	27	27	15	15	30	0	0	0	15
10	27	27	15	15	20	0	0	0	15
20	27	27	15	15	10	0	0	0	15
0	24	26	15	15	30	0	0	0	15
10	24	26	15	15	20	0	0	0	15
20	24	26	15	15	10	0	0	0	15
0	26	24	15	15	30	0	0	0	15
10	26	24	15	15	20	0	0	0	15
20	26	24	15	15	10	0	0	0	15
0	22,3	22,3	30	15	40	5	0	0	15
10	22,3	22,3	30	15	35	0	0	0	15
20	22,3	22,3	30	15	25	0	0	0	15
0	24	21,6	30	15	0	20	0	0	-10
10	24	21,6	30	15	0	20	0	0	0
20	24	21,6	30	15	0	20	0	0	10
0	24	24	30	15	40	5	0	0	15
10	24	24	30	15	35	0	0	0	15
20	24	24	30	15	25	0	0	0	15
0	24	27	30	15	40	5	0	0	15
10	24	27	30	15	35	0	0	0	15
20	24	27	30	15	25	0	0	0	15
0	27	27	30	15	40	5	0	0	15
10	27	27	30	15	35	0	0	0	15
20	27	27	30	15	25	0	0	0	15
0	24	26	30	15	40	5	0	0	15
10	24	26	30	15	35	0	0	0	15
20	24	26	30	15	25	0	0	0	15
0	26	24	30	15	40	5	0	0	15
10	26	24	30	15	35	0	0	0	15
20	26	24	30	15	25	0	0	0	15
0	22,3	22,3	0	30	30	0	0	0	30
10	22,3	22,3	0	30	20	0	0	0	30
20	22,3	22,3	0	30	10	0	0	0	30
0	24	21,6	0	30	0	20	0	0	20
10	24	21,6	0	30	0	20	0	0	30
20	24	21,6	0	30	0	10	0	0	30
0	24	24	0	30	30	0	0	0	30
10	24	24	0	30	20	0	0	0	30
20	24	24	0	30	10	0	0	0	30
0	24	27	0	30	30	0	0	0	30
10	24	27	0	30	20	0	0	0	30
20	24	27	0	30	10	0	0	0	30
0	27	27	0	30	30	0	0	0	30
10	27	27	0	30	20	0	0	0	30
20	27	27	0	30	10	0	0	0	30
0	24	26	0	30	30	0	0	0	30
10	24	26	0	30	20	0	0	0	30
20	24	26	0	30	10	0	0	0	30
0	26	24	0	30	30	0	0	0	30
10	26	24	0	30	20	0	0	0	30
20	26	24	0	30	10	0	0	0	30
0	22,3	22,3	15	30	40	5	0	0	30
10	22,3	22,3	15	30	35	0	0	0	30
20	22,3	22,3	15	30	25	0	0	0	30
0	24	21,6	15	30	0	20	0	0	5
10	24	21,6	15	30	0	20	0	0	15
20	24	21,6	15	30	0	20	0	0	25
0	24	24	15	30	40	5	0	0	30
10	24	24	15	30	35	0	0	0	30
20	24	24	15	30	25	0	0	0	30
0	24	27	15	30	45	0	0	0	30
10	24	27	15	30	35	0	0	0	30
20	24	27	15	30	25	0	0	0	30
0	27	27	15	30	40	5	0	0	30
10	27	27	15	30	35	0	0	0	30
20	27	27	15	30	25	0	0	0	30
0	24	26	15	30	40	5	0	0	30
10	24	26	15	30	35	0	0	0	30

IProd (A)	VB (V)	VS (V)	IC (A)	IPR (A)	ISupRet (A)	IBatRet (A)	ISupCar (A)	IBatCar (A)	Trocas com a Rede (A)
20	24	26	15	30	25	0	0	0	30
0	26	24	15	30	40	5	0	0	30
10	26	24	15	30	35	0	0	0	30
20	26	24	15	30	25	0	0	0	30
0	22,3	22,3	30	30	40	20	0	0	30
10	22,3	22,3	30	30	40	10	0	0	30
20	22,3	22,3	30	30	40	0	0	0	30
0	24	21,6	30	30	0	20	0	0	-10
10	24	21,6	30	30	0	20	0	0	0
20	24	21,6	30	30	0	20	0	0	10
0	24	24	30	30	40	20	0	0	30
10	24	24	30	30	40	10	0	0	30
20	24	24	30	30	40	0	0	0	30
0	24	27	30	30	40	20	0	0	30
10	24	27	30	30	40	10	0	0	30
20	24	27	30	30	40	0	0	0	30
0	27	27	30	30	40	20	0	0	30
10	27	27	30	30	40	10	0	0	30
20	27	27	30	30	40	0	0	0	30
0	24	26	30	30	40	20	0	0	30
10	24	26	30	30	40	10	0	0	30
20	24	26	30	30	40	0	0	0	30
0	26	24	30	30	40	20	0	0	30
10	26	24	30	30	40	10	0	0	30
20	26	24	30	30	40	0	0	0	30

A partir dos resultados pode observar-se que quando o pedido de corrente (carga + valor pedido pela rede) for maior que a corrente total proveniente da produção usa-se o armazenamento para retirar a energia em falta. Quando a corrente da produção for maior que o pedido de corrente a energia vai ser guardada no armazenamento.

A energia em falta começa por ser retirada dos supercondensadores garantindo-se sempre a tensão mínima de 21,6 V. Se estes não forem capazes de fornecer a corrente necessária ou não tiverem esta tensão recorre-se às baterias.

No caso de sobrar energia esta é guardada primeiramente nos supercondensadores e caso estes não sejam capazes de receber toda a corrente ou atinjam a capacidade máxima (dada pelos 27 V) é também feito o armazenamento nas baterias, até que atinjam a sua capacidade máxima (27 V).

Despacho 2:

As condições para o despacho 2 são haver um pedido da rede para diminuição de potência (deslastre) e a capacidade de armazenamento igual ou inferior a 20 %.

Considerando-se um valor máximo desejado da corrente na produção um (IProd1) é de 40 A e o valor máximo desejado da corrente na produção dois (IProd2) é de 40 A. Ao logo do despacho 2 é feito um deslastre das cargas não críticas.

Tabela 20– Resultados de ações de controlo para o despacho 2.

IProd (A)	VB (V)	VS (V)	ICP (A)	ISupRet (A)	IBatRet (A)	ISupCar (A)	IBatCar (A)	Trocas com a Rede (A)
0	21,5	21,5	0	0	0	0	0	0
10	21,5	21,5	0	0	0	10	0	0
20	21,5	21,5	0	0	0	20	0	0
40	21,5	21,5	0	0	0	40	0	0
60	21,5	21,5	0	0	0	40	20	0
80	21,5	21,5	0	0	0	40	20	20
0	21,5	22	0	0	0	0	0	0
10	21,5	22	0	0	0	10	0	0
20	21,5	22	0	0	0	20	0	0
40	21,5	22	0	0	0	40	0	0

IProd (A)	VB (V)	VS (V)	ICP (A)	ISupRet (A)	IBatRet (A)	ISupCar (A)	IBatCar (A)	Trocas com a Rede (A)
60	21,5	22	0	0	0	40	20	0
80	21,5	22	0	0	0	40	20	20
0	22	21,5	0	0	0	0	0	0
10	22	21,5	0	0	0	10	0	0
20	22	21,5	0	0	0	20	0	0
40	22	21,5	0	0	0	40	0	0
60	22	21,5	0	0	0	40	20	0
80	22	21,5	0	0	0	40	20	20
0	22	22	0	0	0	0	0	0
10	22	22	0	0	0	10	0	0
20	22	22	0	0	0	20	0	0
40	22	22	0	0	0	40	0	0
60	22	22	0	0	0	40	20	0
0	21,5	21,5	10	0	0	0	0	-10
10	21,5	21,5	10	0	0	0	0	0
20	21,5	21,5	10	0	0	10	0	0
40	21,5	21,5	10	0	0	30	0	0
60	21,5	21,5	10	0	0	40	10	0
80	21,5	21,5	10	0	0	40	20	10
0	21,5	22	10	40	0	0	0	30
10	21,5	22	10	0	0	0	0	0
20	21,5	22	10	0	0	10	0	0
40	21,5	22	10	0	0	30	0	0
60	21,5	22	10	0	0	40	10	0
80	21,5	22	10	0	0	40	20	10
0	22	21,5	10	0	20	0	0	0
10	22	21,5	10	0	0	0	0	0
20	22	21,5	10	0	0	10	0	0
40	22	21,5	10	0	0	30	0	0
60	22	21,5	10	0	0	40	10	0
80	22	21,5	10	0	0	40	20	10
0	22	22	10	40	0	0	0	30
10	22	22	10	0	0	0	0	0
20	22	22	10	0	0	10	0	0
40	22	22	10	0	0	30	0	0
60	22	22	10	0	0	40	10	0
80	22	22	10	0	0	40	20	10
0	21,5	21,5	20	0	0	0	0	-20
10	21,5	21,5	20	0	0	0	0	-10
20	21,5	21,5	20	0	0	0	0	0
40	21,5	21,5	20	0	0	20	0	0
60	21,5	21,5	20	0	0	40	0	0
80	21,5	21,5	20	0	0	40	20	0
0	21,5	22	20	40	0	0	0	20
10	21,5	22	20	40	0	0	0	30
20	21,5	22	20	0	0	0	0	0
40	21,5	22	20	0	0	20	0	0
60	21,5	22	20	0	0	40	0	0
80	21,5	22	20	0	0	40	20	0
0	22	21,5	20	0	20	0	0	0
10	22	21,5	20	0	20	0	0	10
20	22	21,5	20	0	0	0	0	0
40	22	21,5	20	0	0	20	0	0
60	22	21,5	20	0	0	40	0	0
80	22	21,5	20	0	0	40	20	0
0	22	22	20	40	0	0	0	20
10	22	22	20	40	0	0	0	30
20	22	22	20	0	0	0	0	0
40	22	22	20	0	0	20	0	0
60	22	22	20	0	0	40	0	0
80	22	22	20	0	0	40	20	0
0	21,5	21,5	30	0	0	0	0	-30
10	21,5	21,5	30	0	0	0	0	-20
20	21,5	21,5	30	0	0	0	0	-10
40	21,5	21,5	30	0	0	10	0	0
60	21,5	21,5	30	0	0	30	0	0
80	21,5	21,5	30	0	0	40	10	0
0	21,5	22	30	40	0	0	0	10
10	21,5	22	30	40	0	0	0	20
20	21,5	22	30	40	0	0	0	30
40	21,5	22	30	0	0	10	0	0
60	21,5	22	30	0	0	30	0	0
80	21,5	22	30	0	0	40	10	0
0	22	21,5	30	0	20	0	0	-10
10	22	21,5	30	0	20	0	0	0

IProd (A)	VB (V)	VS (V)	ICP (A)	ISupRet (A)	IBatRet (A)	ISupCar (A)	IBatCar (A)	Trocas com a Rede (A)
20	22	21,5	30	0	20	0	0	0
40	22	21,5	30	0	0	10	0	0
60	22	21,5	30	0	0	30	0	0
80	22	21,5	30	0	0	40	10	0
0	22	22	30	40	0	0	0	0
10	22	22	30	40	0	0	0	0
20	22	22	30	40	0	0	0	0
40	22	22	30	0	0	10	0	0
60	22	22	30	0	0	30	0	0
80	22	22	30	0	0	40	10	0

A partir dos resultados pode concluir-se que quando a corrente de produção é maior que a corrente que vai para as cargas prioritárias são carregados os supercondensadores e se sobrar corrente as baterias. Após os supercondensadores e as baterias estarem a carregar com o valor limite de corrente a energia vai para a rede.

Quando o valor de corrente pedido pelas cargas prioritárias é maior que o da corrente de produção, a energia vai ser pedida aos supercondensadores. Se estes não forem capazes de fornecer a corrente necessária, vai ser pedida às baterias. Se mesmo assim não tiver disponível a corrente suficiente, como último recurso vai ser solicitada à rede.

Despacho 3:

As condições para o despacho 3 são haver um pedido da rede para aumento de potência (aumento do consumo) e a capacidade de armazenamento ser inferior a 80 %.

Considerando-se um valor máximo desejado da corrente na produção um (IProd1) de 40 A e o valor máximo desejado da corrente na produção dois (IProd2) de 40 A.

Tabela 21– Resultados de ações de controlo para o despacho 3.

IProd (A)	VB (V)	VS (V)	ISupCar (A)	IBatCar (A)	Trocas com a Rede (A)
0	21	21	40	20	-60
40	21	21	40	20	-20
80	21	21	40	20	20
0	21	22,2	40	20	-60
40	21	22,2	40	20	-20
80	21	22,2	40	20	20
0	22,2	21	40	20	-60
40	22,2	21	40	20	-20
80	22,2	21	40	20	20
0	22,2	22,2	40	20	-60
40	22,2	22,2	40	20	-20
80	22,2	22,2	40	20	20
0	24	24	40	20	-60
40	24	24	40	20	-20
80	24	24	40	20	20
0	24	25,7	40	20	-60
40	24	25,7	40	20	-20
80	24	25,7	40	20	20
0	25,7	24	40	20	-60
40	25,7	24	40	20	-20
80	25,7	24	40	20	20
0	25,7	25,7	40	20	-60
40	25,7	25,7	40	20	-20
80	25,7	25,7	40	20	20

No despacho 3, pode observar-se que os supercondensadores e as baterias são carregados com os seus valores máximos de corrente, procurando-se aumentar o consumo (pedido pela rede), independentemente dos consumos das cargas na instalação ou da produção renovável.

Despacho 4:

No despacho 4 deve haver um pedido da rede para aumento de potência (aumento do consumo) e a capacidade de armazenamento ser igual ou superior a 80 %.

Considerando-se um valor máximo desejado da corrente na produção um (IProd1) de 40 A, o valor máximo desejado da corrente na produção dois (IProd2) de 40 A e as cargas de armazenamento (carro + aquecimento) de 25 A ou 50 A.

Tabela 22– Resultados de ações de controlo para o despacho 4.

IProd (A)	VB (V)	VS (V)	Cargas de Armazenamento (A)	ISupCar (A)	IBatCar (A)	Trocas com a Rede (A)
0	26	26	25	40	20	-85
40	26	26	25	40	20	-45
80	26	26	25	40	20	-5
0	26	26	50	40	20	-110
40	26	26	50	40	20	-70
80	26	26	50	40	20	-30
0	26	26,5	25	40	20	-85
40	26	26,5	25	40	20	-45
80	26	26,5	25	40	20	-5
0	26	26,5	50	40	20	-110
40	26	26,5	50	40	20	-70
80	26	26,5	50	40	20	-30
0	26,5	26	25	40	20	-85
40	26,5	26	25	40	20	-45
80	26,5	26	25	40	20	-5
0	26,5	26	50	40	20	-110
40	26,5	26	50	40	20	-70
80	26,5	26	50	40	20	-30
0	26,5	26	25	40	20	-85
40	26,5	26	25	40	20	-45
80	26,5	26	25	40	20	-5
0	26,5	26	50	40	20	-110
40	26,5	26	50	40	20	-70
80	26,5	26	50	40	20	-30
0	26,5	26	25	0	20	-45
40	26,5	27	25	0	20	-5
80	26,5	27	25	0	20	35
0	26,5	27	50	0	20	-70
40	26,5	27	50	0	20	-30
80	26,5	27	50	0	20	10
0	26,5	27	25	0	20	-45
40	26,5	27	25	0	20	-5
80	26,5	27	25	0	20	35
0	26,5	27	50	0	20	-70
40	26,5	27	50	0	20	-30
80	26,5	27	50	0	20	10
0	27	26,5	25	40	0	-65
40	27	26,5	25	40	0	-25
80	27	26,5	25	40	0	15
0	27	26,5	50	40	0	-90
40	27	26,5	50	40	0	-50
80	27	26,5	50	40	0	-10
0	27	26,5	25	40	0	-65
40	27	26,5	25	40	0	-25
80	27	26,5	25	40	0	15
0	27	26,5	50	40	0	-90
40	27	26,5	50	40	0	-50
80	27	26,5	50	40	0	-10
0	27	27	25	0	0	-25
40	27	27	25	0	0	15
80	27	27	25	0	0	55
0	27	27	50	0	0	-50
40	27	27	50	0	0	-10
80	27	27	50	0	0	30

IProd (A)	VB (V)	VS (V)	Cargas de Armazenamento (A)	ISupCar (A)	IBatCar (A)	Trocas com a Rede (A)
0	27	27	25	0	0	-25
40	27	27	25	0	0	15
80	27	27	25	0	0	55
0	27	27	50	0	0	-50
40	27	27	50	0	0	-10
80	27	27	50	0	0	30

Da tabela 22, pode constatar-se que sempre que os supercondensadores e ou baterias não estão com a carga total, são carregados(as) com os seus valores máximos de corrente.

No despacho 4, tal como no despacho 3 procura-se aumentar o consumo pedido pela rede, independentemente da produção renovável ou dos consumos das cargas na instalação, mas incluindo sempre as cargas de armazenamento (aquecimento + carro). Estas são ligadas, pois os níveis de armazenamento nas baterias e supercondensadores são elevados, e uma vez este deixando de estar disponível, o auxílio à rede no sentido do consumo é feito apenas pelas cargas de aquecimento.

Despacho 5:

O despacho 5 tem como condições: não haver um pedido da rede; o vetor com a previsão de produção ter um valor igual ou maior que a soma do vetor capacidade de produção com o vetor previsão de carga; o armazenamento estar com a capacidade a 100% ($VTA > 26,9$).

Considerando-se um valor máximo desejado da corrente na produção um (IProd1) de 40A, o valor máximo desejado da corrente na produção dois (IProd2) de 40 A e as cargas de armazenamento (carro + aquecimento) de 50 A.

Tabela 23– Resultados de ações de controlo para o despacho 5.

IProd (A)	VB (V)	VS (V)	IC (A)	Cargas de Armazenamento (A)	Trocas com a Rede (A)
0	27	27	0	0	0
40	27	27	0	50	-10
80	27	27	0	50	30
0	27	27	20	0	-20
40	27	27	20	50	-30
80	27	27	20	50	10
0	27	27	40	0	-40
40	27	27	40	0	0
80	27	27	40	50	-10
0	27	27	60	0	-60
40	27	27	60	0	-20
80	27	27	60	50	-30

A partir dos resultados obtidos pode concluir-se que sempre que o valor real da corrente de produção é maior que o valor real da corrente de carga, ou seja $IProd > IC$, são ligadas as cargas de armazenamento com o valor de 50 A de corrente. Em caso contrário, as cargas de armazenamento permanecem desligadas, logo a corrente é de 0 A.

Despacho 6:

No despacho 6 não existe qualquer tipo de pedido da rede. Cumprido este requisito, pode dar-se em duas situações:

a) O vetor com a previsão de produção tem um valor igual ou maior que a soma do vetor capacidade de produção com o vetor previsão de carga. O armazenamento deve ainda, estar com uma capacidade superior a 20% e inferior a 100% ($22,2 < VTA \leq 26,9$).

b) O vetor com a previsão de produção tem um valor inferior à soma do vetor capacidade de produção com o vetor previsão de carga. A resposta à pergunta “A capacidade do armazenamento é inferior a 80% e o preço de compra compensador?” é não. O armazenamento tem que ter uma capacidade superior a 20%.

Estabeleceu-se como valor máximo desejado da corrente na produção um (IProd1) de 40 A e o valor máximo desejado da corrente na produção dois (IProd2) de 40 A.

Tabela 24– Resultados de ações de controlo para o despacho 6.

IProd (A)	VB (V)	VS (V)	IC (A)	ISupRet (A)	IBatRet (A)	ISupCar (A)	IBatCar (A)	Trocas com a Rede (A)
0	22,3	22,3	0	0	0	0	0	0
40	22,3	22,3	0	0	0	40	0	0
80	22,3	22,3	0	0	0	40	20	20
0	22,3	22,3	40	40	0	0	0	0
40	22,3	22,3	40	0	0	0	0	0
80	22,3	22,3	40	0	0	40	0	0
0	22,3	22,3	80	40	20	0	0	-20
40	22,3	22,3	80	40	0	0	0	0
80	22,3	22,3	80	0	0	0	0	0
0	22,3	24	0	0	0	0	0	0
40	22,3	24	0	0	0	40	0	0
80	22,3	24	0	0	0	40	20	20
0	22,3	24	40	40	0	0	0	0
40	22,3	24	40	0	0	0	0	0
80	22,3	24	40	0	0	40	0	0
0	22,3	24	80	40	20	0	0	-20
40	22,3	24	80	40	0	0	0	0
80	22,3	24	80	0	0	0	0	0
0	24	22,3	0	0	0	0	0	0
40	24	22,3	0	0	0	40	0	0
80	24	22,3	0	0	0	40	20	20
0	24	22,3	40	40	0	0	0	0
40	24	22,3	40	0	0	0	0	0
80	24	22,3	40	0	0	40	0	0
0	24	22,3	80	40	20	0	0	-20
40	24	22,3	80	40	0	0	0	0
80	24	22,3	80	0	0	0	0	0
0	24	24	0	0	0	0	0	0
40	24	24	0	0	0	40	0	0
80	24	24	0	0	0	40	20	20
0	24	24	40	40	0	0	0	0
40	24	24	40	0	0	0	0	0
80	24	24	40	0	0	40	0	0
0	24	24	80	40	20	0	0	-20
40	24	24	80	40	0	0	0	0
80	24	24	80	0	0	0	0	0
0	24	26,9	0	0	0	0	0	0
40	24	26,9	0	0	0	40	0	0
80	24	26,9	0	0	0	40	20	20
0	24	26,9	40	40	0	0	0	0
40	24	26,9	40	0	0	0	0	0
80	24	26,9	40	0	0	40	0	0
0	24	26,9	80	40	20	0	0	-20
40	24	26,9	80	40	0	0	0	0
80	24	26,9	80	0	0	0	0	0
0	26,9	24	0	0	0	0	0	0
40	26,9	24	0	0	0	40	0	0
80	26,9	24	0	0	0	40	20	20
0	26,9	24	40	40	0	0	0	0
40	26,9	24	40	0	0	0	0	0
80	26,9	24	40	0	0	40	0	0
0	26,9	24	80	40	20	0	0	-20
40	26,9	24	80	40	0	0	0	0
80	26,9	24	80	0	0	0	0	0
0	26,9	26,9	0	0	0	0	0	0

IProd (A)	VB (V)	VS (V)	IC (A)	ISupRet (A)	IBatRet (A)	ISupCar (A)	IBatCar (A)	Trocas com a Rede (A)
40	26.9	26.9	0	0	0	40	0	0
80	26.9	26.9	0	0	0	40	20	20
0	26.9	26.9	40	40	0	0	0	0
40	26.9	26.9	40	0	0	0	0	0
80	26.9	26.9	40	0	0	40	0	0
0	26.9	26.9	80	40	20	0	0	-20
40	26.9	26.9	80	40	0	0	0	0
80	26.9	26.9	80	0	0	0	0	0

Analisando-se os resultados obtidos pode concluir-se que sempre que o valor real da corrente de produção é maior que o valor real da corrente de carga, ou seja $I_{Prod} > I_C$, a energia é guardada primeiramente nos supercondensadores e caso estes não sejam capazes de receber toda a corrente ou atinjam a capacidade máxima (dada pelos 27 V) é também feito o armazenamento nas baterias, até que atinjam a sua capacidade máxima (27 V). Quando sobra energia, esta será encaminhada para a rede elétrica pública.

Quando o valor real da corrente de produção é menor que o valor real da corrente de carga, ou seja $I_{Prod} < I_C$, usa-se o armazenamento para retirar a energia em falta. Começa por ser retirada dos supercondensadores garantindo-se sempre a tensão mínima (22,3 V). Se estes não forem capazes de fornecer a corrente necessária ou não tiverem esta tensão recorre-se às baterias (nestas também se garante uma tensão mínima de 22,3 V). Se mesmo assim a corrente não for suficiente para fornecer as cargas, vai ser pedida à rede elétrica pública.

Despacho 7:

No despacho 7 não existe qualquer tipo de pedido da rede. Cumprido este requisito, pode dar-se em duas situações:

a) O vetor com a previsão de produção tem um valor igual ou maior que a soma do vetor capacidade de produção com o vetor previsão de carga. O armazenamento deve ainda, estar com a uma capacidade igual ou inferior a 20%.

b) O vetor com a previsão de produção tem um valor inferior à soma do vetor capacidade de produção com o vetor previsão de carga. A resposta à pergunta “A capacidade do armazenamento é inferior a 80% e o preço de compra compensador?” é não. O armazenamento tem que ter uma capacidade igual ou inferior a 20%.

Estabeleceu-se como valor máximo desejado da corrente na produção um (I_{Prod1}) de 40A e o valor máximo desejado da corrente na produção dois (I_{Prod2}) de 40A. Neste despacho, são deslastradas todas as cargas não críticas.

Tabela 25– Resultados de ações de controlo para o despacho 7.

IProd (A)	VB (V)	VS (V)	ICP (A)	ISupCar (A)	IBatCar (A)	Trocas com a Rede (A)
0	21	21	0	0	0	0
20	21	21	0	20	0	0
40	21	21	0	40	0	0
80	21	21	0	40	20	20
0	21	21	10	0	0	-10
20	21	21	10	10	0	0
40	21	21	10	30	0	0
80	21	21	10	40	20	10
0	21	21	20	0	0	-20
20	21	21	20	0	0	0

IProd (A)	VB (V)	VS (V)	ICP (A)	ISupCar (A)	IBatCar (A)	Trocas com a Rede (A)
40	21	21	20	20	0	0
80	21	21	20	40	20	0
0	21	21	30	0	0	-30
20	21	21	30	0	0	-10
40	21	21	30	10	0	0
80	21	21	30	40	10	0
0	21	21,3	0	0	0	0
20	21	21,3	0	20	0	0
40	21	21,3	0	40	0	0
80	21	21,3	0	40	20	20
0	21	21,3	10	0	0	-10
20	21	21,3	10	10	0	0
40	21	21,3	10	30	0	0
80	21	21,3	10	40	20	10
0	21	21,3	20	0	0	-20
20	21	21,3	20	0	0	0
40	21	21,3	20	20	0	0
80	21	21,3	20	40	20	0
0	21	21,3	30	0	0	-30
20	21	21,3	30	0	0	-10
40	21	21,3	30	10	0	0
80	21	21,3	30	40	10	0
0	21,3	21	0	0	0	0
20	21,3	21	0	20	0	0
40	21,3	21	0	40	0	0
80	21,3	21	0	40	20	20
0	21,3	21	10	0	0	-10
20	21,3	21	10	10	0	0
40	21,3	21	10	30	0	0
80	21,3	21	10	40	20	10
0	21,3	21	20	0	0	-20
20	21,3	21	20	0	0	0
40	21,3	21	20	20	0	0
80	21,3	21	20	40	20	0
0	21,3	21	30	0	0	-30
20	21,3	21	30	0	0	-10
40	21,3	21	30	10	0	0
80	21,3	21	30	40	10	0
0	21,3	21,3	0	0	0	0
20	21,3	21,3	0	20	0	0
40	21,3	21,3	0	40	0	0
80	21,3	21,3	0	40	20	20
0	21,3	21,3	10	0	0	-10
20	21,3	21,3	10	10	0	0
40	21,3	21,3	10	30	0	0
80	21,3	21,3	10	40	20	10
0	21,3	21,3	20	0	0	-20
20	21,3	21,3	20	0	0	0
40	21,3	21,3	20	20	0	0
80	21,3	21,3	20	40	20	0
0	21,3	21,3	30	0	0	-30
20	21,3	21,3	30	0	0	-10
40	21,3	21,3	30	10	0	0
80	21,3	21,3	30	40	10	0
0	21,3	22,2	0	0	0	0
20	21,3	22,2	0	20	0	0
40	21,3	22,2	0	40	0	0
80	21,3	22,2	0	40	20	20
0	21,3	22,2	10	0	0	-10
20	21,3	22,2	10	10	0	0
40	21,3	22,2	10	30	0	0
80	21,3	22,2	10	40	20	10
0	21,3	22,2	20	0	0	-20
20	21,3	22,2	20	0	0	0
40	21,3	22,2	20	20	0	0
80	21,3	22,2	20	40	20	0
0	21,3	22,2	30	0	0	-30
20	21,3	22,2	30	0	0	-10
40	21,3	22,2	30	10	0	0
80	21,3	22,2	30	40	10	0
0	22,2	21,3	0	0	0	0
20	22,2	21,3	0	20	0	0
40	22,2	21,3	0	40	0	0
80	22,2	21,3	0	40	20	20
0	22,2	21,3	10	0	0	-10

IProd (A)	VB (V)	VS (V)	ICP (A)	ISupCar (A)	IBatCar (A)	Trocas com a Rede (A)
20	22,2	21,3	10	10	0	0
40	22,2	21,3	10	30	0	0
80	22,2	21,3	10	40	20	10
0	22,2	21,3	20	0	0	-20
20	22,2	21,3	20	0	0	0
40	22,2	21,3	20	20	0	0
80	22,2	21,3	20	40	20	0
0	22,2	21,3	30	0	0	-30
20	22,2	21,3	30	0	0	-10
40	22,2	21,3	30	10	0	0
80	22,2	21,3	30	40	10	0
0	22,2	22,2	0	0	0	0
20	22,2	22,2	0	20	0	0
40	22,2	22,2	0	40	0	0
80	22,2	22,2	0	40	20	20
0	22,2	22,2	10	0	0	-10
20	22,2	22,2	10	10	0	0
40	22,2	22,2	10	30	0	0
80	22,2	22,2	10	40	20	10
0	22,2	22,2	20	0	0	-20
20	22,2	22,2	20	0	0	0
40	22,2	22,2	20	20	0	0
80	22,2	22,2	20	40	20	0
0	22,2	22,2	30	0	0	-30
20	22,2	22,2	30	0	0	-10
40	22,2	22,2	30	10	0	0
80	22,2	22,2	30	40	10	0

A partir da observação da tabela 25, pode ver-se que sempre que o valor real da corrente de produção é maior que o valor real da corrente de carga prioritária, ou seja $I_{Prod} > I_{CP}$, a energia é guardada primeiramente nos supercondensadores e caso estes não sejam capazes de receber toda a corrente é também feito o armazenamento nas baterias. Quando sobra energia, esta é encaminhada para a rede elétrica pública.

Quando o valor real da corrente de produção é menor que o valor real da corrente de carga prioritária, ou seja, $I_{Prod} < I_{CP}$, vai ser pedida à rede elétrica pública a energia necessária.

Despacho 8:

No despacho 8 não existe qualquer tipo de pedido da rede, bem com a resposta à pergunta “A capacidade do armazenamento é inferior a 80% e o preço de compra compensador?”, é sim.

Definiu-se como valor máximo desejado da corrente na produção um (I_{Prod1}) 40A e o valor máximo desejado da corrente na produção dois (I_{Prod2}) de 40A e as cargas de armazenamento (carro + aquecimento) de 25A ou 50A.

Tabela 26– Resultados de ações de controlo para o despacho 8.

IProd (A)	VB (V)	VS (V)	Cargas de Armazenamento (A)	ISupCar (A)	IBatCar (A)	Trocas com a Rede (A)
0	21	21	25	40	20	-85
40	21	21	25	40	20	-45
80	21	21	25	40	20	-5
0	21	21	50	40	20	-110
40	21	21	50	40	20	-70
80	21	21	50	40	20	-30
0	21	24	25	40	20	-85
40	21	24	25	40	20	-45
80	21	24	25	40	20	-5
0	21	24	50	40	20	-110
40	21	24	50	40	20	-70
80	21	24	50	40	20	-30
0	24	21	25	40	20	-85
40	24	21	25	40	20	-45

IProd (A)	VB (V)	VS (V)	Cargas de Armazenamento (A)	ISupCar (A)	IBatCar (A)	Trocas com a Rede (A)
80	24	21	25	40	20	-5
0	24	21	50	40	20	-110
40	24	21	50	40	20	-70
80	24	21	50	40	20	-30
0	24	24	25	40	20	-85
40	24	24	25	40	20	-45
80	24	24	25	40	20	-5
0	24	24	50	40	20	-110
40	24	24	50	40	20	-70
80	24	24	50	40	20	-30
0	24	25,7	25	40	20	-85
40	24	25,7	25	40	20	-45
80	24	25,7	25	40	20	-5
0	24	25,7	50	40	20	-110
40	24	25,7	50	40	20	-70
80	24	25,7	50	40	20	-30
0	25,7	24	25	40	20	-85
40	25,7	24	25	40	20	-45
80	25,7	24	25	40	20	-5
0	25,7	24	50	40	20	-110
40	25,7	24	50	40	20	-70
80	25,7	24	50	40	20	-30
0	25,7	25,7	25	40	20	-85
40	25,7	25,7	25	40	20	-45
80	25,7	25,7	25	40	20	-5
0	25,7	25,7	50	40	20	-110
40	25,7	25,7	50	40	20	-70
80	25,7	25,7	50	40	20	-30

Na tabela 26 pode observar-se que as cargas de armazenamento estão sempre ligadas, bem como o carregamento dos supercondensadores e das baterias. Promove-se assim o consumo de energia da rede, aproveitando-se a oportunidade de compra da energia a um preço vantajoso.

6. Conclusões e trabalho futuro:

6.1 Principais conclusões

O conversor flyback projetado difere de um conversor flyback típico por ter um controlo de corrente isolado, implementado a partir do secundário do transformador. Este controlo de corrente é fundamental para a gestão de energia num barramento DC com ligação à produção renovável e a elementos de armazenamento de energia.

A metodologia apresentada para o projeto do conversor é facilmente implementável e pode ser usada para o projeto de qualquer conversor DC-DC do tipo flyback.

O isolamento é conseguido através do uso dos transformadores, do amplificador isolado ISO124 e do sensor de corrente CMS3005. O funcionamento do conversor é através de um sinal de tensão, correspondente a um sinal de corrente desejada, que é comparado com a tensão proveniente do sensor de corrente, correspondente à corrente na saída do conversor.

O conversor desenvolvido fornece os diferentes valores de corrente com uma resposta imediata, em função dos valores de tensão aplicados correspondentes às correntes desejadas.

A metodologia implementada foi verificada e validada e o conversor pode ser integrado num barramento DC com outros conversores que interliguem as diferentes fontes de energia (renováveis e armazenamento). Ao barramento DC poderá estar também ligado um inversor que vai promover as trocas entre a rede AC e o barramento DC, nos dois sentidos. Quando a tensão no barramento DC desce um pouco, transfere a energia da rede AC para o barramento DC. Se a tensão no barramento DC subir, retira a energia do barramento DC para AC.

Foi desenvolvido um algoritmo de gestão para uma instalação final, do tipo habitacional que controla a corrente na saída de cada um dos conversores DC-DC, de forma a fazer-se a gestão energética do sistema. Foi verificada a sua funcionalidade e testada a sua aplicabilidade a um protótipo físico desenvolvido.

Resumindo, este algoritmo foi desenvolvido para aproveitar fontes de renováveis associadas com armazenamento e em ambiente de mercado liberalizado, assentando num conjunto de despachos com funções distintas:

- Do despacho 1 a 4, atua-se no sentido de responder a pedidos de rede, com partilha de benefícios económicos, e em função dos serviços de rede prestados de diminuição de potência (fornecimento / deslastre) ou aumento de potência (aumento do consumo).
- Do despacho 5 a 8, pode funcionar sem qualquer tipo de pedido da rede, apenas é feita uma gestão contínua da produção (ou previsão de produção) em função da carga, do estado de carregamento dos elementos de armazenamento e do preço da energia.

O modelo de gestão de fluxos procura desta forma responder aos pedidos de rede sempre que eles existirem. Não os havendo, é o que acontece na grande maioria do tempo, vai usar a energia da produção renovável para autoconsumo, procurando adaptar a produção à carga, com recurso ao

armazenamento, minimizando as trocas de energia com a rede e aproveitando eventuais oportunidades de preço de compra de energia em situações onde existe capacidade de armazenamento disponível.

O modo de funcionamento dos despachos e a sua validação conceptual foi feita através da construção de uma folha de cálculo em Excel, onde foi possível observar o comportamento para as diferentes situações dos despachos de energia aplicados a um sistema instalado numa habitação, com dados reais de consumo, ao longo de duas semanas.

De forma a facilitar-se a interpretação e a análise do desempenho do algoritmo foram elaborados um conjunto de gráficos e tabelas para os diversos cenários, que representam a evolução ao longo do tempo de energia consumida, da produção de energia e das trocas com a rede provocadas pelos vários despachos. Além disso foi também representada a evolução da situação do armazenamento ao longo do tempo, o tipo de despacho usado, a previsão de produção e de consumo, a capacidade de armazenamento disponível, o desempenho económico do algoritmo ao longo do tempo (Compra/Venda).

Um outro aspeto muito importante é a comparação do benefício económico que deriva da gestão feita pelo algoritmo, na situação sem sistema ou com o sistema para autoconsumo. Foi claramente concluído que o algoritmo proporciona uma vantagem económica quando comparado com qualquer uma das alternativas sem algoritmo, para os diferentes cenários simulados de consumo das cargas habitacionais, de produção, e de capacidade de armazenamento.

O proprietário da instalação final pode vir a ser compensado economicamente pelo facto poder prestar serviços de rede, contribuindo para a diminuição da reserva tradicional disponibilizada pelas centrais convencionais. Para além de produzir ganhos indiretos para a rede elétrica pública, relacionados com o evitar ou adiar de investimentos ao nível da produção centralizada ou em redes de transmissão e distribuição de energia, também contribui para a redução de perdas nas linhas, por redução dos fluxos energéticos nas redes. Estes ganhos não são só na rede pública, mas também na sua própria instalação, que passa a dispor de uma certa capacidade de energia armazenada, para resistir a interrupções de curta duração da rede elétrica pública.

Para se testar e validar fisicamente, com uma ligação a um protótipo de hardware desenvolvido, o bom funcionamento das ações de controlo, tendo como base os diversos despachos do algoritmo foi usada a ferramenta *Simulink* do *Matlab*. As ações de controlo foram sobre as correntes de saída dos vários módulos conversores DC-DC que permitem a interligação das diferentes fontes (produção e armazenamento) ao barramento DC e consequentemente a gestão energética do sistema, destinado à habitação.

Os resultados dos testes foram conclusivos, na validação do algoritmo de controlo, permitindo que este fique disponível para ser utilizado em implementações práticas, nas instalações elétricas finais.

6.2 Linhas de investigação futuras

A partir dos resultados alcançados com os trabalhos desenvolvidos nesta dissertação e da eficácia comprovada, quer da metodologia de projeto do conversor DC-DC *flyback* bem como do algoritmo de gestão energética proposto, desenham-se os seguintes cenários de trabalho futuro:

- Aplicação deste algoritmo nos sistemas de instalações finais (habitações, comércio, serviços...), verificando-se qual o seu impacto na rede elétrica pública. Numa primeira fase, enquanto não se dá a transformação do mercado (mudanças regulamentais) para a prestação de serviços de rede por parte das instalações finais, poderão ser selecionadas instalações piloto para a implementação de projetos de demonstração das metodologias e tecnologias aqui analisadas com vista à sua posterior disseminação.
- A necessidade de se fazer um estudo, de como devem ser partilhados os benefícios pelos serviços de rede entre os donos das instalações finais e os operadores da rede elétrica pública.
- A possibilidade de serem construídos outros conversores DC-DC com outros tipos e tecnologias e o controlo de corrente para serem aplicados a este algoritmo ou a outro semelhante que seja desenvolvido, com a finalidade de se conseguirem melhorias de eficiência nos processos de conversão.
- Estudar que tipos de alterações regulamentares no setor elétrico permitem a intervenção dos pequenos consumidores com agentes de prestação de serviços de rede (fornecimento de reserva de curta duração).

7. Bibliografia:

- [1] J. H. Kunstler, *O Fim do Petróleo*. Lisboa, 2006.
- [2] C. J. Campbell, "Peak Oil: A Turning Point for Mankind," ed: Association for the Study of Peak Oil & Gas, 2009.
- [3] K. R. Guerriche and T. Bouktir, "Maximum loading point in distribution system with renewable resources penetration," in *2014 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 2014, pp. 481-486.
- [4] M. Zakerinia, S. F. Ghaderi, and M. Piltan, "Evaluation of energy systems for selecting the optimal energy system," in *Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply (CITRES), 2010 IEEE Conference on*, 2010, pp. 195-202.
- [5] (2009). *Electricidade Solar – Perguntas frequentes*. Available: <http://solar.fc.ul.pt/solar.htm>
- [6] M. G. S. Felix A. Farret, *Integration of Alternative Sources of Energy*. New Jersey: IEEE Press, Wiley-Interscience, 2006.
- [7] R. L. Evans, *Fueling our Future*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press, 2007.
- [8] N. S. a. J. Weisblatt, *Alternative Energy*. USA, 2006.
- [9] T. M. Letcher, *Future Energy*, 2008.
- [10] J. W. Shim, Y. Cho, S. J. Kim, S. W. Min, and K. Hur, "Synergistic Control of SMES and Battery Energy Storage for Enabling Dispatchability of Renewable Energy Sources," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 23, pp. 5701205-5701205, 2013.
- [11] R. S. Weissbach, R. E. Teodorescu, and J. R. Sonnenmeier, "Comparison of Time-Based Probability Methods for Estimating Energy Storage Requirements for an Off-Grid Residence," in *Energy 2030 Conference, 2008. ENERGY 2008. IEEE*, 2008, pp. 1-4.
- [12] A. A. Messias, "Redes Inteligentes de Energia – Smart Grids," presented at the 9º Encontro Nacional do Colégio de Engenharia Electrotécnica, Lisboa, Portugal, 2009.
- [13] Y. W. Chen and J. M. Chang, "EMaaS: Cloud-Based Energy Management Service for Distributed Renewable Energy Integration," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, pp. 2816-2824, 2015.
- [14] S. Chen, N. B. Shroff, and P. Sinha, "Heterogeneous Delay Tolerant Task Scheduling and Energy Management in the Smart Grid with Renewable Energy," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, pp. 1258-1267, 2013.
- [15] A. Izadian, N. Girrens, and P. Khayyer, "Renewable Energy Policies: A Brief Review of the Latest U.S. and E.U. Policies," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 7, pp. 21-34, 2013.
- [16] R. Meyer, "The potential of solar energy for replacing fossil fuels," in *ASPO-7*, Epuron, Ed., ed. Barcelona, Espanha, 2008.
- [17] J. T. a. T. Weir, *Renewable Energy Resources*, 2006.
- [18] J. D. B. Delgado, "Gestão da Qualidade Total Aplicada ao Sector do Fornecimento da Energia Elétrica," Doutor em Engenharia Eletrotécnica, Departamento de Engenharia Eletrotécnica e Computadores, Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2002.
- [19] J. Makansi, "Energy Storage for Grid and RTO Management," ed. USA: Energy Storage Council, 2009.
- [20] "The Commercial World of Energy Storage: A Review of Operating Facilities," in *1st Annual Conference of the Energy Storage Council*, Houston, USA, 2003.
- [21] Z. Yu, J. Zhenhua, and Y. Xunwei, "Control Strategies for Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage Systems," in *Energy 2030 Conference, 2008. ENERGY 2008. IEEE*, 2008, pp. 1-6.

- [22] J. A. Jason Makansi, "Energy Storage – The Missing Link in The Electricity Value Chain," ed: Energy Storage Council, 2002.
- [23] I. Ando, J. Shibata, H. Haga, and K. Ohishi, "Long life ups based on active filter and flywheel without electrolytic capacitor," in *Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on*, 2007, pp. 1-10.
- [24] S. C. Smith, P. K. Sen, and B. Kroposki, "Advancement of energy storage devices and applications in electrical power system," in *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, 2008, pp. 1-8.
- [25] P. F. Ribeiro, B. K. Johnson, M. L. Crow, A. Arsoy, and Y. Liu, "Energy storage systems for advanced power applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, pp. 1744-1756, 2001.
- [26] H. Chong, A. Q. Huang, L. Ding, H. Mamath, M. Ingram, and S. Atcitty, "Modeling and design of a transmission ultracapacitor (TUCAP) integrating modular voltage source converter with ultracapacitor energy storage," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC '06. Twenty-First Annual IEEE*, 2006, p. 7 pp.
- [27] X. Jinhui, Y. Zhongdong, W. Bingbing, W. Ziping, and L. Jun, "Technology Research of Novel Energy Storage Control for the PV Generation System," in *Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific*, 2009, pp. 1-4.
- [28] B. Roberts. (2009, Junho/Agosto de 2009) Capturing Grid Power. *IEEE power&energy magazine*. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=05159604>
- [29] A. Nourai, "Installation of The First Distributed Energy Storage Sytem (DESS) at American Electric Power (AEP)," California, USA Junho de 2007 2007.
- [30] A. Mohd, E. Ortjohann, A. Schmelter, N. Hamsic, and D. Morton, "Challenges in integrating distributed Energy storage systems into future smart grid," in *Industrial Electronics, 2008. ISIE 2008. IEEE International Symposium on*, 2008, pp. 1627-1632.
- [31] J. A. Jason Makansi, "Energy Storage, The Sixth Dimension of the Electricity Production and Delivery Value Chain," ed. Pearl Street, Saint Louis, USA: Energy Storage Council, 2007.
- [32] F. Andr, x00E, B. Bletterie, S. Kadam, P. Kotsampopoulos, and C. Bucher, "On the Stability of Local Voltage Control in Distribution Networks With a High Penetration of Inverter-Based Generation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, pp. 2519-2529, 2015.
- [33] A. E. Fuhs, *Hybrid Vehicles and the Future of Personal Transportation*. New York, USA: CRC Press, 2009.
- [34] B. Kroposki, D. Mooney, T. Markel, and B. Lundstrom, "Energy systems integration facilities at the national renewable energy laboratory," in *Energytech, 2012 IEEE*, 2012, pp. 1-4.
- [35] G. Morita, T. Konishi, S. Hase, Y. Nakamichi, H. Nara, and T. Uemura, "Verification tests of electric double-layer capacitors for static energy storage system in DC electrified railway," in *Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2008. SPEEDAM 2008. International Symposium on*, 2008, pp. 1017-1022.
- [36] D. E. G. Bernard S. Lee. (2009, Abril de 2009) Renewable Power: Not Yet Ready for Prime Time. *CEP Magazine*. 22 - 25. Available: http://portal.acs.org/portal/PublicWebSite/policy/acsonthehill/briefings/electricity/CNBP_0_22403
- [37] P. N. Y.V. Makarov, B. Yang, J. Ma, J.G. DeStreese, D.J. Hammerstrom, S. Lu, V.V. Viswanathan, C.H. Miller, "Wide-Area Energy Storage and Management System to Balance Intermittent Resources in the Bonneville Power Administration and California ISO Control Areas," ed. Washington, USA: Pacific Northwest National Laboratory – Operated by Battelle for the U.S. Department of Energy, 2008.
- [38] J. Raadschelders. (2009, Junho de 2009) We live and breathe energy storage. *Kema Global Contact Magazine*. Available: http://www.electricitystorage.org/images/uploads/docs/KEMA_Global_Contact_Interview_Ji_Illis_Raadschelders_June_2009.pdf

- [39] D. Casadei, G. Grandi, G. Serra, and C. Rossi, "Power quality improvement and uninterruptible power supply using a power conditioning system with energy storage capability," in *Power Tech, 2005 IEEE Russia*, 2005, pp. 1-7.
- [40] S. Lakshminarayana, T. Q. S. Quek, and H. V. Poor, "Cooperation and Storage Tradeoffs in Power Grids With Renewable Energy Resources," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, pp. 1386-1397, 2014.
- [41] "Technology and Applied R&D Needs for Electrical Energy Storage," O. o. E. D. Resource Document for the Workshop on Basic Research Needs for Electrical Energy Storage, Ed., ed. USA, 2007.
- [42] Z. Qi, T. Tezuka, M. Esteban, and K. N. Ishihara, "A Study of renewable power for a zero-carbon electricity system in Japan using a proposed integrated analysis model," in *Computer and Automation Engineering (ICCAE), 2010 The 2nd International Conference on*, 2010, pp. 166-170.
- [43] S. Majumdar, A. Sapalok, and N. Chakraborty, "Modeling components of a DC coupled photovoltaic system with maximum power point tracking," in *Power India Conference, 2012 IEEE Fifth*, 2012, pp. 1-6.
- [44] J. G. Slootweg, E. Veldman, and J. Morren, "Sensing and control challenges for Smart Grids," in *Networking, Sensing and Control (ICNSC), 2011 IEEE International Conference on*, 2011, pp. 1-7.
- [45] B. Baikie and L. Hosman, "Green cloud computing in developing regions Moving data and processing closer to the end user," in *Telecom World (ITU WT), 2011 Technical Symposium at ITU*, 2011, pp. 24-28.
- [46] B. Roberts. (2009) Mastering the Storage. *Kema Global Contact Magazine*. Available: http://www.electricitystorage.org/images/uploads/docs/KEMA_Global_Contact_Interview_Brad_Roberts_June_2009.pdf
- [47] "Challenges of Electricity Storage Technologies," A Report from the APS Panel on Public Affairs Committee on Energy an Environment, USAMaio de 2007 2007.
- [48] J. G. Slootweg, J. Cordova, C. M. Portela, and J. Morren, "Smart grids - intelligence for sustainable electrical power systems," in *Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2011 IEEE 33rd International*, 2011, pp. 1-8.
- [49] N. L. P. Martins, "Sistema Integrado de Produção e Armazenamento de Energia a Partir de Fontes Renováveis," Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.
- [50] W. Chen, X. Wu, L. Yao, W. Jiang, and R. Hu, "A Step-up Resonant Converter for Grid-Connected Renewable Energy Sources," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, pp. 3017-3029, 2015.
- [51] S. Anand and B. G. Fernandes, "Optimal voltage level for DC microgrids," in *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2010, pp. 3034-3039.
- [52] "Switch Mode Power Supply Topologies Compared," W. E. Midcon, Ed ed. Waldenburg, Germany, 2016.
- [53] S. M. A. C. Fernando M. S. M. Santos, Humberto M. M. Jorge, "Conversor DC/DC para Interligação de Armazenamento e Produção de Energia com Origem em Fontes Renováveis," in *International Conference on Engineering UBI2011*, Covilhã, 2011.
- [54] A. Bersani, "Switch Mode Power Supply (SMPS) Topologies (Part II)," vol. II, ed. USA: Microchip Technology Inc, 2008.
- [55] S. Maniktala, *Switching Power Supplies A to Z*. USA, 2006.
- [56] K. Hyun-Woo and P. Joung-Hu, "Isolated bidirectional switched-capacitor flyback converter," in *Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), 2014 International*, 2014, pp. 279-284.
- [57] S. Maniktala, *Troubleshooting Switching Power Converters*. Burlington, USA: Elsevier, 2008.

- [58] J. W. Shin, S. J. Choi, and B. H. Cho, "High-Efficiency Bridgeless Flyback Rectifier With Bidirectional Switch and Dual Output Windings," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, pp. 4752-4762, 2014.
- [59] Y. C. Hsieh, M. R. Chen, and H. L. Cheng, "An Interleaved Flyback Converter Featured With Zero-Voltage Transition," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, pp. 79-84, 2011.
- [60] S. Kasat, "Analysis, Design and Modeling of DC-DC Converter Using Simulink," Master Science Thesis, Faculty of the Graduate College, Oklahoma State University, Oklahoma, 2004.
- [61] M. d. M. Silva, *Circuitos com Transístores Bipolares e MOS*. Avenida de Berna, Lisboa, 2008.
- [62] F. Forest, Laboure, x, E., T. A. Meynard, and J. J. Huselstein, "Multicell Interleaved Flyback Using Intercell Transformers," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 1662-1671, 2007.
- [63] J. Adams, "Flyback Transformer Design For The IRIS40XX Series," ed. California, USA: International Rectifier, 2001.
- [64] "Ferrites and Accessories," ed: Siemens Matsushita Components, 2013.
- [65] V. Carboni, "Guida al progetto dei trasformatori per alimentatori Flyback e Forward," ed. Italy: Dipartimento di Elettronica e Automatica, Università de Ancona, 2000.
- [66] K. H. Billings, *Switchmode Power Supply Handbook*. United States, 1989.
- [67] W. Dong, H. Xiangning, and S. Jianjiang, "Design and Analysis of an Interleaved Flyback–Forward Boost Converter With the Current Autobalance Characteristic," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 489-498, 2010.
- [68] M. Brown, *Power Sources and Supplies*. Newnes, 2007.
- [69] S. Amini Akbarabadi, M. Sucu, H. Atighechi, and J. Jatskevich, "Numerical average value modeling of second order flyback converter in both operational modes," in *Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2013 IEEE 14th Workshop on*, 2013, pp. 1-6.
- [70] Z. Zhiliang, H. Xiao-Fei, and L. Yan-Fei, "An Optimal Control Method for Photovoltaic Grid-Tied-Interleaved Flyback Microinverters to Achieve High Efficiency in Wide Load Range," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 28, pp. 5074-5087, 2013.
- [71] J. Young-Hyok, J. Doo-Yong, K. Jae-Hyung, L. Tae-Won, and W. Chung-Yuen, "A current shaping method for PV-AC module DCM-flyback inverter under CCM operation," in *Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE), 2011 IEEE 8th International Conference on*, 2011, pp. 2598-2605.
- [72] C. Kai-Hui and L. Tsorng-Juu, "Design of Quasi-resonant flyback converter control IC with DCM and CCM operation," in *Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE-ASIA), 2014 International*, 2014, pp. 2750-2753.
- [73] K. B. Abraham I. Pressman, Taylor Morey, *Switching Power Supply Design*. USA: McGraw-Hill, 2009.
- [74] "LM555 Timer," ed. USA: National Semiconductor Corporation, 2006.
- [75] R. Mammano, "Switching Power Supply Topology Voltage Mode vs. Current Mode," ed. MERRIMACK, NH 03054: Texas Instruments Incorporated, 1999.
- [76] H. P. Forghani-zadeh and G. A. Rincon-Mora, "Current-sensing techniques for DC-DC converters," in *Circuits and Systems, 2002. MWSCAS-2002. The 2002 45th Midwest Symposium on*, 2002, pp. II-577-II-580 vol.2.
- [77] H. Martinez-Garcia and A. Grau-Saldes, "A linear-assisted DC/DC converter based on current-mode control," in *Emerging Technology and Factory Automation (ETFA), 2014 IEEE*, 2014, pp. 1-8.
- [78] M. Kamil, "Switch Mode Power Supply (SMPS) Topologias," ed: Microchip Technology Inc., 2007.
- [79] C. Chia-Jung and C. Chern-Lin, "An Isolated Output-Feedback Scheme With Minimized Standby Power for SMPS," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 28, pp. 5140-5146, 2013.

- [80] T. E. Salem, C. W. Tipton, and D. Porschet, "Fabrication and Practical Considerations of a Flyback Transformer for Use in High Pulsed-Power Applications," in *System Theory, 2006. SSST '06. Proceeding of the Thirty-Eighth Southeastern Symposium on*, 2006, pp. 406-409.
- [81] D. R. Ridley. (2005, 2005) Flyback Converter Snubber Design. *Switching Power Magazine*. Available: <http://pt.scribd.com/doc/54919306/Snubber-Design-Dr-ray-Ridley>
- [82] J. Seungchul and C. Gyu-Hyeong, "Transformer Coupled Recycle Snubber for High-Efficiency Offline Isolated LED Driver With On-Chip Primary-Side Power Regulation," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 61, pp. 6710-6719, 2014.
- [83] "Transformers for Switching Power Supplies," T. Corporation, Ed., ed. Tokyo, Japan, 2010.
- [84] G.-B. K. P. D. (2006, Design Guidelines for RCD Snubber of Flyback Converters. Available: <http://www.fairchildsemi.com/an/AN/AN-4147.pdf>
- [85] E. Schaltz, A. Khaligh, and P. O. Rasmussen, "Investigation of battery/ultracapacitor energy storage rating for a Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle," in *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE*, 2008, pp. 1-6.

Anexos:

Anexo I - Equipamento usado nos testes:

A- Osciloscópio digital:

→ Tektronic DPO 2014 Digital Phosphor Oscilloscope

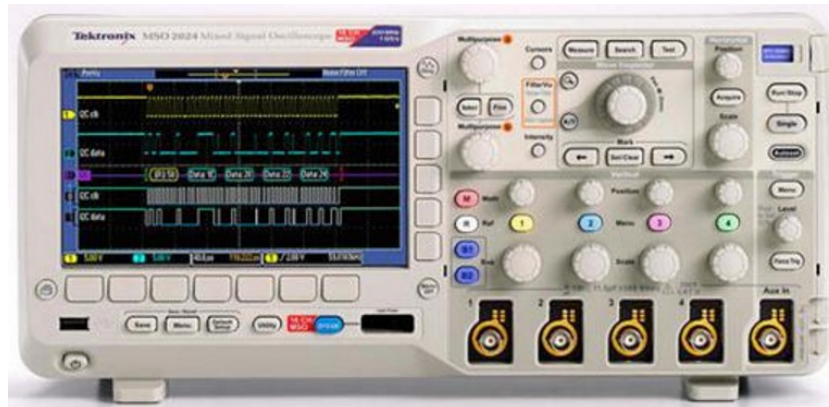


Figura 122 – Tektronic DPO 2014 Digital Phosphor oscilloscope.

As principais características são:

1. Largura de banda de 100 MHz;
2. 4 canais analógicos;
3. Velocidade de amostragem de até 1 GS/s em todos os canais;
4. Comprimento de registro com 1 milhão de pontos em todos os canais;
5. Velocidade máxima de captura de formas de onda de 5,000 wfm/s;
6. Conjunto de triggers avançados.

Fonte: <http://www.alliedelec.com/tektronix-dpo2014/70136918/>

B- Medidor de indutâncias, capacidades e resistências:

→ BK PRECISION 889A



Figura 123 – BK PRECISION 889A.

As principais características são as seguintes:

1. Medições de tensão:

AC: True RMS até 600Vrms @ 40 ~ 1 K Hz;

DC: até 600V ;

Impedância de entrada: 1M-Ohm.

2. Medições de correntes:

AC: True RMS, até 2Arms @ 40 ~ 1K Hz;

DC: até 2A;

Corrente derivada: 0,1 Ohm @ > 20mA; 10 Ohm @ ≤ 20mA.

3. Díodo/Verificação de continuidade audível:

Tensão de circuito aberto: 5Vdc;

Corrente de curto-circuito: 2,5mA;

Beep On: ≤ 25 Ω;

Beep Off: ≥ 50 Ω.

4. Medidas LCR:

Condições de Teste:

Frequência: 100Hz / 120Hz / 1KHz / 10KHz / 100KHz / 200KHz;

Nível: 1Vrms / 0,25Vrms / 50mVrms / 1VDC (DCR apenas);

Parâmetros de medição: Z, Ls, Lp, Cs, Cp, DCR, ESR, D, Q e θ;

Precisão básica: 0,1%;

Dual display de cristal líquido;

Variação automática ou escolhida;

Interface de comunicação USB;

Calibração em aberto / curto-circuito;

Parâmetros primários no display:

Z: impedância AC;
DCR: resistência DC;
Ls: indutância série;
Lp: indutância paralela;
Cs: capacidade série;
Cp: capacidade paralelo;

Parâmetros secundários no display:

θ : ângulo de fase;
ESR: resistência série equivalente;
D: fator de dissipação;
Q: fator de qualidade;

Combinações no Display:

Modo serial: Z – θ , Cs – D, Cs – Q, Cs – ESR, Ls – D, Ls – Q, Ls – ESR;

Modo paralelo: Cp – D, Cp – Q, Lp – D, Lp – Q.

Fonte: http://www.bkprecision.com/downloads/manuals/en/889B_manual.pdf

Anexo II – Características técnicas do transformador usado nos conversores DC/DC

O transformador escolhido que melhor serve o projeto do conversor DD-DC é o transformador flyback ETD49. De forma a garantir-se uma qualidade profissional de fabrico decidiu-se que o mesmo não deveria ser montado na Universidade de Coimbra, mas sim feito por uma empresa especialista, a Trans-Tronic Ltd.

A sua construção teve por base os seguintes requisitos: “transformadores flyback (ETD49) para uso em conversores DC-DC, que fossem capazes de funcionar a uma frequência de pelo menos 100 KHz”.

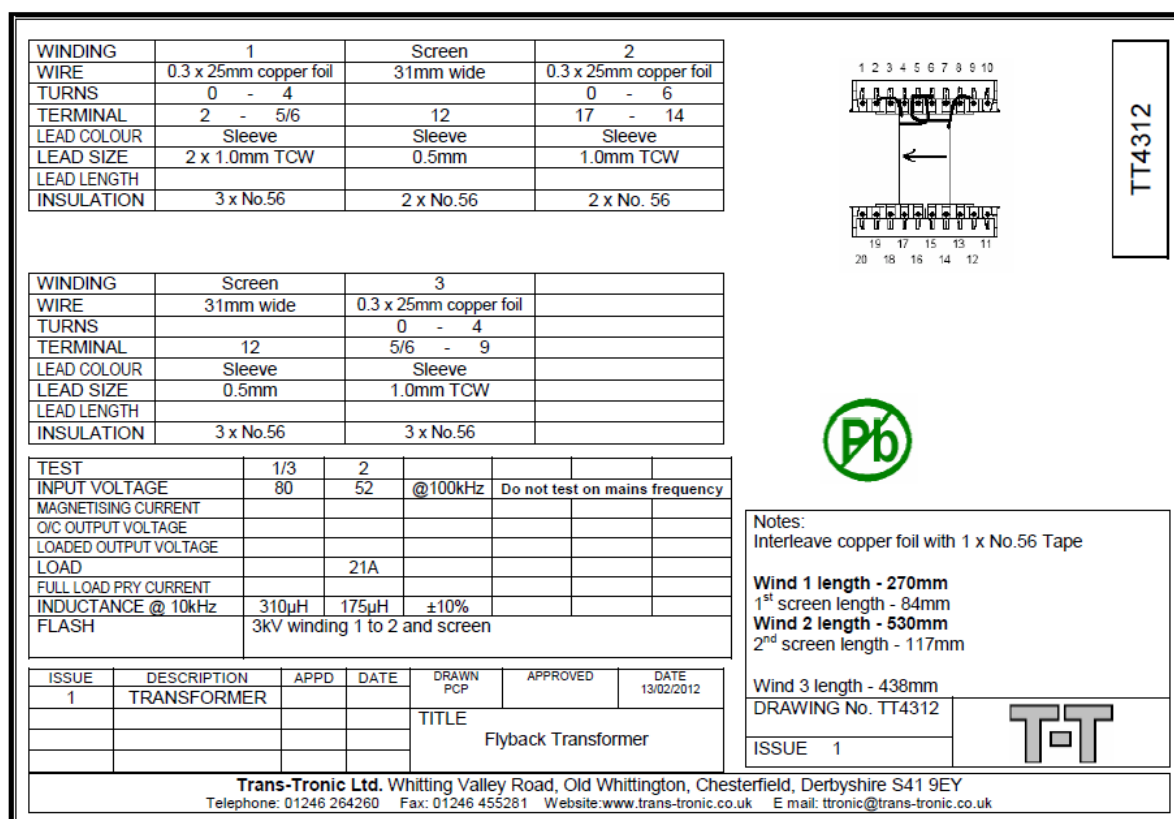


Figura 124 – Características técnicas do transformador ETD49 cedidas pela Trans-Tronic.

Anexo III – Esquema do Conversor DC-DC com transformador flyback implementado

Na figura 125, mostra-se o desenho completo do conversor DC-DC.

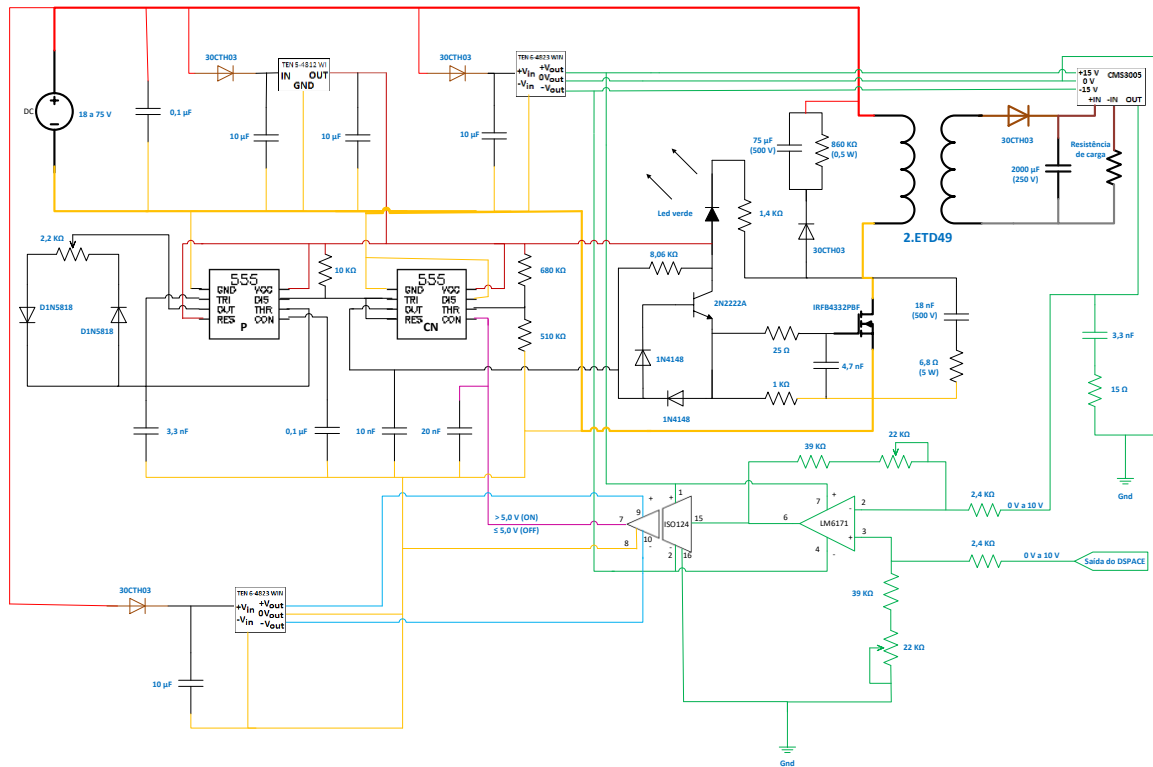


Figura 125 – Conversor DC-DC.

Anexo IV – Placa de circuito impresso do conversor DC-DC:

Para a realização das placas de circuito impresso dos conversores DC-DC foi usado o programa EAGLE 7.2.0 Professional para Windows (<http://www.cadsoftusa.com/eagle-pcb-design-software/about-eagle/>).

Dado o elevado número de ligações necessárias, devido ao uso de bastantes componentes, de forma a reduzir-se o tamanho da placa de circuito impresso, foi feita a opção por se desenhar o circuito em dupla face.

Os componentes eletrónicos foram aplicados na face superior, o que permite um melhor aspeto das placas quando vistas de cima, bem como uma melhor ventilação dos componentes e um apoiar das placas mais fácil. As pistas da face inferior estão representadas pela cor azul e com a cor vermelha as pistas da face superior.

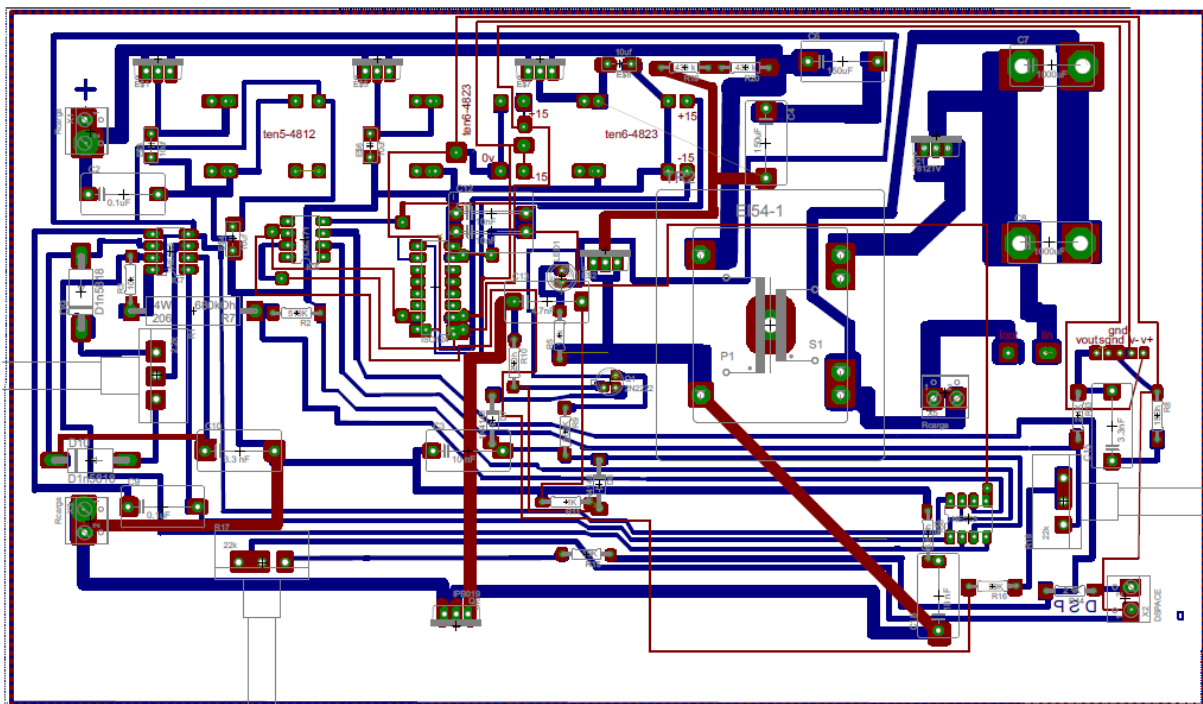


Figura 126 – Resultado do desenho do conversor DC-DC no software EAGLE 7.2.0 (ficheiro com a extensão .BRD).

As figuras 127 e 128 mostram as pistas da placa de circuito impresso (onde são montados os componentes).

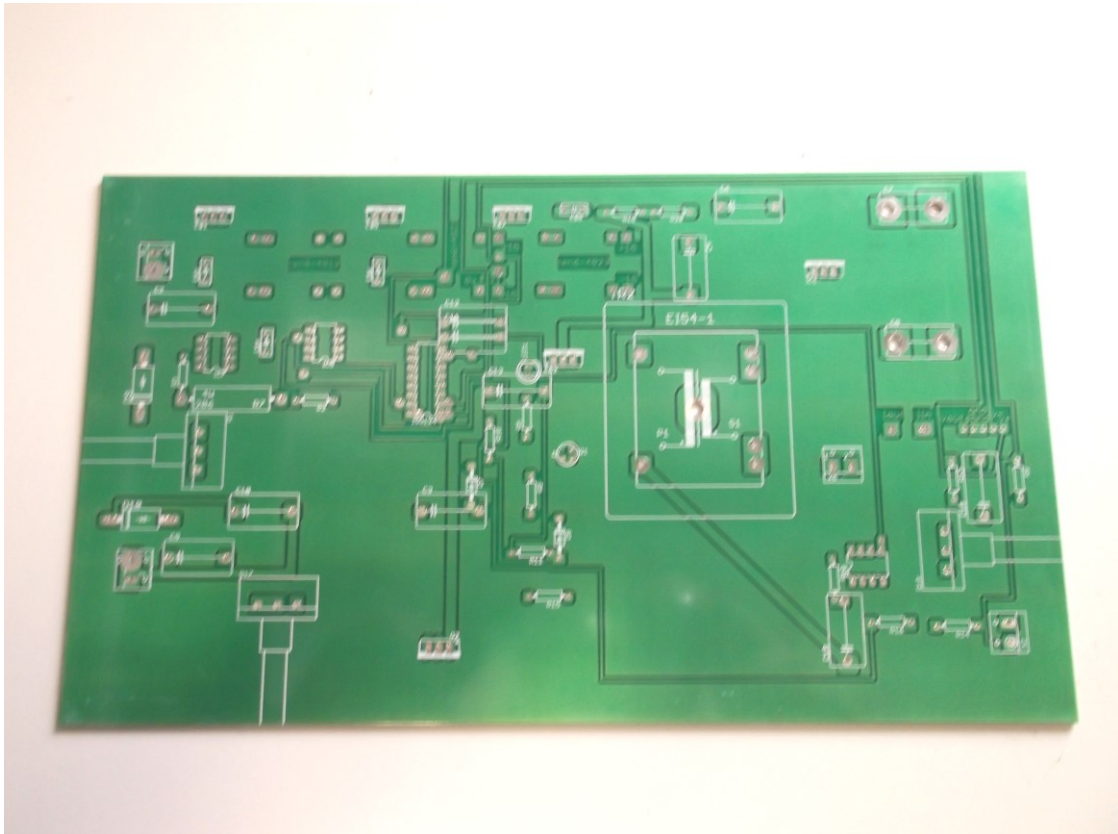


Figura 127 – Foto da vista superior da placa de circuito impresso.

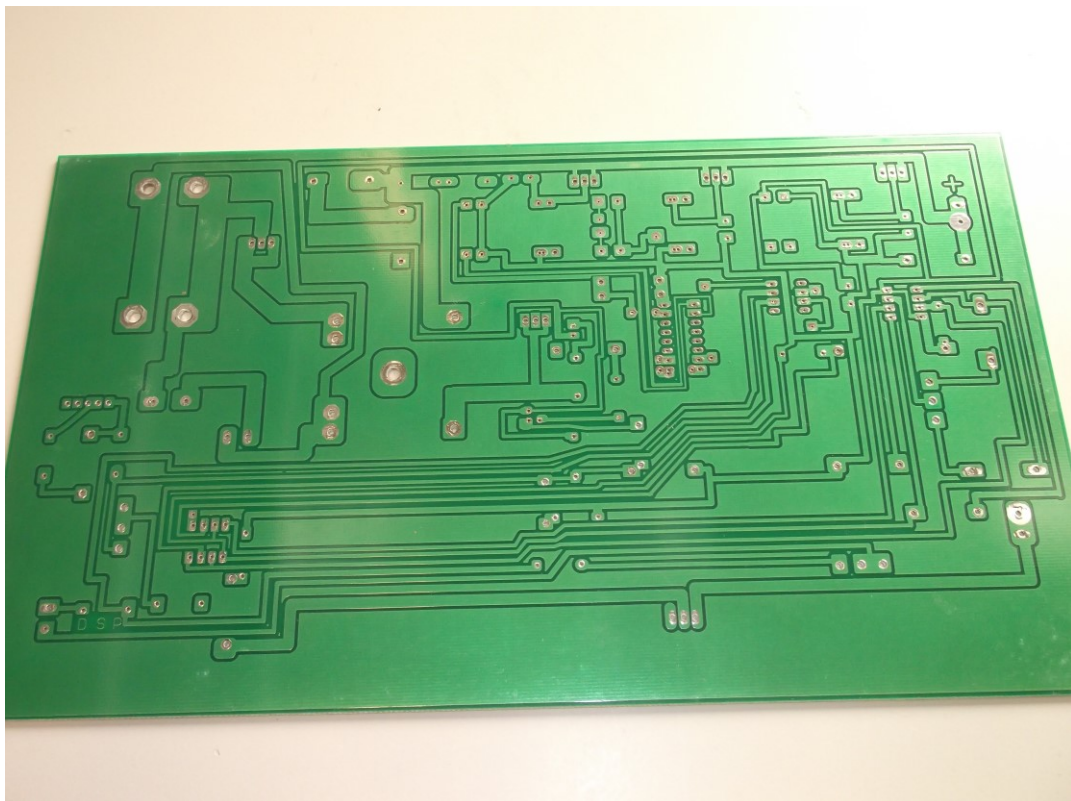


Figura 128 – Foto da vista inferior da placa de circuito impresso.

Anexo V – Dados de consumo de uma vivenda

Os dados da tabela 27, são relativos ao diagrama do consumo medido numa vivenda da cidade de Coimbra durante o período de uma semana entre os dias 24 e 30 de janeiro de 2016.

Tabela 27– Energia consumida na vivenda entre 24-1-2016 e 30-1-2016.

1ª Semana	Potência:	1ª Semana	Potência:	1ª Semana	Potência:	1ª Semana	Potência:
Período	W	Período	W	Período	W	Período	W
24-01-2016 00:15	132	25-01-2016 18:15	156	27-01-2016 12:15	4056	29-01-2016 06:15	40
24-01-2016 00:30	104	25-01-2016 18:30	1748	27-01-2016 12:30	4484	29-01-2016 06:30	24
24-01-2016 00:45	1332	25-01-2016 18:45	3144	27-01-2016 12:45	3772	29-01-2016 06:45	24
24-01-2016 01:00	572	25-01-2016 19:00	3164	27-01-2016 13:00	4248	29-01-2016 07:00	24
24-01-2016 01:15	92	26-01-2016 19:00	2904	27-01-2016 13:15	3240	29-01-2016 07:15	24
24-01-2016 01:30	80	25-01-2016 19:30	2376	27-01-2016 13:30	320	29-01-2016 07:30	20
24-01-2016 01:45	84	25-01-2016 19:45	3260	27-01-2016 13:45	296	29-01-2016 07:45	24
24-01-2016 02:00	40	25-01-2016 20:00	2804	27-01-2016 14:00	1996	29-01-2016 08:00	24
24-01-2016 02:15	32	25-01-2016 20:15	2272	27-01-2016 14:15	340	29-01-2016 08:15	1912
24-01-2016 02:30	32	25-01-2016 20:30	1444	27-01-2016 14:30	76	29-01-2016 08:30	1824
24-01-2016 02:45	32	25-01-2016 20:45	1504	27-01-2016 14:45	76	29-01-2016 08:45	28
24-01-2016 03:00	32	25-01-2016 21:00	700	27-01-2016 15:00	88	29-01-2016 09:00	24
24-01-2016 03:15	32	25-01-2016 21:15	364	27-01-2016 15:15	48	29-01-2016 09:15	20
24-01-2016 03:30	28	25-01-2016 21:30	256	27-01-2016 15:30	48	29-01-2016 09:30	60
24-01-2016 03:45	24	25-01-2016 21:45	1324	27-01-2016 15:45	80	29-01-2016 09:45	96
24-01-2016 04:00	24	25-01-2016 22:00	1772	27-01-2016 16:00	48	29-01-2016 10:00	24
24-01-2016 04:15	24	25-01-2016 22:15	416	27-01-2016 16:15	48	29-01-2016 10:15	88
24-01-2016 04:30	24	25-01-2016 22:30	200	27-01-2016 16:30	60	29-01-2016 10:30	100
24-01-2016 04:45	24	25-01-2016 22:45	144	27-01-2016 16:45	48	29-01-2016 10:45	108
24-01-2016 05:00	24	25-01-2016 23:00	148	27-01-2016 17:00	52	29-01-2016 11:00	104
24-01-2016 05:15	24	25-01-2016 23:15	908	27-01-2016 17:15	40	29-01-2016 11:15	104
24-01-2016 05:30	24	25-01-2016 23:30	1088	27-01-2016 17:30	100	29-01-2016 11:30	2028
24-01-2016 05:45	24	25-01-2016 23:45	1044	27-01-2016 17:45	144	29-01-2016 11:45	3240
24-01-2016 06:00	44	26-01-2016 00:00	1048	27-01-2016 18:00	2684	29-01-2016 12:00	2420
24-01-2016 06:15	80	26-01-2016 00:15	1096	27-01-2016 18:15	1928	29-01-2016 12:15	2812
24-01-2016 06:30	80	26-01-2016 00:30	824	27-01-2016 18:30	152	29-01-2016 12:30	3256
24-01-2016 06:45	72	26-01-2016 00:45	144	27-01-2016 18:45	160	29-01-2016 12:45	3124
24-01-2016 07:00	72	26-01-2016 01:00	112	27-01-2016 19:00	128	29-01-2016 13:00	928
24-01-2016 07:15	72	26-01-2016 01:15	64	27-01-2016 19:15	132	29-01-2016 13:15	628
24-01-2016 07:30	68	26-01-2016 01:30	1380	27-01-2016 19:30	128	29-01-2016 13:30	280
24-01-2016 07:45	72	26-01-2016 01:45	1312	27-01-2016 19:45	944	29-01-2016 13:45	208
24-01-2016 08:00	72	26-01-2016 02:00	32	27-01-2016 20:00	1208	29-01-2016 14:00	92
24-01-2016 08:15	112	26-01-2016 02:15	32	27-01-2016 20:15	1088	29-01-2016 14:15	140
24-01-2016 08:30	116	26-01-2016 02:30	40	27-01-2016 20:30	184	29-01-2016 14:30	140
24-01-2016 08:45	112	26-01-2016 02:45	32	27-01-2016 20:45	184	29-01-2016 14:45	116
24-01-2016 09:00	48	26-01-2016 03:00	28	27-01-2016 21:00	120	29-01-2016 15:00	68
24-01-2016 09:15	56	26-01-2016 03:15	60	27-01-2016 21:15	88	29-01-2016 15:15	68
24-01-2016 09:30	24	26-01-2016 03:30	76	27-01-2016 21:30	56	29-01-2016 15:30	68
24-01-2016 09:45	104	26-01-2016 03:45	76	27-01-2016 21:45	40	29-01-2016 15:45	68
24-01-2016 10:00	44	26-01-2016 04:00	72	27-01-2016 22:00	40	29-01-2016 16:00	56
24-01-2016 10:15	20	26-01-2016 04:15	68	27-01-2016 22:15	40	29-01-2016 16:15	24
24-01-2016 10:30	88	26-01-2016 04:30	68	27-01-2016 22:30	44	29-01-2016 16:30	24
24-01-2016 10:45	48	26-01-2016 04:45	68	27-01-2016 22:45	32	29-01-2016 16:45	24
24-01-2016 11:00	20	26-01-2016 05:00	72	27-01-2016 23:00	108	29-01-2016 17:00	24
24-01-2016 11:15	24	26-01-2016 05:15	68	27-01-2016 23:15	2124	29-01-2016 17:15	20
24-01-2016 11:30	20	26-01-2016 05:30	68	27-01-2016 23:30	2160	29-01-2016 17:30	24
24-01-2016 11:45	64	26-01-2016 05:45	64	27-01-2016 23:45	2176	29-01-2016 17:45	412
24-01-2016 12:00	92	26-01-2016 06:00	76	28-01-2016 00:00	2192	29-01-2016 18:00	1580
24-01-2016 12:15	88	26-01-2016 06:15	76	28-01-2016 00:15	1840	29-01-2016 18:15	40
24-01-2016 12:30	88	26-01-2016 06:30	76	28-01-2016 00:30	52	29-01-2016 18:30	36
24-01-2016 12:45	20	26-01-2016 06:45	76	28-01-2016 00:45	24	29-01-2016 18:45	36
24-01-2016 13:00	24	26-01-2016 07:00	72	28-01-2016 01:00	32	29-01-2016 19:00	36
24-01-2016 13:15	76	26-01-2016 07:15	72	28-01-2016 01:15	28	29-01-2016 19:15	280
24-01-2016 13:30	76	26-01-2016 07:30	76	28-01-2016 01:30	32	29-01-2016 19:30	84
24-01-2016 13:45	76	26-01-2016 07:45	88	28-01-2016 01:45	48	29-01-2016 19:45	84
24-01-2016 14:00	72	26-01-2016 08:00	2064	28-01-2016 02:00	84	29-01-2016 20:00	80

1ª Semana	Potência:	1ª Semana	Potência:	1ª Semana	Potência:	1ª Semana	Potência:
Período	W	Período	W	Período	W	Período	W
24-01-2016 14:15	76	26-01-2016 08:15	2228	28-01-2016 02:15	76	29-01-2016 20:15	76
24-01-2016 14:30	1764	26-01-2016 08:30	2008	28-01-2016 02:30	76	29-01-2016 20:30	76
24-01-2016 14:45	2768	26-01-2016 08:45	72	28-01-2016 02:45	72	29-01-2016 20:45	76
24-01-2016 15:00	480	26-01-2016 09:00	72	28-01-2016 03:00	72	29-01-2016 21:00	68
24-01-2016 15:15	20	26-01-2016 09:15	72	28-01-2016 03:15	72	29-01-2016 21:15	56
24-01-2016 15:30	24	26-01-2016 09:30	68	28-01-2016 03:30	68	29-01-2016 21:30	48
24-01-2016 15:45	24	26-01-2016 09:45	116	28-01-2016 03:45	72	29-01-2016 21:45	88
24-01-2016 16:00	20	26-01-2016 10:00	144	28-01-2016 04:00	68	29-01-2016 22:00	100
24-01-2016 16:15	28	26-01-2016 10:15	144	28-01-2016 04:15	68	29-01-2016 22:15	88
24-01-2016 16:30	28	26-01-2016 10:30	144	28-01-2016 04:30	68	29-01-2016 22:30	72
24-01-2016 16:45	28	26-01-2016 10:45	120	28-01-2016 04:45	68	29-01-2016 22:45	72
24-01-2016 17:00	32	26-01-2016 11:00	96	28-01-2016 05:00	68	29-01-2016 23:00	72
24-01-2016 17:15	40	26-01-2016 11:15	248	28-01-2016 05:15	68	29-01-2016 23:15	68
24-01-2016 17:30	88	26-01-2016 11:30	1456	28-01-2016 05:30	24	29-01-2016 23:30	72
24-01-2016 17:45	80	26-01-2016 11:45	252	28-01-2016 05:45	24	29-01-2016 23:45	68
24-01-2016 18:00	80	26-01-2016 12:00	332	28-01-2016 06:00	24	30-01-2016 00:00	84
24-01-2016 18:15	92	26-01-2016 12:15	224	28-01-2016 06:15	20	30-01-2016 00:15	80
24-01-2016 18:30	136	26-01-2016 12:30	192	28-01-2016 06:30	24	30-01-2016 00:30	84
24-01-2016 18:45	140	26-01-2016 12:45	336	28-01-2016 06:45	24	30-01-2016 00:45	80
24-01-2016 19:00	168	26-01-2016 13:00	624	28-01-2016 07:00	24	30-01-2016 01:00	72
24-01-2016 19:15	156	26-01-2016 13:15	208	28-01-2016 07:15	24	30-01-2016 01:15	76
24-01-2016 19:30	156	26-01-2016 13:30	148	28-01-2016 07:30	20	30-01-2016 01:30	1608
24-01-2016 19:45	320	26-01-2016 13:45	2632	28-01-2016 07:45	40	30-01-2016 01:45	1188
24-01-2016 20:00	840	26-01-2016 14:00	3108	28-01-2016 08:00	1968	30-01-2016 02:00	64
24-01-2016 20:15	100	26-01-2016 14:15	168	28-01-2016 08:15	1296	30-01-2016 02:15	88
24-01-2016 20:30	96	26-01-2016 14:30	140	28-01-2016 08:30	20	30-01-2016 02:30	76
24-01-2016 20:45	92	26-01-2016 14:45	168	28-01-2016 08:45	24	30-01-2016 02:45	28
24-01-2016 21:00	260	26-01-2016 15:00	156	28-01-2016 09:00	24	30-01-2016 03:00	24
24-01-2016 21:15	1908	26-01-2016 15:15	84	28-01-2016 09:15	20	30-01-2016 03:15	28
24-01-2016 21:30	2160	26-01-2016 15:30	276	28-01-2016 09:30	24	30-01-2016 03:30	24
24-01-2016 21:45	2208	26-01-2016 15:45	492	28-01-2016 09:45	24	30-01-2016 03:45	24
24-01-2016 22:00	2264	26-01-2016 16:00	136	28-01-2016 10:00	20	30-01-2016 04:00	24
24-01-2016 22:15	2288	26-01-2016 16:15	128	28-01-2016 10:15	60	30-01-2016 04:15	24
24-01-2016 22:30	2468	26-01-2016 16:30	132	28-01-2016 10:30	80	30-01-2016 04:30	24
24-01-2016 22:45	848	26-01-2016 16:45	128	28-01-2016 10:45	72	30-01-2016 04:45	24
24-01-2016 23:00	104	26-01-2016 17:00	84	28-01-2016 11:00	72	30-01-2016 05:00	24
24-01-2016 23:15	92	26-01-2016 17:15	84	28-01-2016 11:15	72	30-01-2016 05:15	24
24-01-2016 23:30	112	26-01-2016 17:30	88	28-01-2016 11:30	72	30-01-2016 05:30	24
24-01-2016 23:45	136	26-01-2016 17:45	92	28-01-2016 11:45	148	30-01-2016 05:45	24
25-01-2016 00:00	160	26-01-2016 18:00	740	28-01-2016 12:00	140	30-01-2016 06:00	24
25-01-2016 00:15	136	26-01-2016 18:15	2112	28-01-2016 12:15	232	30-01-2016 06:15	24
25-01-2016 00:30	60	26-01-2016 18:30	2324	28-01-2016 12:30	392	30-01-2016 06:30	24
25-01-2016 00:45	48	26-01-2016 18:45	3016	28-01-2016 12:45	2188	30-01-2016 06:45	24
25-01-2016 01:00	44	26-01-2016 19:00	1044	28-01-2016 13:00	2204	30-01-2016 07:00	24
25-01-2016 01:15	40	26-01-2016 19:15	224	28-01-2016 13:15	444	30-01-2016 07:15	24
25-01-2016 01:30	36	26-01-2016 19:30	20	28-01-2016 13:30	136	30-01-2016 07:30	24
25-01-2016 01:45	28	26-01-2016 19:45	24	28-01-2016 13:45	60	30-01-2016 07:45	24
25-01-2016 02:00	76	26-01-2016 20:00	64	28-01-2016 14:00	88	30-01-2016 08:00	24
25-01-2016 02:15	84	26-01-2016 20:15	76	28-01-2016 14:15	20	30-01-2016 08:15	24
25-01-2016 02:30	76	26-01-2016 20:30	72	28-01-2016 14:30	24	30-01-2016 08:30	1748
25-01-2016 02:45	76	26-01-2016 20:45	72	28-01-2016 14:45	24	30-01-2016 08:45	1080
25-01-2016 03:00	72	26-01-2016 21:00	68	28-01-2016 15:00	24	30-01-2016 09:00	252
25-01-2016 03:15	28	26-01-2016 21:15	72	28-01-2016 15:15	20	30-01-2016 09:15	2284
25-01-2016 03:30	28	26-01-2016 21:30	64	28-01-2016 15:30	24	30-01-2016 09:30	2116
25-01-2016 03:45	24	26-01-2016 21:45	68	28-01-2016 15:45	24	30-01-2016 09:45	88
25-01-2016 04:00	24	26-01-2016 22:00	68	28-01-2016 16:00	24	30-01-2016 10:00	24
25-01-2016 04:15	24	26-01-2016 22:15	364	28-01-2016 16:15	20	30-01-2016 10:15	52
25-01-2016 04:30	24	26-01-2016 22:30	412	28-01-2016 16:30	200	30-01-2016 10:30	80
25-01-2016 04:45	36	26-01-2016 22:45	136	28-01-2016 16:45	148	30-01-2016 10:45	80
25-01-2016 05:00	32	26-01-2016 23:00	132	28-01-2016 17:00	912	30-01-2016 11:00	72
25-01-2016 05:15	92	26-01-2016 23:15	124	28-01-2016 17:15	1368	30-01-2016 11:15	72
25-01-2016 05:30	88	26-01-2016 23:30	80	28-01-2016 17:30	496	30-01-2016 11:30	72
25-01-2016 05:45	80	26-01-2016 23:45	140	28-01-2016 17:45	1848	30-01-2016 11:45	68
25-01-2016 06:00	80	27-01-2016 00:00	136	28-01-2016 18:00	2452	30-01-2016 12:00	72
25-01-2016 06:15	72	27-01-2016 00:15	2192	28-01-2016 18:15	392	30-01-2016 12:15	68
25-01-2016 06:30	72	27-01-2016 00:30	2220	28-01-2016 18:30	396	30-01-2016 12:30	68

1ª Semana	Potência:	1ª Semana	Potência:	1ª Semana	Potência:	1ª Semana	Potência:
Período	W	Período	W	Período	W	Período	W
25-01-2016 06:45	72	27-01-2016 00:45	2200	28-01-2016 18:45	332	30-01-2016 12:45	68
25-01-2016 07:00	44	27-01-2016 01:00	864	28-01-2016 19:00	324	30-01-2016 13:00	68
25-01-2016 07:15	1164	27-01-2016 01:15	52	28-01-2016 19:15	260	30-01-2016 13:15	68
25-01-2016 07:30	1004	27-01-2016 01:30	48	28-01-2016 19:30	288	30-01-2016 13:30	68
25-01-2016 07:45	68	27-01-2016 01:45	48	28-01-2016 19:45	256	30-01-2016 13:45	68
25-01-2016 08:00	72	27-01-2016 02:00	40	28-01-2016 20:00	268	30-01-2016 14:00	68
25-01-2016 08:15	356	27-01-2016 02:15	32	28-01-2016 20:15	224	30-01-2016 14:15	64
25-01-2016 08:30	300	27-01-2016 02:30	32	28-01-2016 20:30	284	30-01-2016 14:30	68
25-01-2016 08:45	636	27-01-2016 02:45	32	28-01-2016 20:45	292	30-01-2016 14:45	68
25-01-2016 09:00	2208	27-01-2016 03:00	32	28-01-2016 21:00	240	30-01-2016 15:00	64
25-01-2016 09:15	2224	27-01-2016 03:15	28	28-01-2016 21:15	192	30-01-2016 15:15	48
25-01-2016 09:30	2116	27-01-2016 03:30	76	28-01-2016 21:30	40	30-01-2016 15:30	24
25-01-2016 09:45	76	27-01-2016 03:45	80	28-01-2016 21:45	24	30-01-2016 15:45	24
25-01-2016 10:00	76	27-01-2016 04:00	80	28-01-2016 22:00	28	30-01-2016 16:00	24
25-01-2016 10:15	72	27-01-2016 04:15	72	28-01-2016 22:15	28	30-01-2016 16:15	20
25-01-2016 10:30	72	27-01-2016 04:30	72	28-01-2016 22:30	24	30-01-2016 16:30	24
25-01-2016 10:45	72	27-01-2016 04:45	68	28-01-2016 22:45	136	30-01-2016 16:45	24
25-01-2016 11:00	72	27-01-2016 05:00	72	28-01-2016 23:00	2876	30-01-2016 17:00	24
25-01-2016 11:15	68	27-01-2016 05:15	68	28-01-2016 23:15	3636	30-01-2016 17:15	352
25-01-2016 11:30	88	27-01-2016 05:30	72	28-01-2016 23:30	2288	30-01-2016 17:30	1832
25-01-2016 11:45	96	27-01-2016 05:45	68	28-01-2016 23:45	2300	30-01-2016 17:45	24
25-01-2016 12:00	3716	27-01-2016 06:00	68	29-01-2016 00:00	2416	30-01-2016 18:00	24
25-01-2016 12:15	2304	27-01-2016 06:15	68	29-01-2016 00:15	648	30-01-2016 18:15	20
25-01-2016 12:30	1036	27-01-2016 06:30	68	29-01-2016 00:30	52	30-01-2016 18:30	24
25-01-2016 12:45	856	27-01-2016 06:45	68	29-01-2016 00:45	56	30-01-2016 18:45	20
25-01-2016 13:00	976	27-01-2016 07:00	56	29-01-2016 01:00	56	30-01-2016 19:00	24
25-01-2016 13:15	884	27-01-2016 07:15	28	29-01-2016 01:15	56	30-01-2016 19:15	24
25-01-2016 13:30	316	27-01-2016 07:30	108	29-01-2016 01:30	52	30-01-2016 19:30	20
25-01-2016 13:45	60	27-01-2016 07:45	140	29-01-2016 01:45	56	30-01-2016 19:45	24
25-01-2016 14:00	56	27-01-2016 08:00	152	29-01-2016 02:00	52	30-01-2016 20:00	24
25-01-2016 14:15	56	27-01-2016 08:15	384	29-01-2016 02:15	56	30-01-2016 20:15	24
25-01-2016 14:30	108	27-01-2016 08:30	80	29-01-2016 02:30	60	30-01-2016 20:30	20
25-01-2016 14:45	100	27-01-2016 08:45	28	29-01-2016 02:45	84	30-01-2016 20:45	24
25-01-2016 15:00	100	27-01-2016 09:00	32	29-01-2016 03:00	76	30-01-2016 21:00	24
25-01-2016 15:15	1524	27-01-2016 09:15	28	29-01-2016 03:15	76	30-01-2016 21:15	20
25-01-2016 15:30	336	27-01-2016 09:30	28	29-01-2016 03:30	72	30-01-2016 21:30	24
25-01-2016 15:45	96	27-01-2016 09:45	68	29-01-2016 03:45	68	30-01-2016 21:45	24
25-01-2016 16:00	92	27-01-2016 10:00	100	29-01-2016 04:00	72	30-01-2016 22:00	24
25-01-2016 16:15	96	27-01-2016 10:15	1540	29-01-2016 04:15	68	30-01-2016 22:15	20
25-01-2016 16:30	100	27-01-2016 10:30	2216	29-01-2016 04:30	68	30-01-2016 22:30	24
25-01-2016 16:45	92	27-01-2016 10:45	640	29-01-2016 04:45	68	30-01-2016 22:45	24
25-01-2016 17:00	136	27-01-2016 11:00	104	29-01-2016 05:00	68	30-01-2016 23:00	24
25-01-2016 17:15	1432	27-01-2016 11:15	92	29-01-2016 05:15	68	30-01-2016 23:15	20
25-01-2016 17:30	584	27-01-2016 11:30	480	29-01-2016 05:30	68	30-01-2016 23:30	80
25-01-2016 17:45	164	27-01-2016 11:45	2312	29-01-2016 05:45	68	30-01-2016 23:45	80
25-01-2016 18:00	212	27-01-2016 12:00	2392	29-01-2016 06:00	68	30-01-2016 00:00	80

Os dados da tabela 28, são relativos ao diagrama do consumo medido numa vivenda da cidade de Coimbra durante o período de uma semana entre o dia 31 de janeiro e 7 de fevereiro de 2016.

Tabela 28– Energia consumida na vivenda entre 31-1-2016 e 7-2-2016.

2ª Semana	Potência:	2ª Semana	Potência:	2ª Semana	Potência:	2ª Semana	Potência:
Período	W	Período	W	Período	W	Período	W
31-01-2016 00:15	72	01-02-2016 18:15	24	03-02-2016 12:15	144	05-02-2016 06:15	88
31-01-2016 00:30	72	01-02-2016 18:30	24	03-02-2016 12:30	136	05-02-2016 06:30	88
31-01-2016 00:45	72	01-02-2016 18:45	24	03-02-2016 12:45	140	05-02-2016 06:45	92
31-01-2016 01:00	72	01-02-2016 19:00	20	03-02-2016 13:00	136	05-02-2016 07:00	88
31-01-2016 01:15	68	01-02-2016 19:15	24	03-02-2016 13:15	136	05-02-2016 07:15	84
31-01-2016 01:30	68	01-02-2016 19:30	24	03-02-2016 13:30	84	05-02-2016 07:30	484
31-01-2016 01:45	1432	01-02-2016 19:45	24	03-02-2016 13:45	116	05-02-2016 07:45	3628
31-01-2016 02:00	868	01-02-2016 20:00	20	03-02-2016 14:00	92	05-02-2016 08:00	2780
31-01-2016 02:15	68	01-02-2016 20:15	24	03-02-2016 14:15	68	05-02-2016 08:15	2272
31-01-2016 02:30	68	01-02-2016 20:30	24	03-02-2016 14:30	128	05-02-2016 08:30	1564

2ª Semana	Potência:	2ª Semana	Potência:	2ª Semana	Potência:	2ª Semana	Potência:
Período	W	Período	W	Período	W	Período	W
31-01-2016 02:45	68	01-02-2016 20:45	24	03-02-2016 14:45	68	05-02-2016 08:45	300
31-01-2016 03:00	68	01-02-2016 21:00	20	03-02-2016 15:00	64	05-02-2016 09:00	44
31-01-2016 03:15	68	01-02-2016 21:15	24	03-02-2016 15:15	24	05-02-2016 09:15	24
31-01-2016 03:30	64	01-02-2016 21:30	24	03-02-2016 15:30	24	05-02-2016 09:30	52
31-01-2016 03:45	68	01-02-2016 21:45	24	03-02-2016 15:45	24	05-02-2016 09:45	52
31-01-2016 04:00	64	01-02-2016 22:00	52	03-02-2016 16:00	24	05-02-2016 10:00	76
31-01-2016 04:15	68	01-02-2016 22:15	84	03-02-2016 16:15	24	05-02-2016 10:15	96
31-01-2016 04:30	24	01-02-2016 22:30	76	03-02-2016 16:30	508	05-02-2016 10:30	96
31-01-2016 04:45	24	01-02-2016 22:45	76	03-02-2016 16:45	1580	05-02-2016 10:45	92
31-01-2016 05:00	24	01-02-2016 23:00	88	03-02-2016 17:00	24	05-02-2016 11:00	96
31-01-2016 05:15	24	01-02-2016 23:15	1008	03-02-2016 17:15	24	05-02-2016 11:15	96
31-01-2016 05:30	20	01-02-2016 23:30	2280	03-02-2016 17:30	24	05-02-2016 11:30	124
31-01-2016 05:45	24	01-02-2016 23:45	2216	03-02-2016 17:45	20	05-02-2016 11:45	156
31-01-2016 06:00	24	02-02-2016 00:00	2200	03-02-2016 18:00	24	05-02-2016 12:00	148
31-01-2016 06:15	24	02-02-2016 00:15	76	03-02-2016 18:15	24	05-02-2016 12:15	148
31-01-2016 06:30	24	02-02-2016 00:30	80	03-02-2016 18:30	24	05-02-2016 12:30	144
31-01-2016 06:45	24	02-02-2016 00:45	72	03-02-2016 18:45	24	05-02-2016 12:45	144
31-01-2016 07:00	20	02-02-2016 01:00	76	03-02-2016 19:00	20	05-02-2016 13:00	196
31-01-2016 07:15	24	02-02-2016 01:15	68	03-02-2016 19:15	24	05-02-2016 13:15	2320
31-01-2016 07:30	24	02-02-2016 01:30	72	03-02-2016 19:30	24	05-02-2016 13:30	1972
31-01-2016 07:45	24	02-02-2016 01:45	68	03-02-2016 19:45	24	05-02-2016 13:45	256
31-01-2016 08:00	20	02-02-2016 02:00	68	03-02-2016 20:00	20	05-02-2016 14:00	212
31-01-2016 08:15	24	02-02-2016 02:15	68	03-02-2016 20:15	24	05-02-2016 14:15	340
31-01-2016 08:30	24	02-02-2016 02:30	68	03-02-2016 20:30	24	05-02-2016 14:30	292
31-01-2016 08:45	20	02-02-2016 02:45	68	03-02-2016 20:45	24	05-02-2016 14:45	68
31-01-2016 09:00	24	02-02-2016 03:00	40	03-02-2016 21:00	24	05-02-2016 15:00	68
31-01-2016 09:15	24	02-02-2016 03:15	24	03-02-2016 21:15	24	05-02-2016 15:15	68
31-01-2016 09:30	20	02-02-2016 03:30	24	03-02-2016 21:30	24	05-02-2016 15:30	68
31-01-2016 09:45	24	02-02-2016 03:45	24	03-02-2016 21:45	20	05-02-2016 15:45	52
31-01-2016 10:00	24	02-02-2016 04:00	28	03-02-2016 22:00	24	05-02-2016 16:00	24
31-01-2016 10:15	1528	02-02-2016 04:15	24	03-02-2016 22:15	24	05-02-2016 16:15	24
31-01-2016 10:30	664	02-02-2016 04:30	24	03-02-2016 22:30	24	05-02-2016 16:30	24
31-01-2016 10:45	24	02-02-2016 04:45	24	03-02-2016 22:45	24	05-02-2016 16:45	24
31-01-2016 11:00	24	02-02-2016 05:00	28	03-02-2016 23:00	128	05-02-2016 17:00	24
31-01-2016 11:15	24	02-02-2016 05:15	24	03-02-2016 23:15	92	05-02-2016 17:15	24
31-01-2016 11:30	48	02-02-2016 05:30	24	03-02-2016 23:30	80	05-02-2016 17:30	20
31-01-2016 11:45	96	02-02-2016 05:45	24	03-02-2016 23:45	76	05-02-2016 17:45	24
31-01-2016 12:00	56	02-02-2016 06:00	20	04-02-2016 00:00	72	05-02-2016 18:00	40
31-01-2016 12:15	20	02-02-2016 06:15	24	04-02-2016 00:15	304	05-02-2016 18:15	1324
31-01-2016 12:30	24	02-02-2016 06:30	24	04-02-2016 00:30	1896	05-02-2016 18:30	816
31-01-2016 12:45	76	02-02-2016 06:45	24	04-02-2016 00:45	68	05-02-2016 18:45	108
31-01-2016 13:00	80	02-02-2016 07:00	24	04-02-2016 01:00	72	05-02-2016 19:00	104
31-01-2016 13:15	76	02-02-2016 07:15	24	04-02-2016 01:15	68	05-02-2016 19:15	24
31-01-2016 13:30	76	02-02-2016 07:30	24	04-02-2016 01:30	68	05-02-2016 19:30	24
31-01-2016 13:45	72	02-02-2016 07:45	28	04-02-2016 01:45	68	05-02-2016 19:45	20
31-01-2016 14:00	72	02-02-2016 08:00	120	04-02-2016 02:00	64	05-02-2016 20:00	24
31-01-2016 14:15	72	02-02-2016 08:15	912	04-02-2016 02:15	68	05-02-2016 20:15	24
31-01-2016 14:30	68	02-02-2016 08:30	2220	04-02-2016 02:30	68	05-02-2016 20:30	24
31-01-2016 14:45	72	02-02-2016 08:45	36	04-02-2016 02:45	68	05-02-2016 20:45	20
31-01-2016 15:00	68	02-02-2016 09:00	20	04-02-2016 03:00	68	05-02-2016 21:00	24
31-01-2016 15:15	68	02-02-2016 09:15	24	04-02-2016 03:15	28	05-02-2016 21:15	24
31-01-2016 15:30	68	02-02-2016 09:30	24	04-02-2016 03:30	24	05-02-2016 21:30	24
31-01-2016 15:45	68	02-02-2016 09:45	20	04-02-2016 03:45	24	05-02-2016 21:45	24
31-01-2016 16:00	68	02-02-2016 10:00	24	04-02-2016 04:00	24	05-02-2016 22:00	24
31-01-2016 16:15	68	02-02-2016 10:15	24	04-02-2016 04:15	24	05-02-2016 22:15	44
31-01-2016 16:30	68	02-02-2016 10:30	24	04-02-2016 04:30	20	05-02-2016 22:30	80
31-01-2016 16:45	76	02-02-2016 10:45	76	04-02-2016 04:45	24	05-02-2016 22:45	408
31-01-2016 17:00	104	02-02-2016 11:00	80	04-02-2016 05:00	24	05-02-2016 23:00	2616
31-01-2016 17:15	100	02-02-2016 11:15	80	04-02-2016 05:15	24	05-02-2016 23:15	2604
31-01-2016 17:30	104	02-02-2016 11:30	72	04-02-2016 05:30	24	05-02-2016 23:30	924
31-01-2016 17:45	108	02-02-2016 11:45	76	04-02-2016 05:45	20	05-02-2016 23:45	148
31-01-2016 18:00	1268	02-02-2016 12:00	104	04-02-2016 06:00	24	06-02-2016 00:00	124
31-01-2016 18:15	1108	02-02-2016 12:15	68	04-02-2016 06:15	24	06-02-2016 00:15	72
31-01-2016 18:30	84	02-02-2016 12:30	72	04-02-2016 06:30	24	06-02-2016 00:30	100
31-01-2016 18:45	72	02-02-2016 12:45	68	04-02-2016 06:45	20	06-02-2016 00:45	104
31-01-2016 19:00	160	02-02-2016 13:00	68	04-02-2016 07:00	24	06-02-2016 01:00	108

2ª Semana	Potência:	2ª Semana	Potência:	2ª Semana	Potência:	2ª Semana	Potência:
Período	W	Período	W	Período	W	Período	W
31-01-2016 19:15	68	02-02-2016 13:15	68	04-02-2016 07:15	28	06-02-2016 01:15	1468
31-01-2016 19:30	64	02-02-2016 13:30	68	04-02-2016 07:30	32	06-02-2016 01:30	428
31-01-2016 19:45	52	02-02-2016 13:45	68	04-02-2016 07:45	44	06-02-2016 01:45	84
31-01-2016 20:00	52	02-02-2016 14:00	68	04-02-2016 08:00	1156	06-02-2016 02:00	72
31-01-2016 20:15	208	02-02-2016 14:15	120	04-02-2016 08:15	2188	06-02-2016 02:15	76
31-01-2016 20:30	1008	02-02-2016 14:30	140	04-02-2016 08:30	2168	06-02-2016 02:30	68
31-01-2016 20:45	760	02-02-2016 14:45	64	04-02-2016 08:45	1716	06-02-2016 02:45	68
31-01-2016 21:00	456	02-02-2016 15:00	68	04-02-2016 09:00	20	06-02-2016 03:00	24
31-01-2016 21:15	64	02-02-2016 15:15	32	04-02-2016 09:15	24	06-02-2016 03:15	24
31-01-2016 21:30	60	02-02-2016 15:30	24	04-02-2016 09:30	72	06-02-2016 03:30	24
31-01-2016 21:45	60	02-02-2016 15:45	24	04-02-2016 09:45	24	06-02-2016 03:45	24
31-01-2016 22:00	388	02-02-2016 16:00	24	04-02-2016 10:00	84	06-02-2016 04:00	24
31-01-2016 22:15	2092	02-02-2016 16:15	24	04-02-2016 10:15	44	06-02-2016 04:15	24
31-01-2016 22:30	404	02-02-2016 16:30	932	04-02-2016 10:30	100	06-02-2016 04:30	24
31-01-2016 22:45	56	02-02-2016 16:45	1228	04-02-2016 10:45	120	06-02-2016 04:45	24
31-01-2016 23:00	56	02-02-2016 17:00	24	04-02-2016 11:00	152	06-02-2016 05:00	24
31-01-2016 23:15	52	02-02-2016 17:15	24	04-02-2016 11:15	104	06-02-2016 05:15	24
31-01-2016 23:30	52	02-02-2016 17:30	24	04-02-2016 11:30	148	06-02-2016 05:30	24
31-01-2016 23:45	44	02-02-2016 17:45	24	04-02-2016 11:45	144	06-02-2016 05:45	24
01-02-2016 00:00	44	02-02-2016 18:00	20	04-02-2016 12:00	140	06-02-2016 06:00	24
01-02-2016 00:15	36	02-02-2016 18:15	24	04-02-2016 12:15	140	06-02-2016 06:15	24
01-02-2016 00:30	36	02-02-2016 18:30	24	04-02-2016 12:30	140	06-02-2016 06:30	24
01-02-2016 00:45	36	02-02-2016 18:45	20	04-02-2016 12:45	136	06-02-2016 06:45	24
01-02-2016 01:00	32	02-02-2016 19:00	24	04-02-2016 13:00	140	06-02-2016 07:00	20
01-02-2016 01:15	36	02-02-2016 19:15	24	04-02-2016 13:15	136	06-02-2016 07:15	24
01-02-2016 01:30	72	02-02-2016 19:30	24	04-02-2016 13:30	80	06-02-2016 07:30	24
01-02-2016 01:45	96	02-02-2016 19:45	20	04-02-2016 13:45	148	06-02-2016 07:45	24
01-02-2016 02:00	88	02-02-2016 20:00	24	04-02-2016 14:00	136	06-02-2016 08:00	24
01-02-2016 02:15	88	02-02-2016 20:15	20	04-02-2016 14:15	80	06-02-2016 08:15	32
01-02-2016 02:30	84	02-02-2016 20:30	24	04-02-2016 14:30	64	06-02-2016 08:30	24
01-02-2016 02:45	80	02-02-2016 20:45	24	04-02-2016 14:45	68	06-02-2016 08:45	24
01-02-2016 03:00	72	02-02-2016 21:00	24	04-02-2016 15:00	64	06-02-2016 09:00	20
01-02-2016 03:15	72	02-02-2016 21:15	24	04-02-2016 15:15	68	06-02-2016 09:15	24
01-02-2016 03:30	68	02-02-2016 21:30	20	04-02-2016 15:30	60	06-02-2016 09:30	1568
01-02-2016 03:45	68	02-02-2016 21:45	24	04-02-2016 15:45	20	06-02-2016 09:45	2176
01-02-2016 04:00	72	02-02-2016 22:00	24	04-02-2016 16:00	24	06-02-2016 10:00	2184
01-02-2016 04:15	68	02-02-2016 22:15	24	04-02-2016 16:15	24	06-02-2016 10:15	1772
01-02-2016 04:30	68	02-02-2016 22:30	20	04-02-2016 16:30	24	06-02-2016 10:30	416
01-02-2016 04:45	68	02-02-2016 22:45	72	04-02-2016 16:45	20	06-02-2016 10:45	304
01-02-2016 05:00	68	02-02-2016 23:00	100	04-02-2016 17:00	1588	06-02-2016 11:00	116
01-02-2016 05:15	68	02-02-2016 23:15	1440	04-02-2016 17:15	536	06-02-2016 11:15	68
01-02-2016 05:30	68	02-02-2016 23:30	2260	04-02-2016 17:30	20	06-02-2016 11:30	152
01-02-2016 05:45	20	02-02-2016 23:45	2236	04-02-2016 17:45	24	06-02-2016 11:45	84
01-02-2016 06:00	24	03-02-2016 00:00	2288	04-02-2016 18:00	24	06-02-2016 12:00	68
01-02-2016 06:15	200	03-02-2016 00:15	956	04-02-2016 18:15	20	06-02-2016 12:15	140
01-02-2016 06:30	1880	03-02-2016 00:30	72	04-02-2016 18:30	24	06-02-2016 12:30	140
01-02-2016 06:45	24	03-02-2016 00:45	68	04-02-2016 18:45	20	06-02-2016 12:45	72
01-02-2016 07:00	20	03-02-2016 01:00	68	04-02-2016 19:00	24	06-02-2016 13:00	68
01-02-2016 07:15	24	03-02-2016 01:15	68	04-02-2016 19:15	24	06-02-2016 13:15	68
01-02-2016 07:30	24	03-02-2016 01:30	68	04-02-2016 19:30	20	06-02-2016 13:30	64
01-02-2016 07:45	24	03-02-2016 01:45	68	04-02-2016 19:45	24	06-02-2016 13:45	68
01-02-2016 08:00	28	03-02-2016 02:00	68	04-02-2016 20:00	24	06-02-2016 14:00	64
01-02-2016 08:15	408	03-02-2016 02:15	68	04-02-2016 20:15	24	06-02-2016 14:15	1168
01-02-2016 08:30	1772	03-02-2016 02:30	68	04-02-2016 20:30	20	06-02-2016 14:30	936
01-02-2016 08:45	40	03-02-2016 02:45	48	04-02-2016 20:45	24	06-02-2016 14:45	64
01-02-2016 09:00	828	03-02-2016 03:00	20	04-02-2016 21:00	24	06-02-2016 15:00	68
01-02-2016 09:15	2084	03-02-2016 03:15	24	04-02-2016 21:15	24	06-02-2016 15:15	64
01-02-2016 09:30	2128	03-02-2016 03:30	24	04-02-2016 21:30	20	06-02-2016 15:30	44
01-02-2016 09:45	2124	03-02-2016 03:45	24	04-02-2016 21:45	24	06-02-2016 15:45	24
01-02-2016 10:00	1232	03-02-2016 04:00	24	04-02-2016 22:00	24	06-02-2016 16:00	24
01-02-2016 10:15	96	03-02-2016 04:15	24	04-02-2016 22:15	24	06-02-2016 16:15	20
01-02-2016 10:30	92	03-02-2016 04:30	20	04-02-2016 22:30	20	06-02-2016 16:30	24
01-02-2016 10:45	96	03-02-2016 04:45	24	04-02-2016 22:45	24	06-02-2016 16:45	24
01-02-2016 11:00	92	03-02-2016 05:00	24	04-02-2016 23:00	40	06-02-2016 17:00	24
01-02-2016 11:15	96	03-02-2016 05:15	24	04-02-2016 23:15	1896	06-02-2016 17:15	20
01-02-2016 11:30	88	03-02-2016 05:30	24	04-02-2016 23:30	344	06-02-2016 17:30	24

2ª Semana	Potência:	2ª Semana	Potência:	2ª Semana	Potência:	2ª Semana	Potência:
Período	W	Período	W	Período	W	Período	W
01-02-2016 11:45	48	03-02-2016 05:45	24	04-02-2016 23:45	156	06-02-2016 17:45	24
01-02-2016 12:00	96	03-02-2016 06:00	24	05-02-2016 00:00	148	06-02-2016 18:00	20
01-02-2016 12:15	96	03-02-2016 06:15	24	05-02-2016 00:15	148	06-02-2016 18:15	24
01-02-2016 12:30	96	03-02-2016 06:30	20	05-02-2016 00:30	148	06-02-2016 18:30	24
01-02-2016 12:45	44	03-02-2016 06:45	24	05-02-2016 00:45	140	06-02-2016 18:45	24
01-02-2016 13:00	68	03-02-2016 07:00	24	05-02-2016 01:00	140	06-02-2016 19:00	24
01-02-2016 13:15	164	03-02-2016 07:15	28	05-02-2016 01:15	140	06-02-2016 19:15	20
01-02-2016 13:30	152	03-02-2016 07:30	28	05-02-2016 01:30	136	06-02-2016 19:30	24
01-02-2016 13:45	144	03-02-2016 07:45	76	05-02-2016 01:45	136	06-02-2016 19:45	24
01-02-2016 14:00	148	03-02-2016 08:00	156	05-02-2016 02:00	136	06-02-2016 20:00	24
01-02-2016 14:15	124	03-02-2016 08:15	1688	05-02-2016 02:15	136	06-02-2016 20:15	20
01-02-2016 14:30	76	03-02-2016 08:30	1000	05-02-2016 02:30	136	06-02-2016 20:30	24
01-02-2016 14:45	152	03-02-2016 08:45	24	05-02-2016 02:45	132	06-02-2016 20:45	24
01-02-2016 15:00	96	03-02-2016 09:00	24	05-02-2016 03:00	132	06-02-2016 21:00	24
01-02-2016 15:15	68	03-02-2016 09:15	24	05-02-2016 03:15	136	06-02-2016 21:15	20
01-02-2016 15:30	68	03-02-2016 09:30	56	05-02-2016 03:30	132	06-02-2016 21:30	24
01-02-2016 15:45	72	03-02-2016 09:45	96	05-02-2016 03:45	132	06-02-2016 21:45	24
01-02-2016 16:00	28	03-02-2016 10:00	28	05-02-2016 04:00	92	06-02-2016 22:00	24
01-02-2016 16:15	24	03-02-2016 10:15	160	05-02-2016 04:15	92	06-02-2016 22:15	1192
01-02-2016 16:30	24	03-02-2016 10:30	152	05-02-2016 04:30	88	06-02-2016 22:30	1004
01-02-2016 16:45	24	03-02-2016 10:45	148	05-02-2016 04:45	92	06-02-2016 22:45	80
01-02-2016 17:00	24	03-02-2016 11:00	144	05-02-2016 05:00	88	06-02-2016 23:00	76
01-02-2016 17:15	24	03-02-2016 11:15	144	05-02-2016 05:15	92	06-02-2016 23:15	72
01-02-2016 17:30	20	03-02-2016 11:30	112	05-02-2016 05:30	88	06-02-2016 23:30	72
01-02-2016 17:45	144	03-02-2016 11:45	136	05-02-2016 05:45	92	06-02-2016 23:45	72
01-02-2016 18:00	1996	03-02-2016 12:00	140	05-02-2016 06:00	88	07-02-2016 00:00	72

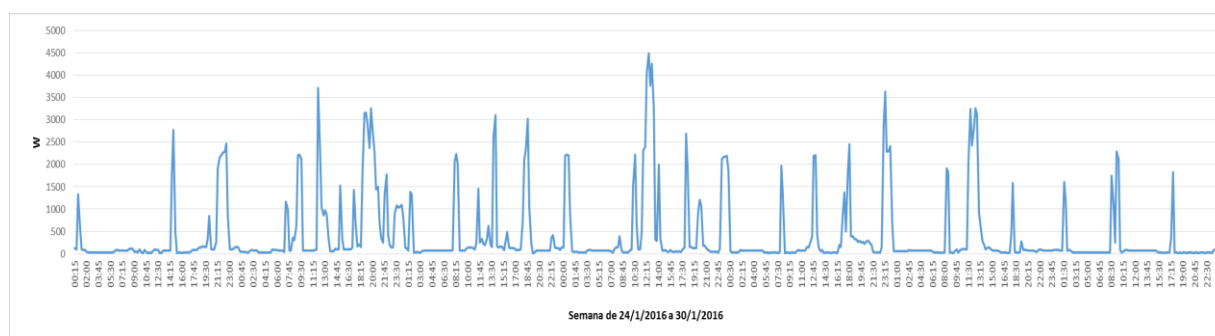


Figura 129 – Diagrama da potência consumida na casa durante a semana de 24/1/2016 a 30/1/2016

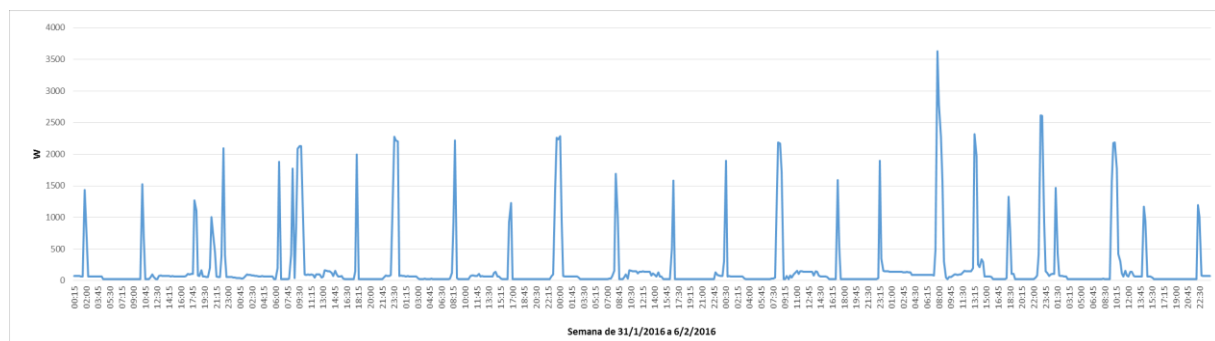


Figura 130 – Diagrama da potência consumida na casa durante a semana de 31/1/2016 a 6/2/2016

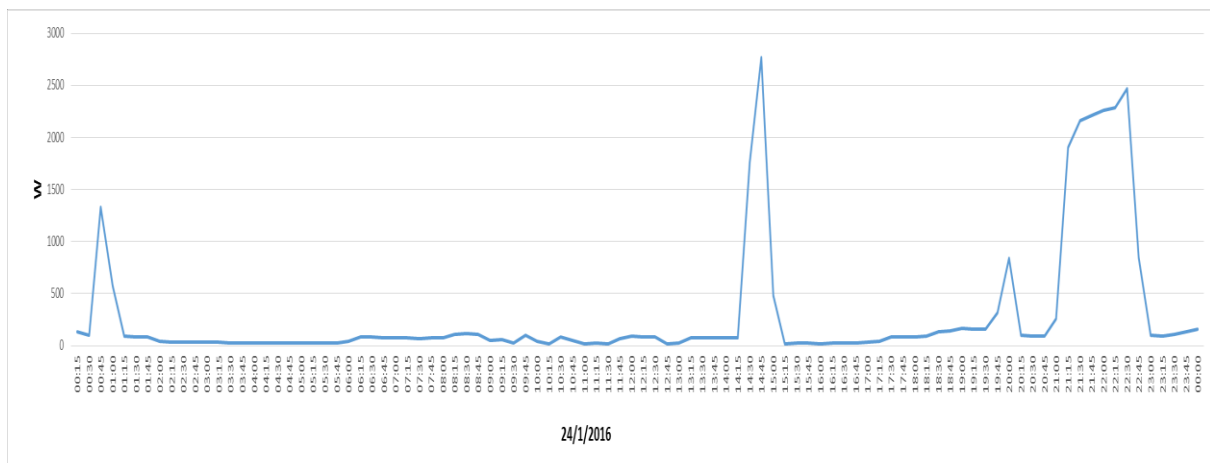


Figura 131 – Diagrama da potência consumida na casa durante o dia 24/1/2016

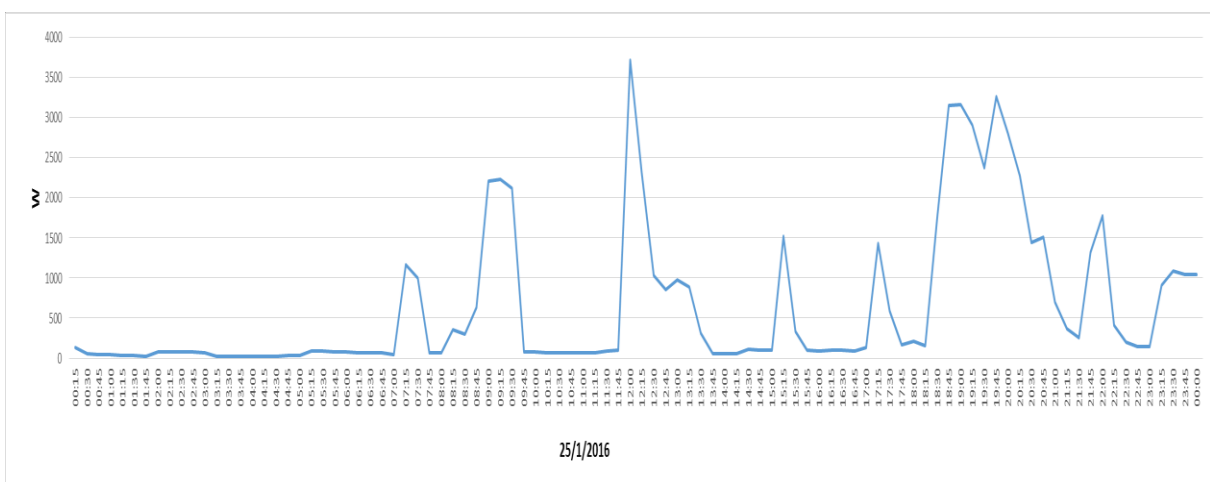


Figura 132 – Diagrama da potência consumida na casa durante o dia 25/1/2016

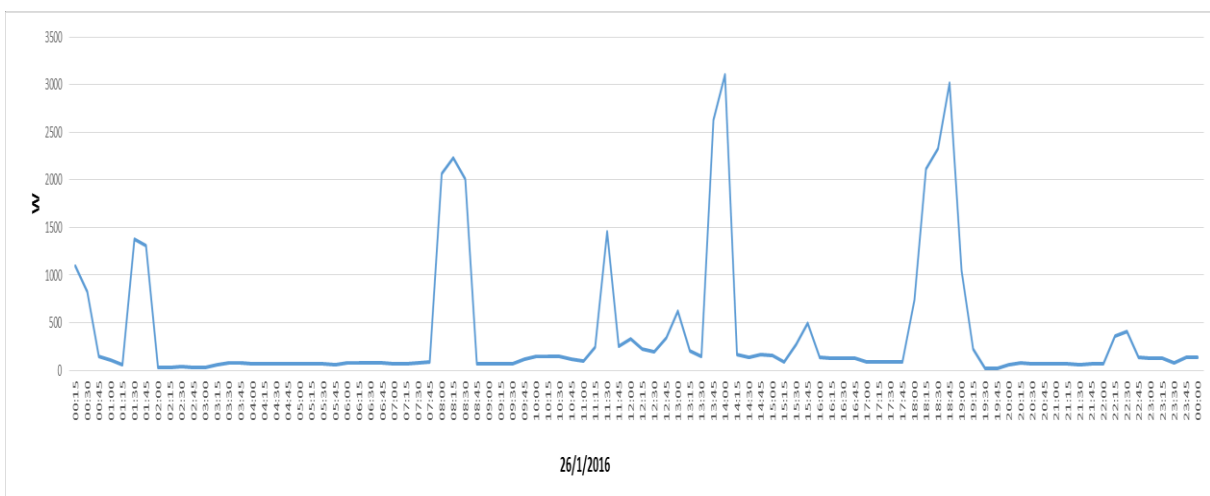


Figura 133 – Diagrama da potência consumida na casa durante o dia 26/1/2016

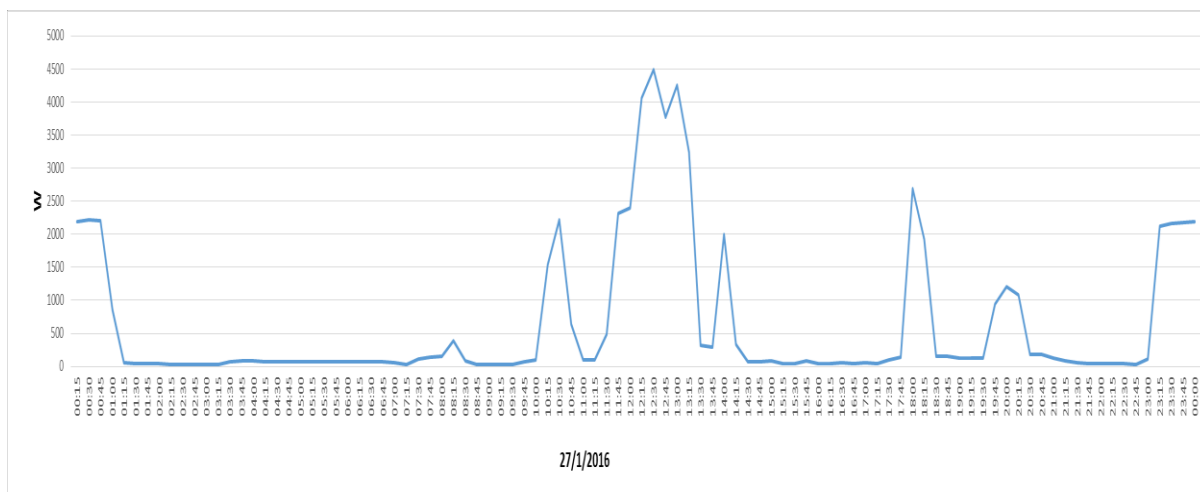


Figura 134 – Diagrama da potência consumida na casa durante o dia 27/1/2016

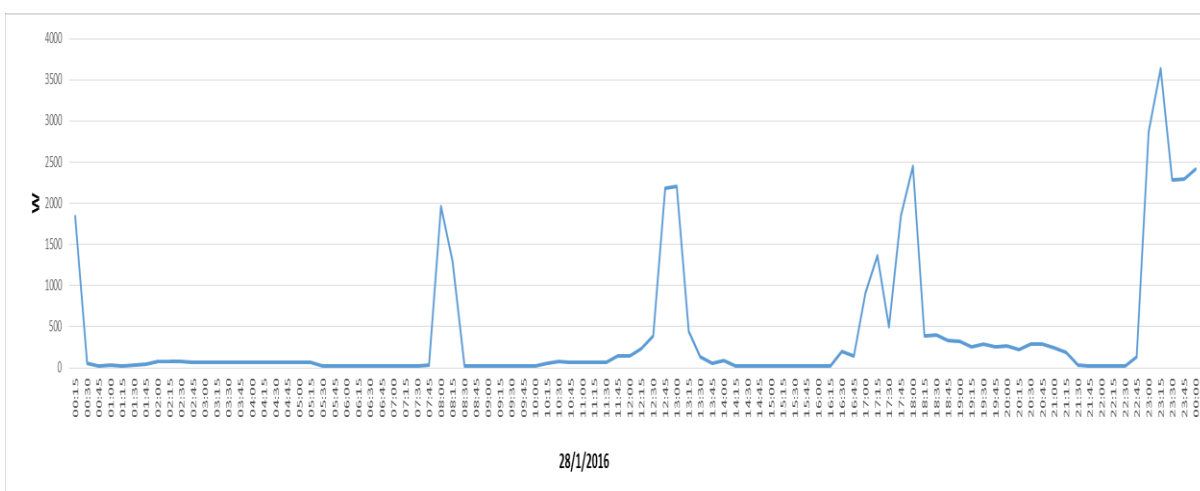


Figura 135 – Diagrama da potência consumida na casa durante o dia 28/1/2016

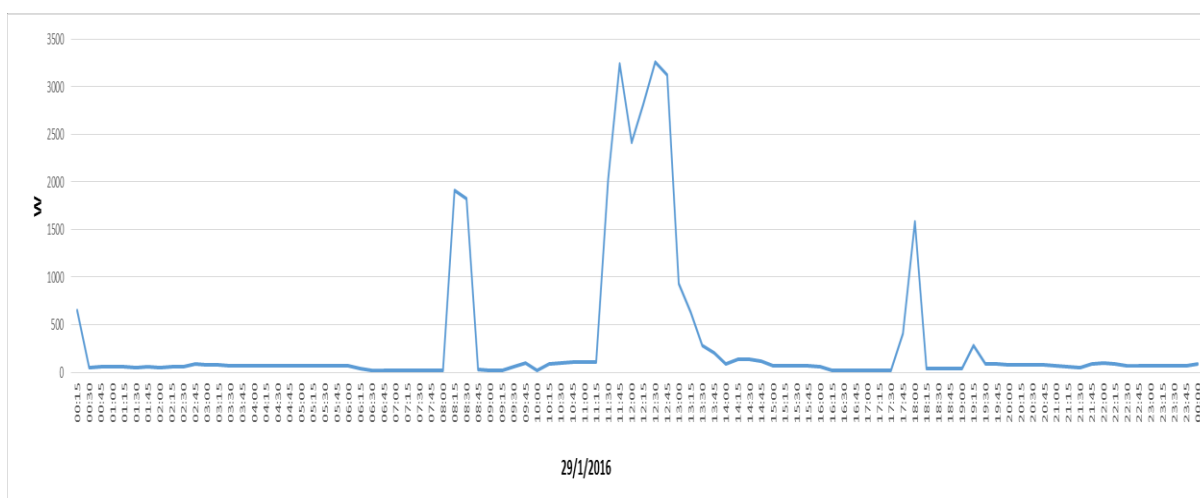


Figura 136 – Diagrama da potência consumida na casa durante o dia 29/1/2016

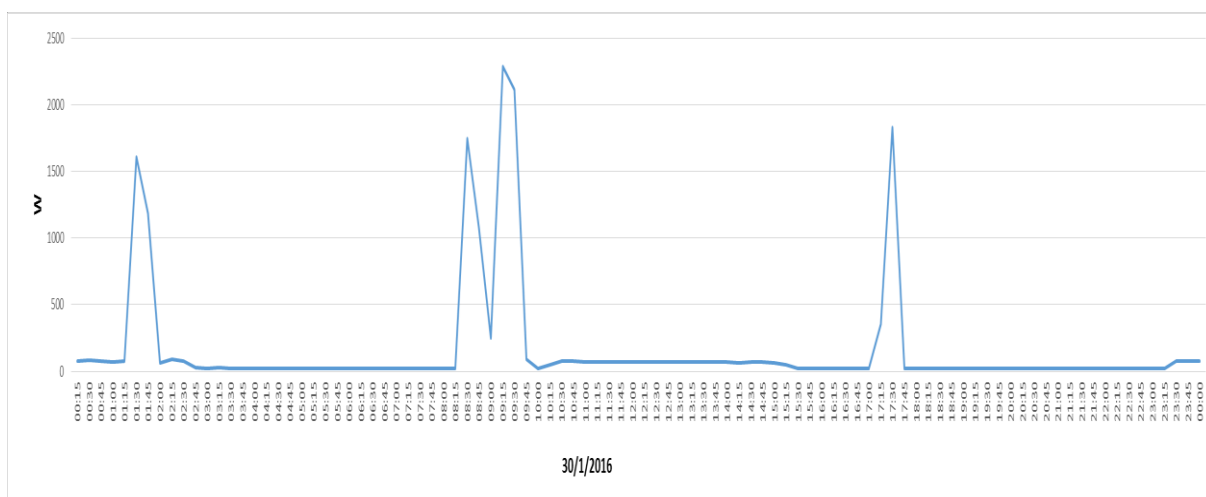


Figura 137 – Diagrama da potência consumida na casa durante o dia 30/1/2016

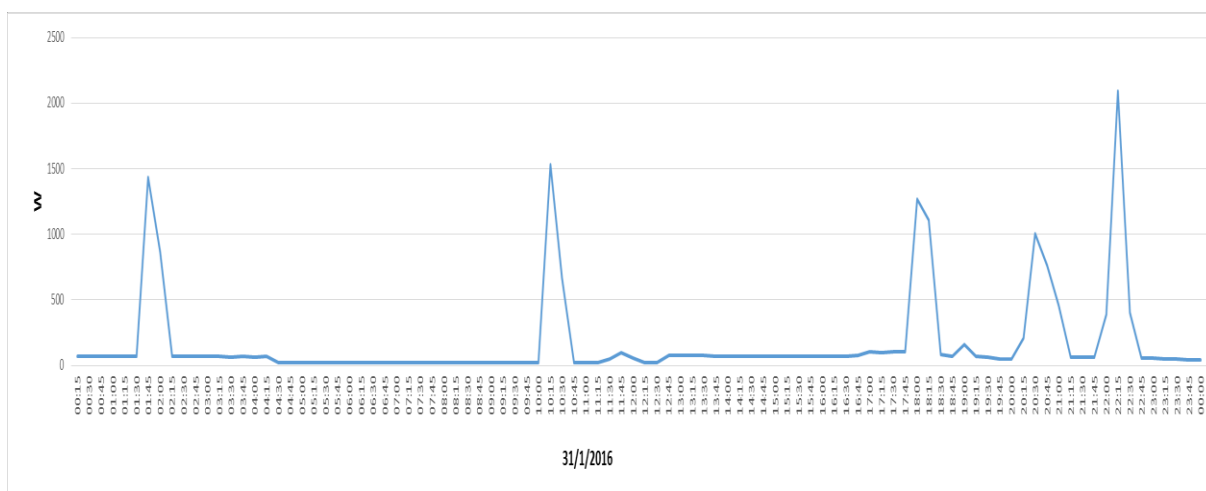


Figura 138 – Diagrama da potência consumida na casa durante o dia 31/1/2016

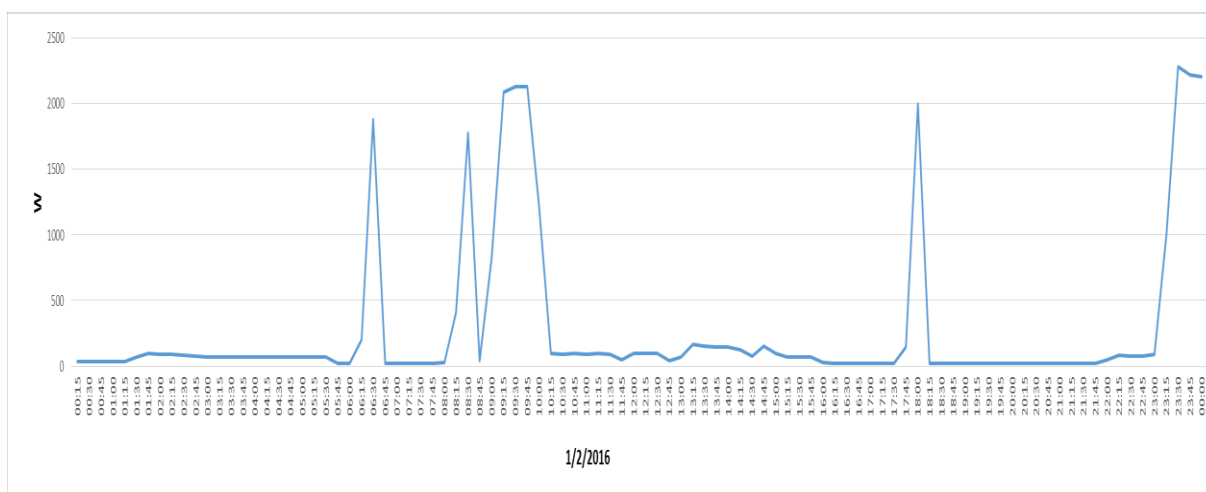


Figura 139 – Diagrama da potência consumida na casa durante o dia 1/2/2016

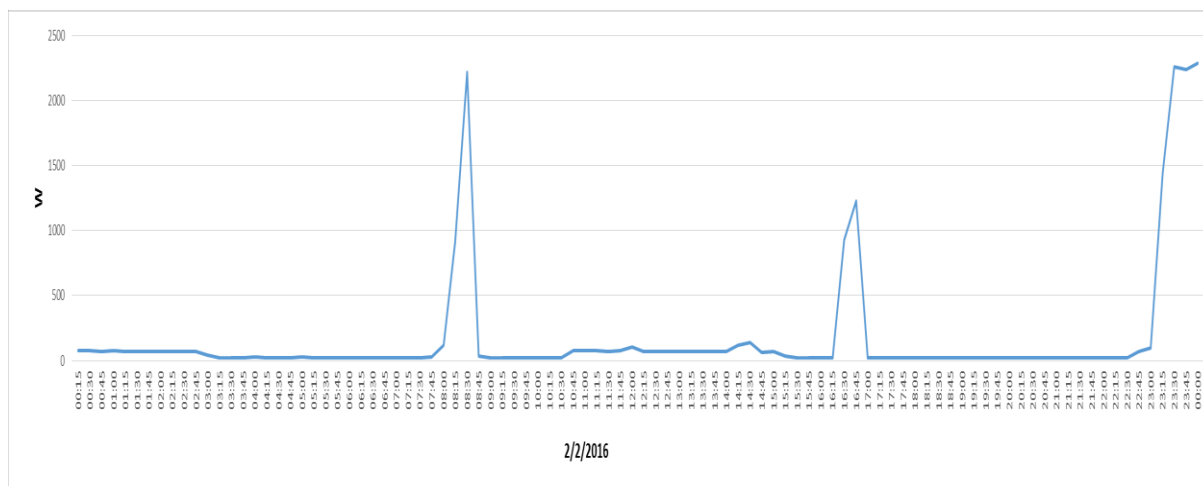


Figura 140 – Diagrama da potência consumida na casa durante o dia 2/2/2016

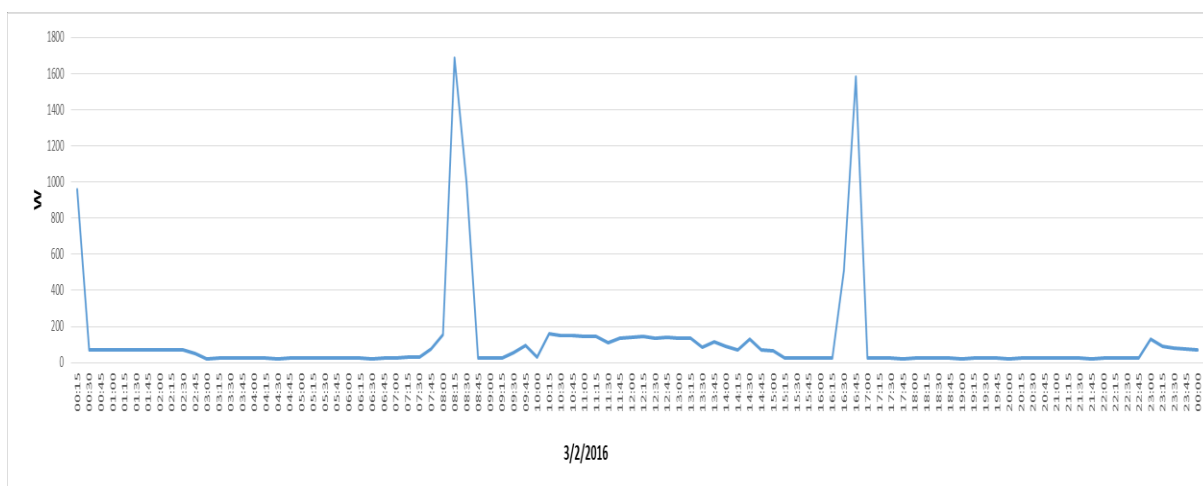


Figura 141 – Diagrama da potência consumida na casa durante o dia 3/2/2016

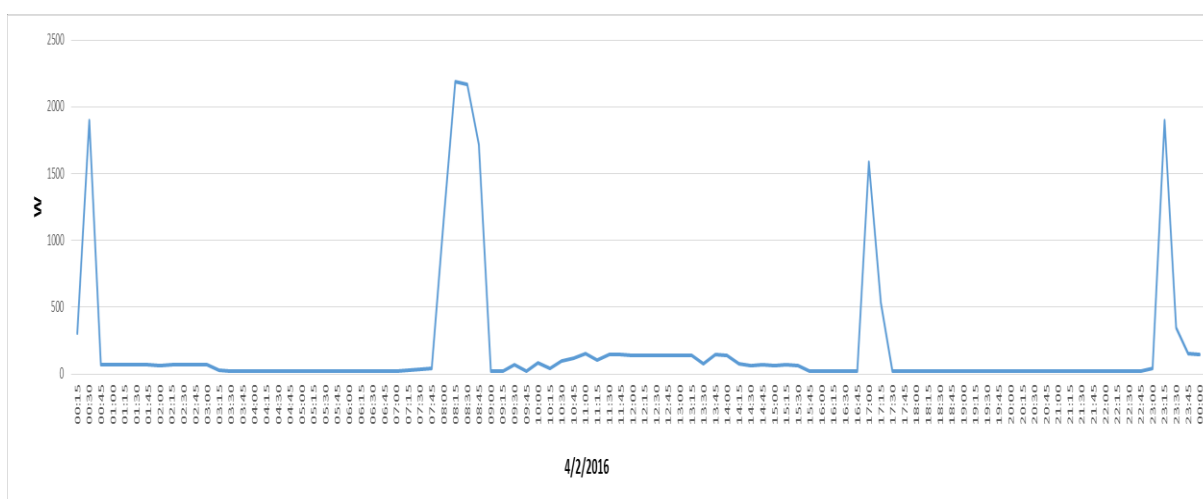


Figura 142 – Diagrama da potência consumida na casa durante o dia 4/2/2016

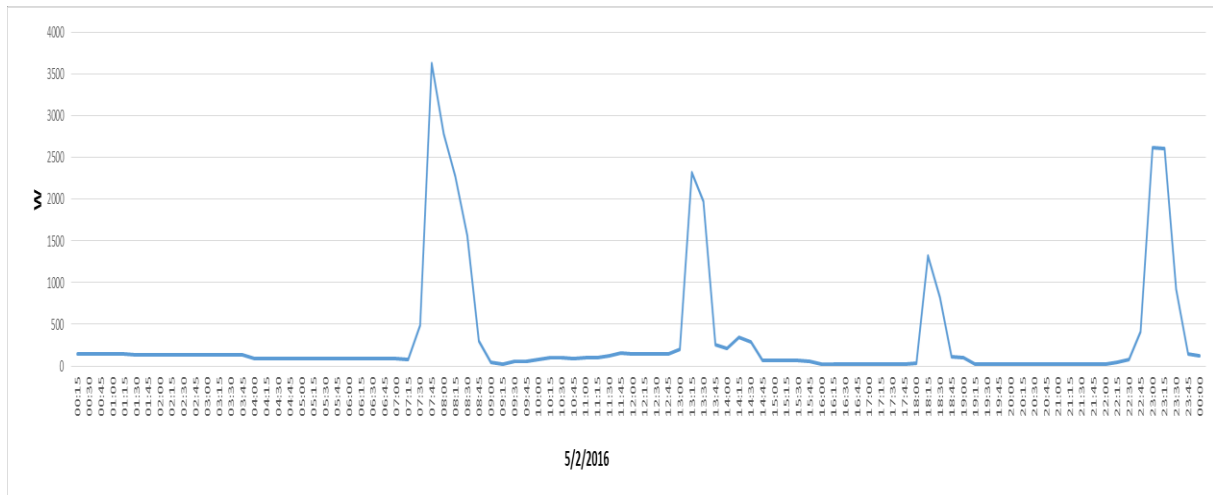


Figura 143 – Diagrama da potência consumida na casa durante o dia 5/2/2016

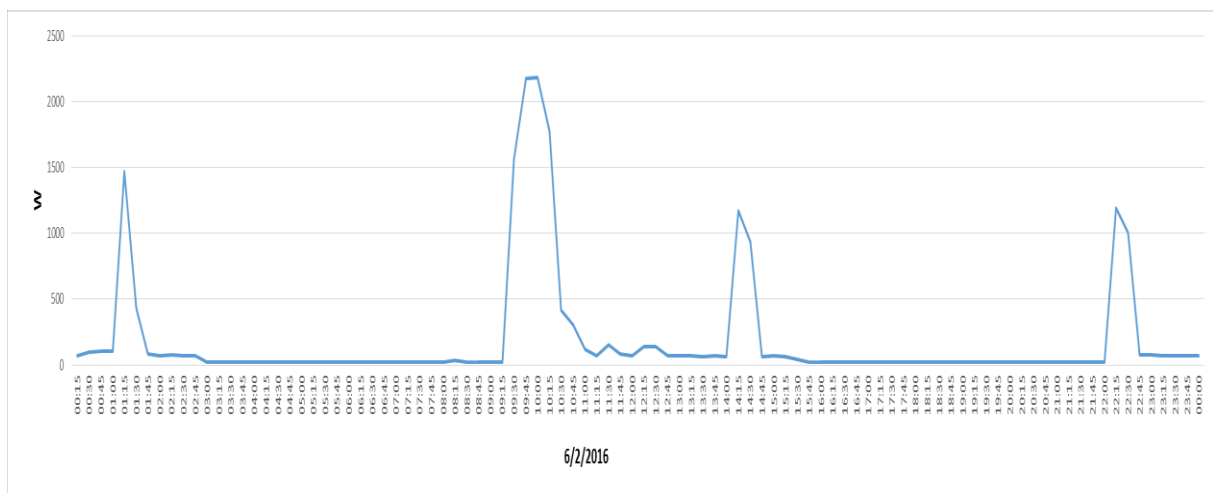


Figura 144 – Diagrama da potência consumida na casa durante o dia 6/2/2016