



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Soraia Pinão Fernandes

Avaliação de opções de controlo de cargas para a
integração em larga escala de geração renovável
intermitente na rede portuguesa

Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Área de especialização em Energia

Julho de 2016





**Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade de Coimbra**

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

**Avaliação de opções de controlo de cargas para a integração em
larga escala de geração renovável intermitente na rede portuguesa**

Soraia Pinão Fernandes

Presidente do júri:

Professor Doutor Álvaro Filipe Peixoto Cardoso de Oliveira Gomes

Vogal:

Professor Doutor Luís Miguel Pires Neves

Orientador:

Professor Doutor Pedro Manuel Soares Moura

Coimbra
Julho de 2016

Resumo

O aumento do uso de fontes de energia renováveis, que se verifica atualmente, tem um impacto positivo a nível ambiental. No entanto, a maioria destas fontes são intermitentes, tendo a sua geração uma elevada variabilidade ao longo do tempo. Devido à elevada penetração da energia eólica e hídrica em Portugal, surgem excessos de geração em certas horas do dia. Adicionalmente, devido à variabilidade do vento, ocorrem também variações bruscas de geração, que por vezes, devido à dificuldade de prever o comportamento desta fonte, estão associadas a elevados erros de previsão.

Nesta dissertação, pretendeu-se avaliar o impacto potencial da utilização de medidas de *Demand Response*, aplicadas aos sectores dos serviços e residencial, de forma a reduzir os excessos de geração. Para tal, foram escolhidos os diagramas de carga em que existia um maior excesso de geração, e em função desses diagramas fez-se uma alteração dos consumos residencial, nas máquinas de lavar e secar, nas quais se pode alterar o horário de funcionamento, e no consumo dos sistemas climatização, que podem ser interrompidos. No sector dos serviços, efetuou-se o pré-aquecimento dos edifícios. Com estas estratégias, conseguiu-se diminuir os excessos, aumentando o consumo nesses horários, e diminuindo o consumo em horas em que o excesso era menor ou inexistente, conseguindo-se assim reduzir também as emissões de CO₂ associadas à utilização das centrais de carvão e de gás natural.

Para diminuir o impacto que a variação brusca de geração eólica tem no sistema, assim como o erro de previsão que lhe está associado, optou-se por adaptar os diagramas de consumos residencial, e do aquecimento no sector dos serviços, à geração eólica. Diminui-se assim os consumos nos horários em que a geração começa a diminuir de forma mais acentuada, com o objetivo de dar tempo ao sistema para se adaptar à variação da geração.

Com a aplicação destas medidas, num cenário de elevada utilização de fontes renováveis intermitentes, o uso de fontes de energia fóssil pode ser reduzido, e aumenta-se assim a fiabilidade do sistema.

Palavras-chave: Energias Renováveis, *Demand Response*, Excessos de Geração, Variabilidade da Geração Eólica, Gestão da Procura.

Abstract

The increased use of renewable energy sources, which is actually verified, has a positive impact on the environmental protection. However, most of these sources are intermittent, having its generation a high variability over time. Due to the high penetration of wind and hydropower in Portugal, there are a generation surplus during certain periods of time. In addition, due to the wind variability there are also quick changes on the generation level, which, due to the difficulty of forecasting the behavior of this source, are associated with high forecast errors.

The propose of this thesis is to assess the potential impact of the use of Demand Response measures applied to the services and residential sectors, in order to reduce the generation surplus. Therefore, the energy consumption and generation diagrams with a higher generation surplus were selected, and depending on these diagrams a change of residential consumption was made, on washing and dryers machines, changing the operation period, and on the consumption of air conditioning systems, which may be interrupted. In the services sector, the pre-heating of buildings was made. With these strategies, the generation surplus was reduced by increasing the consumption in such periods, and decreasing consumption in periods with a smaller or non-existent surplus. The CO₂ emissions associated with the use of coal and natural gas power plants were also reduced.

To reduce the impact of the quick reductions of the wind power generation on the system, as well as to compensate the forecasting errors associated with it, the residential consumption diagrams and the heating diagrams of the service sector were adapted to the wind generation variation. It was therefore reduced the demand in periods when the generation starts to sharply decrease, in order to give time to adapt the system for the generation variation.

With the implementation of these measures, in a scenario of large scale penetration of intermittent renewable sources, the use of fossil energy sources can be reduced, and the system reliability can be increased.

Keywords: Renewable Energy, Demand Response, Generation surplus, Wind Power Variability, Demand-Side Management.

Agradecimentos

Muitas foram as pessoas que contribuíram para a realização desta dissertação. Umas ajudaram com o tempo, os meios e os conhecimentos que puseram à minha disposição, outras pela compreensão, amizade e apoio.

Gostaria de começar por agradecer, ao meu orientador, Professor Doutor Pedro Manuel Soares Moura, o apoio e orientação prestada ao longo deste trabalho, bem como a disponibilidade e ajuda na correção e revisão do texto da dissertação e estruturação da mesma.

À minha família, em especial aos meus pais e irmã, que sempre me acompanharam neste percurso e sem os quais nada disto seria possível.

Aos meus amigos e colegas de curso, pelas palavras de amizade e incentivo.

Ao Nuno, pela paciência, dedicação, ajuda e incentivo, necessários para a concretização desta dissertação.

A eles, dedico todo este trabalho.

*“Sabemos muito pouco o que nós somos
e menos ainda o que podemos ser”*

Lord Byron

Índice

Lista de Figuras	XVII
Lista de Abreviaturas	XXI
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 – Motivação	1
1.2 – Objetivos	2
1.3 – Estrutura da dissertação	3
Capítulo 2 – Variabilidade da geração renovável	5
2.1 – Variabilidade da geração eólica	5
2.2 – Soluções para a variabilidade da geração eólica	8
Capítulo 3 – Análise da intermitência	13
3.1 – Variabilidade de geração renovável e excessos de geração	13
3.2 – Variabilidade da energia eólica e excessos de geração	15
Capítulo 4 – Caracterização do consumo	19
4.1 – Sector dos serviços	19
4.2 – Sector residencial	22
Capítulo 5 – Casos de estudo	27
5.1 – Apresentação dos casos de estudo	27
5.2 – Sector dos serviços –excessos de geração	31
5.2.1 – Dia 10 de março de 2014	32
5.2.2 – Dia 6 de fevereiro de 2014.....	33
5.3 – Sector dos serviços –variabilidade de geração eólica	33
5.3.1 – Dia 19 de março de 2014	34
5.4 – Sector residencial –excessos de geração	34
5.4.1 – Dia 10 de março de 2014	35
5.4.2 – Dia 6 de fevereiro de 2014.....	36
5.4.3 – Dia 22 de março de 2014	37
5.5 – Sector residencial –variabilidade de geração eólica	38
5.5.1 – Dia 19 de março de 2014	38
Capítulo 6 – Análise dos impactos dos casos de estudo	41
6.1 –Excessos de geração	41
6.1.1 – Dia 10 de março de 2014	41

6.1.2 – Dia 6 de fevereiro de 2014.....	43
6.1.3 – Dia 22 de março de 2014.....	45
6.1.4 – Total anual	45
6.2 – Variabilidade de geração	47
6.2.1 – Dia 19 de março de 2014.....	47
Capítulo 7 – Conclusões e trabalho futuro	51
7.1 – <i>Conclusões</i>	51
7.2 – <i>Trabalho futuro</i>	53
Bibliografia.....	55
Anexos.....	59
<i>Anexo A – Casos de estudo: Sector residencial – excessos de geração</i>	<i>59</i>
<i>Anexo B – Casos de estudo: Sector residencial - variabilidade de geração</i>	<i>65</i>

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 Excessos médios mensais para os meses em estudo.	14
Tabela 4.1 Evolução do consumo de eletricidade em Portugal em % [24].....	19
Tabela 6.1 Fatores de emissão de CO ₂	42
Tabela 6.2 Emissão de CO ₂ com e sem controlo para o dia 10 de março entre as 13h e as 22h..	42
Tabela 6.3 Emissão de CO ₂ com e sem controlo para o dia 6 de fevereiro entre as 9h e as 24h..	44
Tabela 6.4 Emissão de CO ₂ com e sem controlo para o dia 1 de março entre as 1h e as 4h, entre as 13h e as 18h e entre as 20h e as 24h.	45
Tabela 6.5 Redução do excesso e redução de emissões de CO ₂ , utilizadas na extrapolação.....	46
Tabela 6.6 Redução do excesso de geração renovável anual divididos em dias úteis e fins de semana.	46
Tabela 6.7 Redução das emissões de CO ₂ anuais divididas em dias úteis e fins de semana.	46
Tabela 6.8 Redução do excesso de geração renovável – Total Anual.	47
Tabela 6.9 Redução de emissões de CO ₂ – Total Anual.	47
Tabela 6.10 Compensação obtida com a estratégia de controlo aplicada para o dia 19 de março.	49
Tabela A.1 Controlo aplicado no primeiro caso de estudo no sector residencial.	59
Tabela A.2 Controlo aplicado no segundo caso de estudo no sector residencial.	60
Tabela A.3 Controlo aplicado no terceiro caso de estudo no sector residencial.	61
Tabela A.4 Emissão de CO ₂ com e sem controlo para o dia 1 de março entre as 1h e as 5h e entre as 19h e as 21h.	63
Tabela A.5 Controlo aplicado no quarto caso de estudo.	64
Tabela B.1 Controlo aplicado no primeiro caso de estudo no sector residencial.	65
Tabela B.2 Controlo aplicado no segundo caso de estudo no sector dos serviços.	67
Tabela B.3 Compensação obtida com a estratégia de controlo aplicada para o dia 3 de janeiro..	69
Tabela B.4 Controlo aplicado no segundo caso de estudo no sector residencial.	71
Tabela B.5 Controlo aplicado no primeiro caso de estudo no sector dos serviços.	72

Lista de Figuras

Figura 2.1 Produção de energia eólica num dia quente em Portugal [6].	5
Figura 2.2 Exemplo da diferença entre a geração eólica prevista e a geração eólica real para o dia 10 de janeiro de 2011, no sistema elétrico irlandês [10].	6
Figura 2.3 Variação da Potência eólica e da procura em função do tempo [7].	6
Figura 2.4 Decréscimo acentuado da potência eólica [12].	7
Figura 2.5 Aumento súbito da potência eólica [12].	7
Figura 2.6 Diagrama de carga do sector residencial num cenário norma (BAU) e com medidas do lado da procura (DSM) [6].	9
Figura 2.7 Perfil de cargas do sistema holandês com extrapolação para 2020, e com 3% de mudança de cargas [20].	9
Figura 3.1 Diagrama de carga do dia 4 janeiro de 2014 [30].	14
Figura 3.2 Diagrama de carga do dia 1 março de 2014 [30].	14
Figura 3.3 Diagrama de Produção Eólica dia 19 de março de 2014 REN.	15
Figura 3.4 Diagrama de Produção Eólica dia 3 de janeiro de 2014.	16
Figura 3.5 Diagrama de Produção Eólica dia 2 de março de 2014.	17
Figura 3.6 Diagrama de Produção Eólica dia 13 de outubro de 2014.	17
Figura 3.7 Diagrama de Produção Eólica dia 27 de setembro de 2014.	17
Figura 3.8 Diagrama de Produção Eólica dia 27 de outubro de 2014.	18
Figura 4.1 Distribuição dos consumos de energia no setor dos serviços em Portugal em 2012 [4].	20
Figura 4.2 Diagrama de consumos do aquecimento no sector dos serviços com equipamentos GHPs para o mês de fevereiro.	21
Figura 4.3 Diagrama de consumos médio extrapolado para os sistemas de aquecimento com sistemas Split.	21
Figura 4.4 Diagrama de carga nacional de fevereiro de 2014 [30].	22
Figura 4.5 Distribuição dos consumos de energia elétrica no sector residencial em Portugal pelo tipo de utilização final em 2010 [25].	22
Figura 4.6 Consumos no sector residencial na União Europeia – Projeto REMODECE [26].	23
Figura 4.7 Taxa de posse dos equipamentos domésticos em Portugal [26].	24
Figura 4.8 Diagrama de carga médio do sector residencial para os dias úteis.	24
Figura 4.9 Diagrama de carga médio do sector residencial para os fins de semana.	25

Figura 4.10 Diagrama de carga com divisão entre cargas não controláveis, que podem ser interrompidas, e reprogramáveis nos dias úteis.	26
Figura 4.11 Diagrama de carga com divisão entre cargas não controláveis, que podem ser interrompidas, e reprogramáveis nos fins de semana.....	26
Figura 5.1 Diagrama de geração e consumos do dia 10 de março de 2014, curva típica do consumo no sector residencial e diagrama do aquecimento no sector dos serviços.....	28
Figura 5.2 Diagrama de geração e consumos do dia 6 de fevereiro de 2014, curva típica do consumo no sector residencial e diagrama do aquecimento no sector dos serviços.	28
Figura 5.3 Diagrama de geração e consumos do dia 1 de março de 2014 curva típica do consumo no sector residencial.	29
Figura 5.4 Diagrama de geração e consumos do dia 22 de março de 2014 curva típica do consumo no sector residencial.	30
Figura 5.5 Diagrama de geração eólica real e prevista do segundo caso de estudo, consumo residencial típico para um dia útil e consumo do aquecimento no sector dos serviços – dia 3 de janeiro de 2014.	30
Figura 5.6 Diagrama de geração eólica real e prevista do segundo caso de estudo, consumo residencial típico para um dia útil e consumo da climatização no sector dos serviços– dia 19 de março de 2014.	31
Figura 5.7 Diagrama do consumo com e sem pré-aquecimento do sector dos serviços para equipamentos GHPs e Splits.	32
Figura 5.8 Diagrama de geração renovável e consumos+bombagem com e sem pré-aquecimento dos edifícios do sector dos serviços para o dia 10 de março.	32
Figura 5.9 Diagrama de geração renovável e consumos+bombagem com e sem pré-aquecimento dos edifícios do sector dos serviços para o dia 6 de fevereiro.	33
Figura 5.10 Diagrama de geração real e prevista e consumo do aquecimento com e sem controlo dos edifícios do sector dos serviços para o dia 19 de março.	34
Figura 5.11 Diagrama de consumos sem controlo e com controlo do sector residencial para o primeiro caso de estudo.	35
Figura 5.12 Diagrama de carga, com consumos sem controlo e com controlo do consumo total para o primeiro caso de estudo 10 de março de 2014.	35
Figura 5.13 Diagrama de consumos sem controlo e com controlo do sector residencial para o segundo caso de estudo.	36
Figura 5.14 Diagrama de carga, com consumos sem controlo e com controlo do consumo total para o segundo caso de estudo 6 de fevereiro de 2014.	36

Figura 5.15 Diagrama de carga, com consumos sem controlo e com controlo do consumo total para o segundo caso de estudo 22 de março de 2014.....	37
Figura 5.16 Diagrama de carga, com consumos sem controlo e com controlo do consumo total para o segundo caso de estudo 22 de março de 2014.....	37
Figura 5.17 Diagrama de geração eólica do segundo caso de estudo e consumo residencial com e sem controlo – dia 19 de março de 2014.....	39
Figura 6.1 Diagrama de consumo do sector residencial+serviços com e sem controlo total e geração renovável para o dia 10 de março de 2014.	41
Figura 6.2 Diagrama de consumo+bombagem nacional com e sem controlo total e geração renovável para o dia 10 de março de 2014.....	42
Figura 6.3 Diagrama de consumo do sector residencial+serviços com e sem controlo total e geração renovável para o dia 6 de fevereiro de 2014.	43
Figura 6.4 Diagrama de consumo com e sem controlo total e geração renovável para o dia 6 de fevereiro de 2014.....	43
Figura 6.5 Diagrama de geração eólica real e prevista e geração eólica + diferença entre o consumo sem e com controlo, para o dia 19 de março de 2014.	48
Figura A.1 Diagrama de consumos sem controlo e com controlo do sector residencial para o terceiro caso de estudo.	62
Figura A.2 Diagrama de carga, com consumos sem controlo e com controlo do consumo total para o segundo caso de estudo 1 de março de 2014.....	62
Figura B.1 Diagrama de geração eólica real e prevista do primeiro caso de estudo e consumo residencial com e sem controlo – dia 3 de janeiro de 2014.....	66
Figura B.2 Diagrama de geração eólica real e prevista e consumo do aquecimento com e sem controlo dos edifícios do sector dos serviços para o dia 3 de janeiro.	68
Figura B.3 Diagrama de geração eólica real e prevista e geração eólica + diferença entre o consumo sem e com controlo, para o dia 3 de janeiro de 2014.	69

Lista de Abreviaturas

AVAC – Aquecimento, ventilação e ar condicionado

BAU – *Business as Usual*

CO₂ – Dióxido de Carbono

DSM – *Demand-Side Management* (Gestão da Procura)

GHPs – *Geothermal Heat Pumps* (Bombas de Calor Geotermiais)

HPs - *Electric Heat Pumps* (Bombas de Calor Elétricas)

INE – Instituto Nacional de Estatística

Mibel – Mercado Ibérico de Eletricidade

REMODECE - *Residential Monitoring to Decrease Energy Use and Carbon Emissions in Europe*

REN – Redes Energéticas Nacionais

Capítulo 1 – Introdução

1.1 – Motivação

Desde a pré-história, que o homem criou mecanismos que fossem capazes de reduzir o seu esforço e aumentar o seu conforto, pelo que o planeta foi-se tornando ao longo dos tempos dependente do uso de energia. Com o passar dos anos, e devido ao crescente surgimento de aparelhos tecnológicos dependentes de energia, à problemática do aquecimento global e à escassez e crescente custo dos recursos fósseis, houve a necessidade de apostar em outras formas de produção de energia, as fontes de energia renovável [1]. Estas fontes têm um grande potencial para substituir as fontes fósseis e terminar com os seus consequentes problemas, nomeadamente os elevados níveis de emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera [2]. No entanto, o facto de estarem dependentes de condições meteorológicas, não controláveis, leva a que não se consiga fazer um controlo da sua produção energética em função da procura. Uma elevada geração renovável, pode levar a que surjam excessos de energia em determinados momentos do dia, predominantemente em horários noturnos, e à existência de défice de geração em outros momentos.

Em Portugal, no ano de 2014, a totalidade das fontes de energia renovável representava 63% da potência total ligada ao Sistema Elétrico Nacional, repartida pelas eólicas com 26%, pelas hídricas e mini-hídricas, com 32%, biomassa com 3% e fotovoltaica com 2%, [3]. A energia eólica, de entre as renováveis, apenas superada pela energia hídrica, é das que tem maior peso na produção de energia total em Portugal, tendo em 2014, uma potencia instalada nos 230 parques eólicos existentes no continente de 4844 MW, [3]. Contudo, devido à elevada variação do vento, a fiabilidade desta fonte é posta em causa, porque existem variações bruscas, que levam a elevados erros de previsão.

Têm surgido várias soluções de forma a mitigar a intermitência das energias renováveis, sendo a mais comum, o uso de centrais de reserva, sendo as centrais hídricas e de turbinas a gás de ciclo simples as mais usuais. No entanto, este método apresenta custos elevados e as centrais de turbinas a gás emitem gases de efeito estufa. Outro método possível é a retirada de serviço de algumas turbinas eólicas (*curtailment*), em momentos de excesso de geração ou de falta de capacidade de transporte das linhas. No entanto, com esta medida vai haver desperdício de recursos (vento) e um consequente impacto negativo a nível económico. Uma outra solução é a geração distribuída, no entanto estas fontes, sendo renováveis podem apresentar os mesmos problemas do vento, mas é

possível a complementaridade entre fontes renováveis ou o uso de tecnologias renováveis despacháveis, como a biomassa. Um método importante é o uso de armazenamento de energia, e também, a implementação de medidas do lado da procura, de forma a ajustar o nível de consumo às variações de produção, em tempo real.

As medidas de Gestão da Procura (DSM - *Demand-Side Management*), consistem na instalação de tecnologias ou alteração do seu padrão de funcionamento de forma a alterar permanentemente o diagrama de carga e as medidas *Demand Response* consistem na alteração temporária do consumo de forma a fazer face a situações temporárias de desequilíbrio entre a oferta e a procura. De entre as medidas *Demand Response*, podem ser tomadas decisões, de forma a mudar horários de funcionamento de equipamentos ou desligar alguns equipamentos durante períodos de tempo que não diminuam o conforto dos seus utilizadores.

O sector residencial representa aproximadamente 40% dos consumos finais de energia e 36%, das emissões de gases de efeito de estufa na União Europeia [4]. Os sistemas de aquecimento consumiram 43% da energia nos edifícios de serviços e 67% nos edifícios residências em 2012 [4]. Parte dos consumos nos edifícios, não podem ser controlados, no entanto através de sistemas de controlo algumas cargas podem ser controladas. Existem equipamentos, como é o caso dos equipamentos de climatização, que podem ser desligados em períodos em que a geração de energia baixa subitamente ou períodos de grande procura. Estes equipamentos podem também ser regulados de forma a manter o nível de conforto desejado, reduzindo ou aumentando a temperatura, de forma em que nos períodos de tempo em que a geração é menor ou a procura mais elevada, não consumam tanta energia.

1.2 – Objetivos

Na presente dissertação, apresentam-se soluções para os excessos de energia renovável que ocorrem devido à intermitência destas fontes, bem como para a variabilidade da geração eólica e dos erros de previsão que lhe estão associados. Através da aplicação de medidas de *Demand Response* às cargas reprogramáveis do sector residencial (cargas de lavar e secar) e à mudança horária do início do aquecimento dos edifícios do sector dos serviços, pretende-se uma diminuição do excesso que se verifica na sua grande maioria durante os períodos noturnos, em que a procura é menor. Adicionalmente, pretende-se avaliar a diminuição das emissões de gases de efeito estufa, bem como uma diminuição do impacto nos preços de energia.

De forma a colmatar a problemática da variabilidade da geração da energia proveniente do vento e o seu erro de previsão, pretende-se usar medidas de *Demand Response*, interrompendo o

ciclo de funcionamento de aparelhos de frio e calor, no sector residencial e do aquecimento, no caso do sector dos serviços. Pretende-se assim avaliar o impacto das referidas mediadas para compensar as variações da geração eólica e os erros de previsão.

1.3 – Estrutura da dissertação

A dissertação está organizada da seguinte forma:

O segundo capítulo, introduz a variabilidade de geração das fontes de energia renováveis, nomeadamente da energia eólica, bem como algumas soluções para este problema de forma a que estas fontes possam ser introduzidas em grande escala na rede elétrica, sem causar problemas quanto à fiabilidade do sistema.

O terceiro capítulo, apresenta a variabilidade da geração renovável e dos excessos de geração. É feita a análise de alguns diagramas de carga do sistema elétrico português para dias representativos, em que essa variabilidade é mais notória, referentes ao ano de 2014. Este capítulo, aborda também a variabilidade da energia eólica através da análise dos diagramas de geração da energia eólica referentes ao ano de 2014, que relacionam o valor previsto com o valor real gerado, de forma a analisar a variação brusca de geração renovável e dos erros de previsão elevados.

No quarto capítulo, é efetuada uma análise ao nível dos consumos nos edifícios do sector dos serviços, bem como nos do sector residencial. Analisam-se os diagramas de carga referentes a estes sectores de atividade em dias úteis e em fins de semana, por uso final de energia. É efetuada uma análise do ponto de vista de cargas não controláveis e controláveis e o peso de cada uma nos diagramas de carga. São também abordadas as estratégias de controlo de cargas para que seja possível uma melhor gestão energética em horas em que a geração de energia é baixa ou em que a procura é elevada.

No quinto capítulo, usam-se os métodos de *Demand Response*, analisados nos capítulos anteriores, com o objetivo de diminuir os excessos de geração renovável e adaptar o sistema a reduções bruscas da geração de energia eólica.

No sexto capítulo, analisam-se os impactos globais das medidas aplicadas no capítulo anterior, analisando os diagramas de consumo e geração, quando o controlo é aplicado no consumo do sector residencial e no consumo da climatização do sector dos serviços em simultâneo.

O sétimo capítulo, apresenta as conclusões globais da dissertação, sendo realizada uma análise dos resultados obtidos ao longo da dissertação e são apresentados possíveis temas de investigação no âmbito da problemática da introdução em larga escala de energias renováveis nos sistemas de energia.

Capítulo 2 – Variabilidade da geração renovável

Neste capítulo é apresentado o estado da arte relativo à análise da variabilidade de geração das fontes de energia renováveis, nomeadamente da energia eólica, bem como de algumas soluções para que estas fontes, possam ser integradas em grande escala na rede elétrica, sem causar problemas quanto à fiabilidade do sistema.

2.1 – Variabilidade da geração eólica

A produção de energia eólica é feita através do vento, que varia ao longo do tempo, tal como o sol e a chuva, [5]. A previsão de produção de energia eólica é realizada através de previsões meteorológicas, sendo a potência eólica proporcional ao cubo da velocidade do vento [6], logo uma pequena variação da velocidade do vento vai levar a uma grande variação da potência. A produção de energia através do vento é mais elevada nos meses de inverno do que nos de verão, devido às condições meteorológicas de cada estação, mas esta varia em todas as escalas temporais [7] [8]. A figura 2.1, representa a produção de energia eólica num dia quente em Portugal, através da sua observação pode ser concluído que a geração de energia baixa à medida que a temperatura sobe. Essa situação é indesejável uma vez que quando a temperatura é elevada vai existir um elevado uso de aparelhos de climatização. São assim especialmente problemáticos os dias de baixa geração eólica durante o verão.

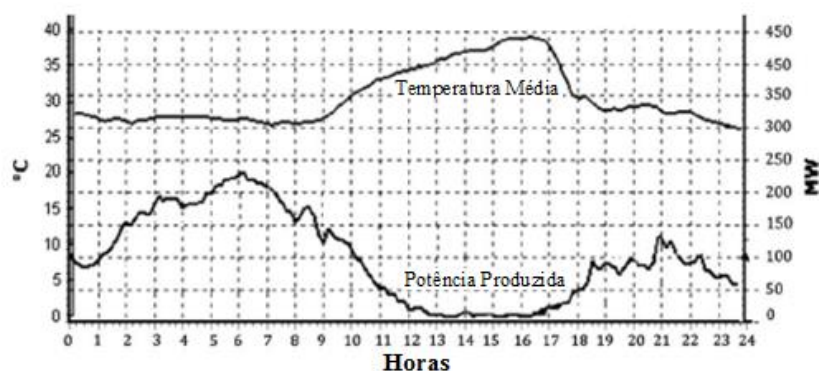


Figura 2.1 Produção de energia eólica num dia quente em Portugal [6].

A variabilidade desta fonte renovável faz com que seja difícil fazer uma previsão correta da produção de energia eólica ao longo do dia [9], o que dificulta a sua integração em larga escala

num sistema de energia sem que a sua fiabilidade baixe, devido à constante necessidade de compensar os erros de previsão e variabilidade. Na figura 2.2 [10] são apresentadas diferenças entre as previsões de geração eólica e a geração eólica real para o dia 10 de janeiro de 2011, no sistema elétrico irlandês, sendo visível que em certas alturas existem erros elevados nas previsões de geração, sendo esses erros positivos, quando o valor real é maior que o previsto, ou negativos, quando o valor real é inferior ao valor previsto.

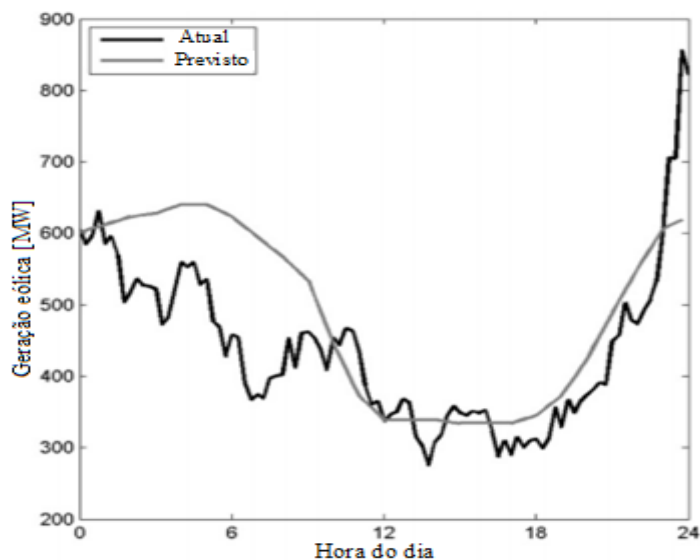


Figura 2.2 Exemplo da diferença entre a geração eólica prevista e a geração eólica real para o dia 10 de janeiro de 2011, no sistema elétrico irlandês [10].

Em [7] foi analisada a variação da produção eólica em países nórdicos, nomeadamente na Noruega, Suécia, Finlândia e Dinamarca. Neste estudo foram comparados os dados da produção eólica e da procura. Na figura 2.3 é apresentada a variação da potência eólica e da procura, em função do tempo para a Dinamarca. Pode-se observar que ambas são variáveis, no entanto essas variações não acontecem de forma síncrona e a potência eólica, é das duas, a mais variável.

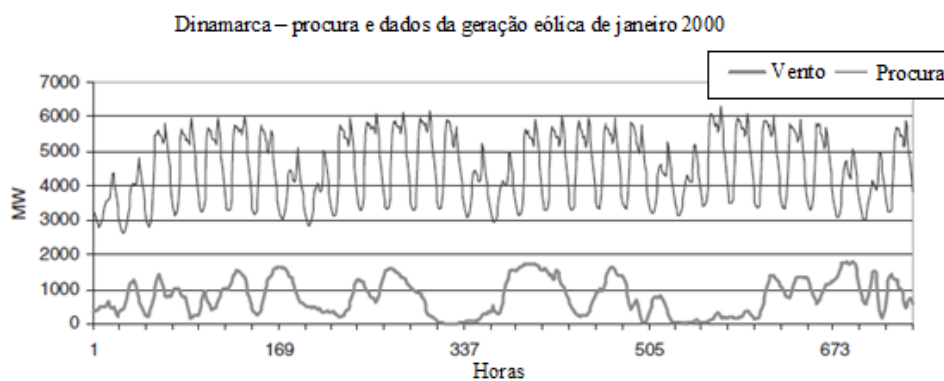


Figura 2.3 Variação da Potência eólica e da procura em função do tempo [7].

A geração de energia eólica apresenta frequentemente variações súbitas, o que torna a sua previsão difícil e com erros elevados associados [11]. Em [12], foi efetuado um estudo na Ilha de Creta na Grécia, em que são notórias as variações súbitas de geração, como se pode comprovar pelas figuras 2.4 e 2.5, onde podem ser observados o decréscimo acentuado da potência eólica, bem como um posterior aumento acentuado da mesma. Esta variação da potência está diretamente relacionada com a variação da velocidade do vento, figura 2.5. Na figura 2.4, embora a velocidade do vento se mantenha sem grandes variações, a potência sofre um decréscimo acentuado devido à necessidade de desligar os geradores repentinamente por restrições na rede de transporte.

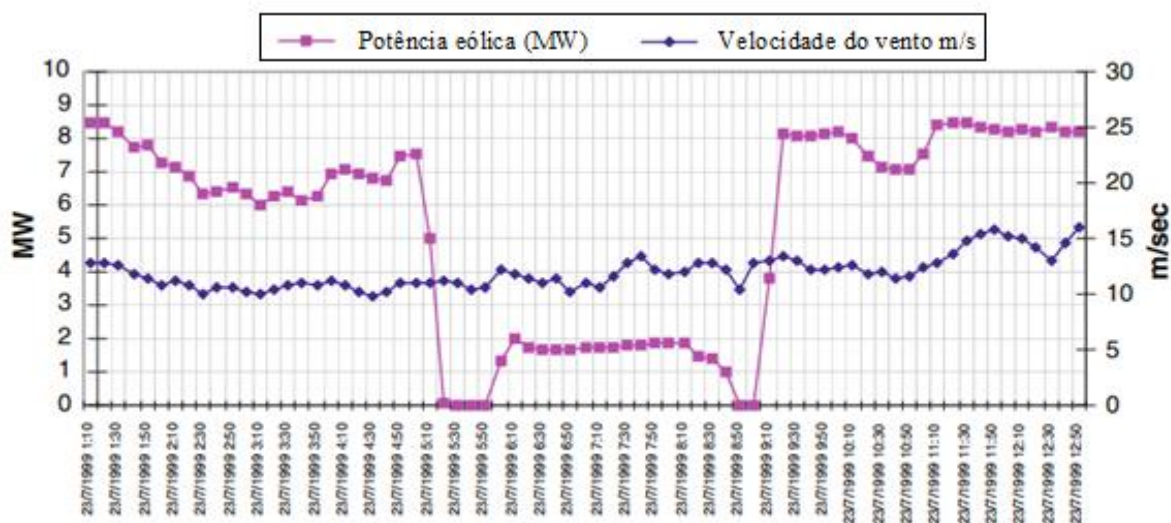


Figura 2.4 Decréscimo acentuado da potência eólica [12].

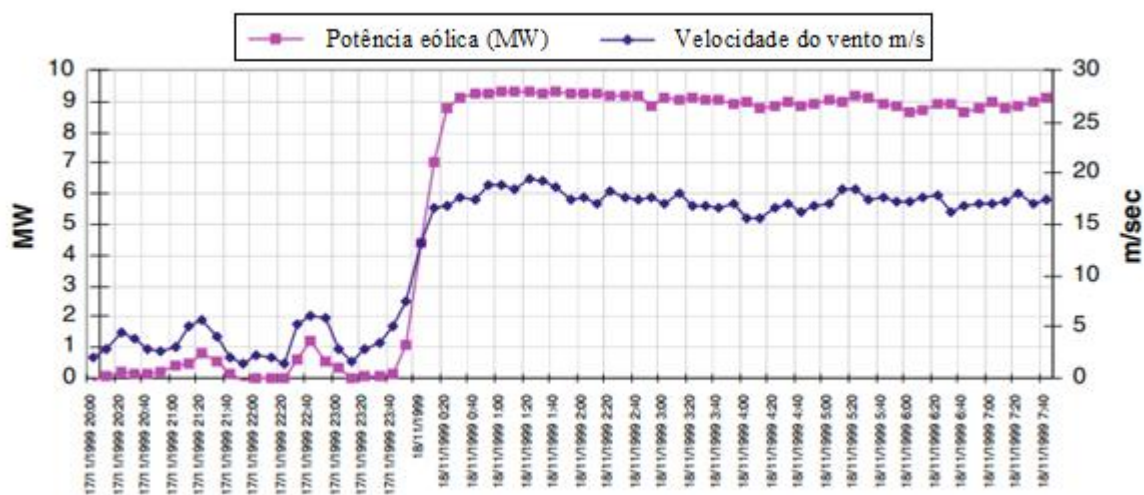


Figura 2.5 Aumento súbito da potência eólica [12].

No capítulo 3 será feito um estudo sobre a variabilidade da energia eólica na rede Portuguesa.

2.2 – Soluções para a variabilidade da geração eólica

As temáticas da intermitência das energias renováveis, e das soluções para a sua mitigação, têm sido analisadas segundo diferentes perspetivas. Em [13], é avaliado um cenário de penetração da energia eólica e de outras fontes intermitentes em grande escala, com o objetivo de garantir um sistema de energia viável com altos níveis de penetração de fontes intermitentes. Uma das soluções mais tradicionais para este fim é o uso de centrais de reserva, que devem ser flexíveis e com tempos de resposta rápidos, para que não haja falhas no sistema [13]. As centrais hídricas é uma das tecnologias usadas para este efeito, tal como centrais de turbinas a gás. Este método apresenta a desvantagem de o seu custo ser elevado e nas centrais de turbinas gás ou de vapor a emissão de gases poluentes para a atmosfera.

Outro método apresentado em [13] é a retirada de serviço de algumas turbinas eólicas (*curtailment*), em momentos de excesso de geração ou em situações de falta de capacidade de transporte da energia gerada. Contudo, esta técnica tem como desvantagem as perdas económicas que resultam da não utilização do recurso disponível (vento) para geração de energia [14] [15].

Outra solução é a geração distribuída, através da introdução de outras fontes de geração no sistema, no entanto estas fontes podem ter os mesmos problemas que o vento, como o exemplo da energia solar. Em [13] é apresentada como solução para este problema, a complementaridade entre várias fontes renováveis, eólica, solar e hídrica, ou a utilização de tecnologias renováveis despacháveis, como por exemplo a biomassa, que pode compensar as variações destas fontes. Em [16] e [17] são feitos estudos para o uso desta técnica no caso do sistema elétrico brasileiro, em que se estuda a complementaridade entre a geração eólica e a geração hídrica.

Uma solução importante para esta problemática é também o uso de armazenamento de energia [18] [19], bem como medidas do lado da procura, para direta ou indiretamente ajustar em tempo real o nível de consumo às variações de produção.

Os problemas mais acentuados com a variação da geração eólica surgem nos picos de consumos dos diagramas de carga [6]. Nestas horas, os consumos são altos e pode ocorrer uma produção de energia baixa ou uma redução rápida do seu nível. Para a resolução deste problema, surgiram as medidas de *Demand-Side Management* e as medidas de *Demand Response*.

As medidas de *Demand-Side Management*, consistem na instalação de tecnologias ou alteração do seu padrão de utilização de forma a causar uma alteração permanente nos diagramas de carga. As medidas de *Demand Response*, tem como propósito a diminuição temporária do consumo de forma a fazer face a uma situação de emergência, por exemplo baixa geração eólica. Estes dois tipos de medidas podem ter um grande impacto, reduzindo os consumos nas ponta de

consumo para assim minimizar as situações que causam os maiores problemas de fiabilidade dos sistemas de distribuição.

Em [6] foi feita a análise do impacto das medidas do lado da procura para o caso português, que em conjunto com medidas de *Demand Response* poderiam levar a uma redução da ponta dos diagramas de carga em 17.4%, considerando o valor de 2010. Na figura 2.6 pode ser observado que existe uma diminuição da procura no sector residencial com a implementação de medidas do lado da procura.

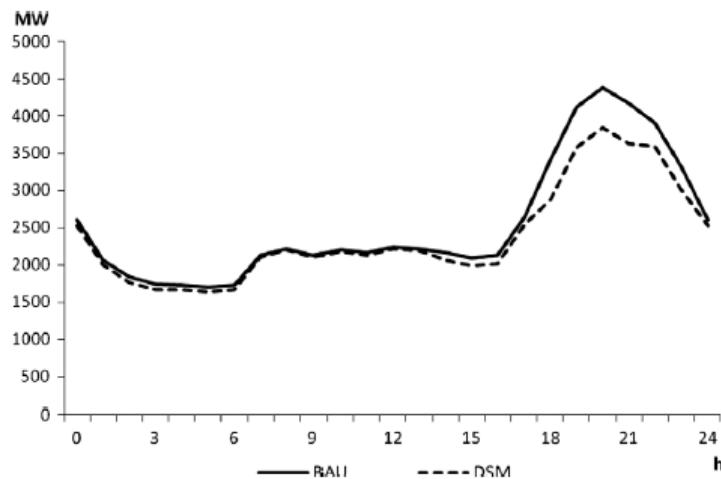


Figura 2.6 Diagrama de carga do sector residencial num cenário norma (BAU) e com medidas do lado da procura (DSM) [6].

Outra estratégia passa por deslocar consumos para as horas de maior geração. Em [20], 3% do consumo anual de energia foi movido das horas de ponta para as horas de vazio, tendo este estudo resultado de uma extrapolação para 2020 para o caso da Holanda. Este estudo teve como resultado uma redução de 27% nas variações de consumo entre as pontas e as horas de menor consumo, o que resulta numa também diminuição de 27% na energia desperdiçada anualmente, como pode ser observado na figura 2.7.

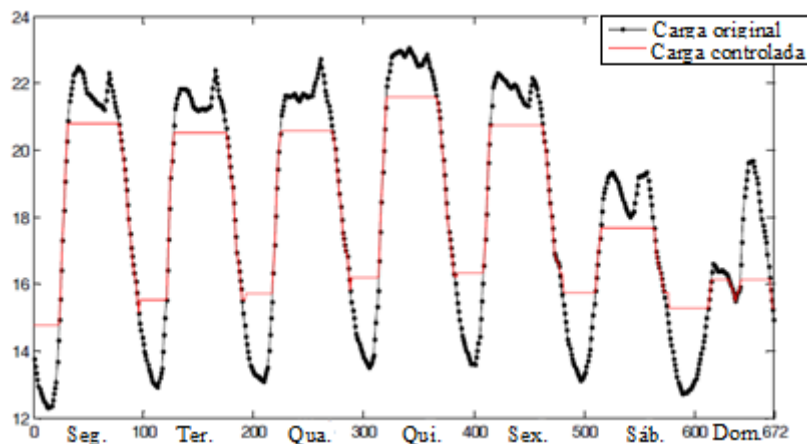


Figura 2.7 Perfil de cargas do sistema holandês com extrapolação para 2020, e com 3% de mudança de cargas [20].

O sector residencial representa aproximadamente 40% dos consumos finais de energia e 36% das emissões de gases de efeito de estufa na União Europeia [4]. Em [21] é apresentada uma plataforma de controlo remoto que permite gerir os consumos no sector residencial, através da introdução de edifícios mais inteligentes, “*smart buildings*”. É apresentado um novo sistema de monitorização de energia, que resulta do projeto Europeu FP7 ENERsip. Através da monitorização de consumos exercida por este sistema foi estimado que seria possível uma poupança energética de 3.2% e uma redução de custos de 5.8% [21].

Em [22], o mesmo sistema introduzido em [21], foi utilizado para implementar programas de *Demand Response* com o objetivo de compensar as variações da geração eólica. Foram analisados os impactos deste sistema nos diagramas de carga, em períodos com grande nível de variação da geração eólica, bem como a mudança que um sistema de controlo pode ter nesses diagramas através da compensação da baixa de geração de energia. Tal estratégia foi assegurada, por exemplo, com a interrupção do ciclo de funcionamento de eletrodomésticos de frio (frigoríficos, AVAC, etc.) e com a mudança no horário de funcionamento das máquinas de lavar. Com este controlo de carga foi possível anular a variação da energia eólica, durante a primeira hora, e na segunda hora obter uma atenuação de 87% em relação à variação da geração.

De acordo com [4], na União Europeia, os sistemas de aquecimento consumiram 43% da energia nos edifícios de serviços e 67% nos edifícios residenciais em 2012. Destes consumos dois terços foram assegurados com energia proveniente de fontes fósseis, como caldeiras a gás natural. Em Portugal os consumos dos sistemas de aquecimento só são significativos quando em conjunto com os sistemas de refrigeração, e representam a maior parte dos consumos de energia final em edifícios. Para aumentar a eficiência energética dos edifícios foram impostas leis por parte da União Europeia, e com as fontes de energias renováveis cada vez mais a substituírem as fontes de energia fósseis, surgiram grandes oportunidades de substituição das fontes de emissões de carbono por fontes verdes. Em [4], é referido que as bombas de calor podem substituir as caldeiras de gás natural. Foram feitos testes num edifício de serviços, em Coimbra, inserido no projeto *GroundMed*, que revelaram o elevado potencial e eficiência das bombas de calor geotérmicas, que podem ser combinadas com a massa termal do edifício para diminuir a procura energética e diminuir os consumos do utilizador com o edifício.

Nesse estudo são usadas medidas de *Demand-Side Management*, em que o edifício é pré-aquecido nas horas em que existe uma menor procura, horas essas em que o preço da energia é mais reduzido, de forma a diminuir os excessos de geração renovável. Adicionalmente, são implementadas estratégias de *Demand Response*, em que os sistemas de climatização são desligados nas horas de ponta, usando a massa térmica do edifício para garantir o conforto dos utilizadores. A mesma estratégia é utilizada para compensar as variações da energia eólica. Com

essa estratégia conseguiu-se absorver de 19 a 30% da energia renovável gerada em excesso durante a noite, diminuindo assim os excessos de geração. Conseguiu-se também compensar 55% dos erros de previsão durante a primeira hora de variação da energia eólica.

Foram também efetuados testes em [23], para a integração de bombas de calor em edifícios na Alemanha, revelando que as bombas de calor têm um grande potencial para substituir o uso de combustíveis fósseis na climatização de edifícios, sendo possível efetuar uma gestão dos consumos de acordo com o mercado de eletricidade, sendo o edifício usado para armazenar calor de forma a que os sistemas de climatização possam ser desligados em função da geração de energia e dos seus custos.

Nesta dissertação vão ser analisadas as possíveis medidas de gestão da procura e de *Demand Response* que podem ser implementadas para o caso de Portugal.

Capítulo 3 – Análise da intermitência

Este capítulo aborda a variabilidade e os excessos de geração renovável, através da análise de alguns diagramas de carga de dias representativos, referentes ao ano de 2014, em que essa variabilidade é mais notória.

O capítulo aborda também a variabilidade da energia eólica através da análise dos diagramas de geração da energia eólica referentes ao ano de 2014, que relacionam o valor previsto com o valor real, de forma a relacionar a variação brusca de geração renovável com os erros de previsão elevados.

3.1 – Variabilidade de geração renovável e excessos de geração

Cada vez mais o futuro da energia passa pelas fontes de geração renováveis. Devido à crescente preocupação com causas ambientais e defesa do planeta, as fontes de energia renovável são preferidas em relação às fontes fósseis. No entanto, a geração renovável, nomeadamente a energia solar, eólica e hídrica, são de difícil previsão e intermitentes, devido à variabilidade das condições climáticas.

Esta variabilidade leva a que seja difícil prever com rigor a geração de energia num determinado momento, o que faz com que seja necessário recorrer a fontes de energia não renovável para o caso de a energia proveniente de fontes renováveis não ser capaz de satisfazer a procura. Por outro lado, pode também existir um desperdício de energia, se a energia produzida for superior à procura, existindo excessos de energia na rede elétrica, que pode ser comprovado a partir dos diagramas de carga da REN.

Foram analisados diagramas de carga da REN referentes ao ano de 2014, com vista a quantificar os excessos de energia gerada que não foi consumida, calculados pela equação 3.1. Foi analisada a média diária mensal para os meses do ano 2014. Verificam-se excessos significativos no mês de janeiro, com valores médios de 25.4 GWh, como é possível observar no gráfico da figura 3.1 referente ao dia 4 janeiro. Pode verificar-se através do gráfico que o valor da soma do consumo e bombagem é inferior à geração, diferença essa, mais notória, entre as 0h e as 14h.

$$\text{Excesso de geração} = \text{Geração renovável} - (\text{Consumo} + \text{Bombagem}) \quad (3.1)$$

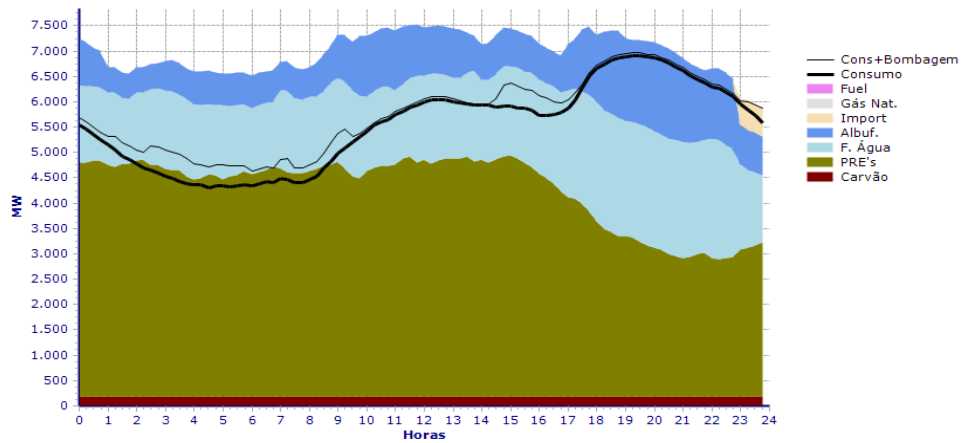


Figura 3.1 Diagrama de carga do dia 4 janeiro de 2014 [30].

Na análise de dados verificou-se que os meses de Inverno são os que registam valores mais altos de excesso de geração, nomeadamente, janeiro a março, o que pode ser observado na tabela 3.1.

Tabela 3.1 Excessos médios mensais para os meses em estudo.

Mês	Excesso médio mensal (MWh/dia)
janeiro	8078,5
fevereiro	15529,1
março	8608,1
outubro	1319,4
novembro	179,2

O valor de excesso médio mais elevado foi registado no dia 1 de março, com 33.8 GWh. Este valor foi registado de forma quase contínua, entre as 6h e as 23h59, no entanto verificam-se excessos de geração ao longo de todo o dia, como pode ser observado no gráfico da figura 3.2.

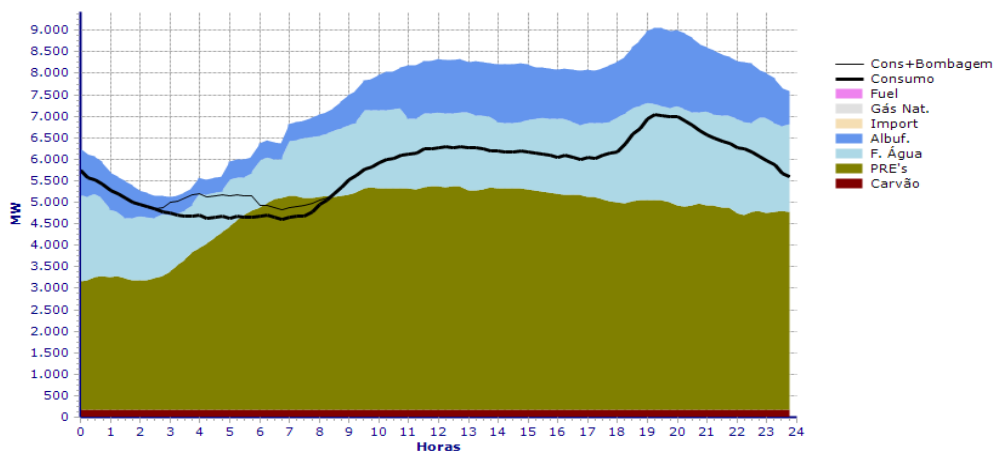


Figura 3.2 Diagrama de carga do dia 1 março de 2014 [30].

Com este estudo conclui-se que em alguns dias dos meses de Inverno existe um excesso de energia gerada e não aproveitada na rede elétrica portuguesa, proveniente da geração renovável. Neste subcapítulo, apenas foram analisadas as situações mais graves no que toca a excessos de geração no ano de 2014, tendo esses excessos ocorrido em fins de semana (algo que é justificado pelo menor consumo nesses dias). No entanto, no subcapítulo 5.1, são expostos casos de geração em dias úteis, que têm um maior impacto no consumo anual do que os fins de semana.

3.2 - Variabilidade da energia eólica e excessos de geração

Sendo a energia eólica dependente de condições climáticas, e sendo a velocidade do vento variável em cada instante, podem existir variações bruscas da geração de energia a partir desta fonte renovável, que são agravadas pelo facto da potência eólica ser proporcional ao cubo da velocidade do vento. No diagrama da figura 3.3, pode ser observada uma variação acentuada da geração eólica, de 185 MW/hora, ocorrida no dia 19 de março de 2014. É bem visível um decréscimo da energia gerada após as 6h, sendo a partir das 13h esta geração é quase nula.



Figura 3.3 Diagrama de Produção Eólica dia 19 de março de 2014 REN.

No diagrama da figura 3.4, relativo ao dia 3 de janeiro, é observável um decréscimo acentuado da produção de energia, de 120 MW/hora, entre as 0h e as 10h, seguidamente a produção mantém-se contante para depois sofrer um aumento também acentuado.

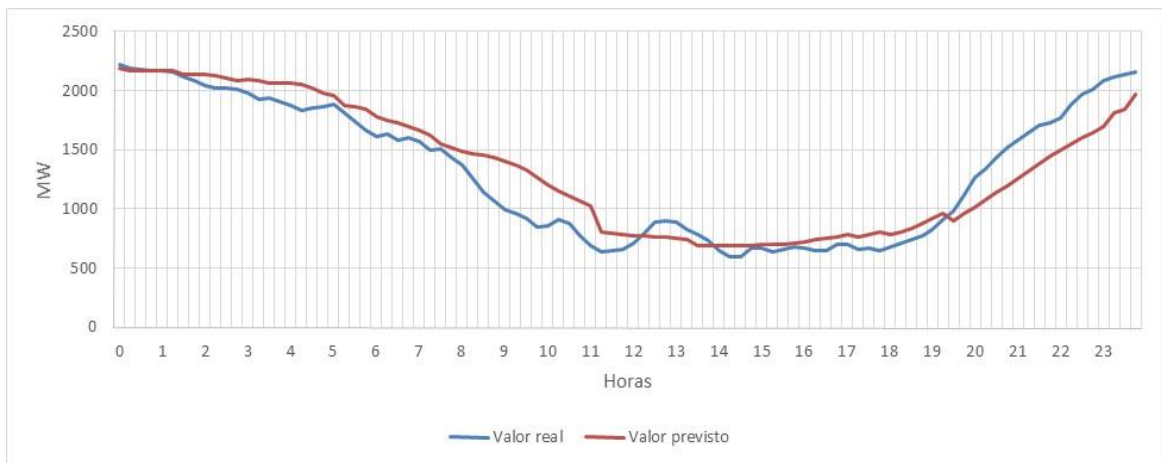


Figura 3.4 Diagrama de Produção Eólica dia 3 de janeiro de 2014.

Estas variações bruscas fazem com que seja difícil de prever a geração de energia eólica, e a que essas previsões tenham erros elevados. Através da análise dos dados da REN para o ano 2014, foram calculados os erros de previsão absolutos e relativos, como indicam as equações 3.2 e 3.3.

$$\text{Erro absoluto} = \text{Valor previsto} - \text{Valor real} \quad (3.2)$$

$$\text{Erro relativo (\%)} = \frac{\text{Erro absoluto}}{\text{Valor real}} \times 100 \quad (3.3)$$

Foi verificado um erro absoluto máximo negativo de -375,3 MW e um erro relativo de -41% para o dia 19 de março pelas 9h45, ou seja, ocorreu uma geração de energia inferior à prevista. Pela observação do gráfico da figura 3.4 pode-se verificar que os erros mais elevados, entre as 7h e as 11h, se localizam nas horas em que ocorre uma variação brusca da geração eólica, sendo que na generalidade das situações, para este dia, o valor previsto é maior que o valor real, levando a erros absolutos e relativos negativos.

Analisando os erros referentes ao dia 3 de janeiro (figura 3.5), verifica-se que existe um erro positivo entre as 12h e as 14h, altura em que houve uma produção de energia eólica superior ao previsto, com um erro absoluto máximo de 137,2 MW e um erro relativo máximo de 18%. Entre as 8h e as 11h verifica-se um erro positivo, no horário em que ocorre uma baixa brusca da produção, sendo o erro absoluto máximo de -409,6 MW e o relativo máximo de -34%.

Usando estes dois exemplos consegue-se verificar uma relação entre as variações bruscas da produção e os erros cometidos nas previsões da geração eólica.

Através da análise dos dados da REN para o ano 2014, foi possível verificar um erro máximo absoluto positivo de 815.7 MW, o que corresponde a um erro relativo máximo positivo de 57%, ou seja ocorreu uma geração de energia muito superior à prevista, o que se verificou no dia 2 de março, dia com baixa geração eólica. O erro absoluto máximo negativo (valor de geração inferior

à prevista) encontrado foi de -868.4 MW, e um erro máximo negativo relativo de -67%, que ocorreu no dia 13 de outubro. Estes resultados podem ser observados nos diagramas das figuras 3.5 e 3.6.



Figura 3.5 Diagrama de Produção Eólica dia 2 de março de 2014.



Figura 3.6 Diagrama de Produção Eólica dia 13 de outubro de 2014.

Foi, também possível verificar um erro relativo positivo máximo de 473%, no dia 27 de setembro, dia com fraca geração eólica. O erro mínimo relativo encontrado foi de -98% e ocorreu no dia 27 de outubro, como pode ser observado nas figuras 3.7 e 3.8.



Figura 3.7 Diagrama de Produção Eólica dia 27 de setembro de 2014.

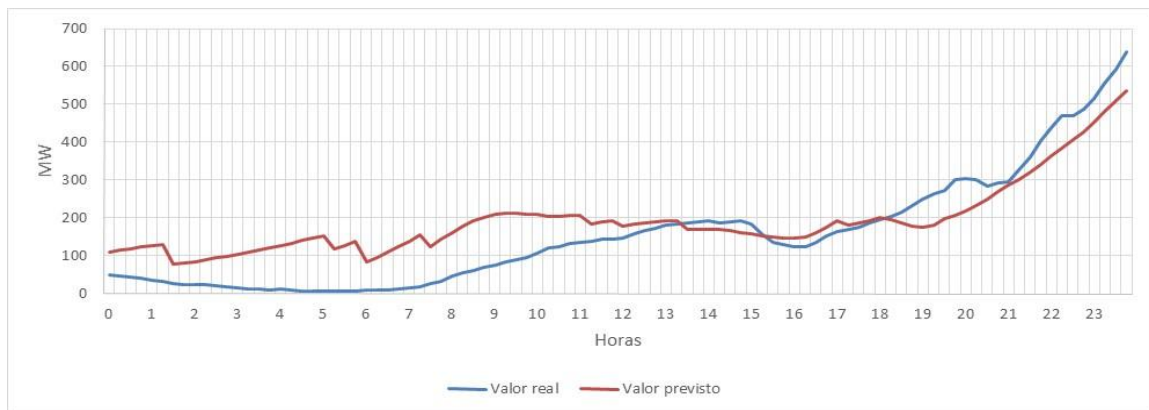


Figura 3.8 Diagrama de Produção Eólica dia 27 de outubro de 2014.

Foram calculados os erros médios absolutos, negativo e positivo, para o ano de 2014, para tal foi feita a separação de erros negativos e positivos. O erro médio absoluto negativo calculado foi de -106.47 MW, e o erro médio absoluto positivo foi de 105.14 MW. Com base nestes valores é possível afirmar que os erros médios não são muito elevados, no entanto tem que se ter em conta que os erros, dependendo da hora a que ocorrem, podem afetar a fiabilidade do sistema.

Capítulo 4 – Caracterização do consumo

Neste capítulo é efetuada uma análise ao nível dos consumos nos edifícios do sector dos serviços, bem como nos do sector residencial. São analisados os diagramas de carga referentes a estes sectores em dias úteis e aos fins de semana, por uso final de energia. É feita uma análise do ponto de vista de cargas não controláveis e controláveis e o peso de cada uma nos diagramas de carga. São também abordadas as estratégias de controlo de cargas para que seja possível uma melhor gestão energética em horas em que a geração de energia é baixa ou em que a procura é alta, de forma a que se possam introduzir em larga escala fontes intermitentes na rede elétrica nacional.

4.1 – Sector dos serviços

O sector dos serviços tem sofrido um crescimento nos consumos energéticos de 3% na última década [24], representando em 2014 34% dos consumos de energia em Portugal. Os consumos por sector em percentagem encontram-se representados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 Evolução do consumo de eletricidade em Portugal em % [24].

	2005	2014
Indústria	38	37
Transportes	1	1
Sector Doméstico	28	26
Serviços	31	34
Agricultura e Pescas	2	2
Total	100,0	100,0

Os consumos de eletricidade no sector dos serviços estão divididos pela climatização dos espaços, sendo cerca de 19,4% para os equipamentos de ar condicionado e 18,5% para os equipamentos de aquecimento. A iluminação dos espaços representa 25,9% dos consumos neste sector e os equipamentos elétricos 35,2%, [4], tal como pode ser observado na figura 4.1.

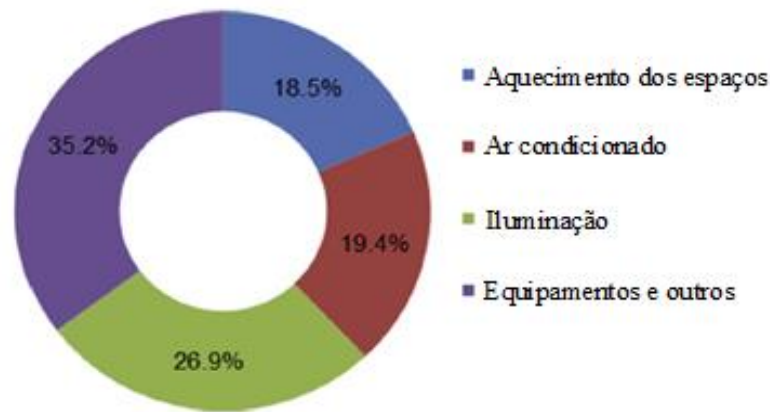


Figura 4.1 Distribuição dos consumos de energia no setor dos serviços em Portugal em 2012 [4].

Parte dos consumos nos edifícios, não podem ser alterados, no entanto através de sistemas de controlo algumas cargas podem ser controladas. Existem equipamentos que podem ser desligados durante períodos de tempo curtos em situações em que a geração de energia é menor ou períodos de grande procura, como é o caso dos equipamentos de climatização. Estes equipamentos podem também ser regulados de forma a manter o nível de conforto desejado, reduzindo ou aumentando a temperatura, de forma em que nos períodos de tempo em que a geração é menor ou a procura mais elevada, não consumam tanta energia.

Na figura 4.2 está representada extrapolação dos diagramas de consumo da climatização no sector dos serviços a nível nacional para sistemas AVAC centralizados. Para a obtenção destes resultados, foi considerado um edifício dos serviços piloto, localizado em Coimbra, cujo funcionamento foi analisado durante uma semana, e em que o seu período de funcionamento se localiza entre as 8h e as 19h, sendo este edifício aquecido através de bombas de calor geotérmicas (GHPs). Para a extrapolação foi considerado que apenas 50% dos espaços públicos são aquecidos por sistemas de controlo centralizado, e nesta percentagem de edifícios dos serviços apenas 25% são aquecidos através sistemas com um padrão de consumo semelhante às GHPs (por escalões de potência). Para a obtenção de um total nacional, foi feita uma extrapolação, cujo fator foi calculado através da comparação entre o consumo em aquecimento do edifício que foi levado em conta neste estudo, durante o Inverno, e o consumo em aquecimento total, a nível nacional nos edifícios dos serviços. Este fator foi aplicado ao diagrama de carga médio do edifício considerado [13].

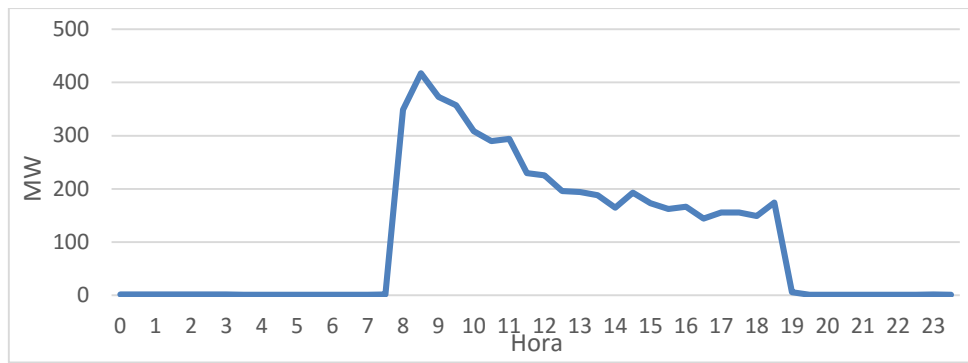


Figura 4.2 Diagrama de consumos do aquecimento no sector dos serviços com equipamentos GHPs para o mês de fevereiro.

Como se pode verificar pela análise do diagrama, do edifício considerado como representativo do setor dos serviços os consumos localizam-se maioritariamente entre as 8h e as 19h, horário de abertura e fecho dos edifícios, estando os consumos mais elevados localizados entre as 8h e as 10h, horário em que o aquecimento do edifício é realizado por duas GHPs, sendo que no restante período de funcionamento apenas uma está em funcionamento, e em ciclos de ON-OFF.

De forma a obter o diagrama de consumos para os restantes 25% correspondentes aos edifícios aquecidos por sistemas de AVAC centralizado, considerou-se que estes são aquecidos por sistemas com consumos semelhantes aos sistemas Split. Através do diagrama médio de consumos para os dias úteis, obtido através de dados fornecidos pela ADENE, foi feita uma extrapolação para o total nacional, de forma idêntica à extrapolação feita para as GHPs. Com este procedimento foi obtido o diagrama de carga de consumos extrapolado da figura 4.3.

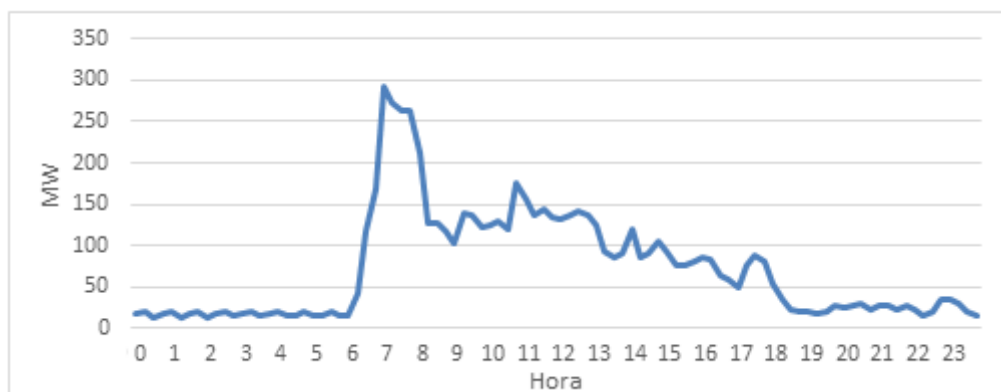


Figura 4.3 Diagrama de consumos médio extrapolado para os sistemas de aquecimento com sistemas Split.

Neste diagrama é observável que os consumos mais elevados que se centram entre as 6h30 e as 8h, sendo os consumos no resto dia mais uniformes.

Na figura 4.4, está representado o diagrama de carga de fevereiro de 2014, no qual pode ser verificado que a procura é maior a partir das 8h da manhã, horário em que é iniciada a utilização dos edifícios dos serviços.

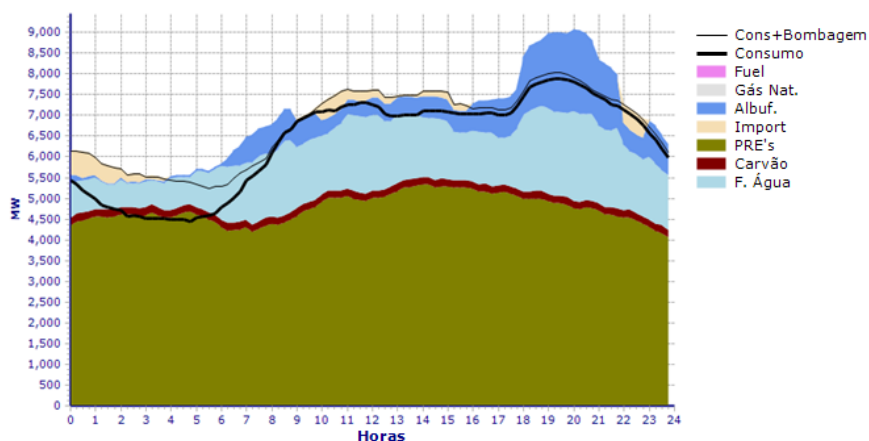


Figura 4.4 Diagrama de carga nacional de fevereiro de 2014 [30].

Pela observação dos gráficos anteriores, pode concluir-se que há potencial para deslocar cargas de climatização para períodos horários em que há excesso de geração renovável, através de uma estratégia de pré-aquecimento dos edifícios. É também possível reduzir temporariamente o consumo dos referidos sistemas de climatização para compensar a variação da produção renovável, nomeadamente da geração eólica.

4.2 – Sector residencial

O sector residencial representava em 2014, 26% dos consumos de eletricidade em Portugal, como pode ser observado na tabela 4.1. Na figura 4.5 pode ser observada a distribuição dos consumos de energia elétrica no sector residencial organizados pelo tipo de utilização final em Portugal.

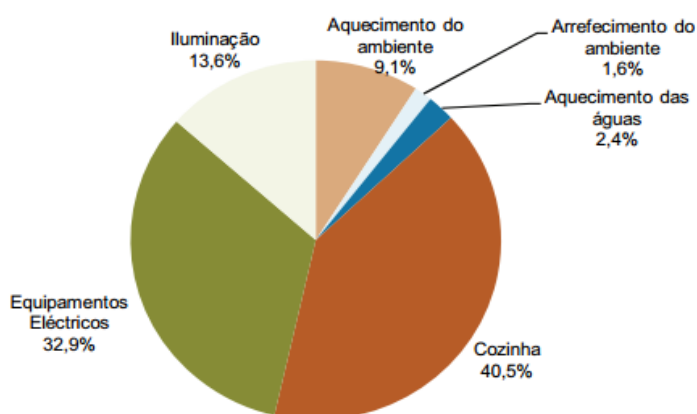


Figura 4.5 Distribuição dos consumos de energia elétrica no sector residencial em Portugal pelo tipo de utilização final em 2010 [25].

Pela observação do gráfico, pode-se verificar que os sistemas de aquecimento e arrefecimento, seja ambiente ou de águas, ocupam uma fatia do gráfico de 13,1%, quando somados. A cozinha, é nos edifícios residências o local onde o consumo energético é mais elevado, sendo 40,5%, [25]. O consumo tão elevado na cozinha pode ser explicado pelo uso de eletrodomésticos com um consumo elevado, como é o caso de placas vitrocerâmicas, fornos e frigoríficos. Os outros equipamentos elétricos consomem 32,9% da utilização final de energia e a iluminação apenas 10,3%.

O projeto REMODECE - *Residential Monitoring to Decrease Energy Use and Carbon Emissions in Europe*, teve como objetivo contribuir para o conhecimento mais detalhado da forma como se processa o consumo de energia elétrica no sector residencial da U.E.-25+2, desagregado pelas principais categorias de equipamentos [26]. Após a monitorização de cerca de 1300 unidades residenciais, distribuídas por 12 países da União Europeia, foi concluído que o uso final de energia no setor residencial se distribui da forma apresentada na figura 4.6.

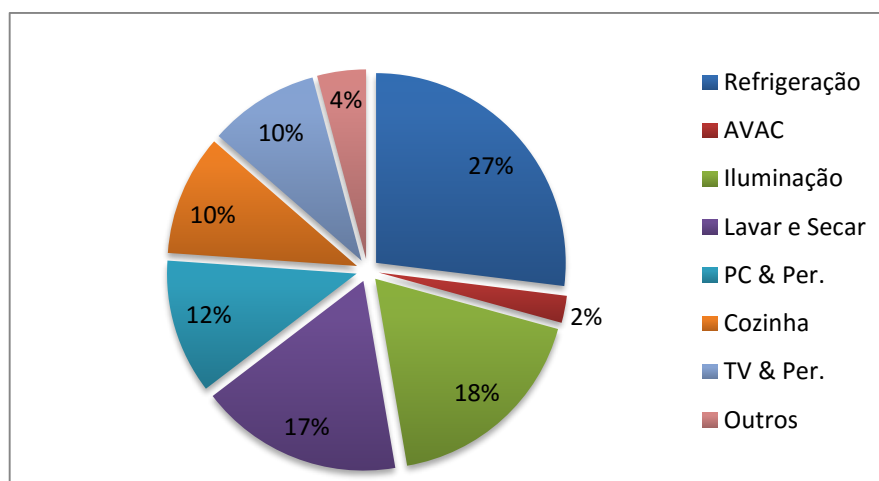


Figura 4.6 Consumos no sector residencial na União Europeia – Projeto REMODECE [26].

Através das estatísticas do projeto REMODECE, a nível europeu, foram estimados os diagramas de carga para o caso de Portugal. Para isso, o projeto REMODECE, estimou os diagramas de carga com desagregação de consumos para o sector residencial europeu, em dias úteis e fins de semana. Com base nos resultados deste projeto e nas taxas de posse de equipamentos em Portugal, obtidos no estudo do INE, em [25], estas taxas constam na figura 4.7, foram obtidos os diagramas de carga do sector residencial em Portugal.

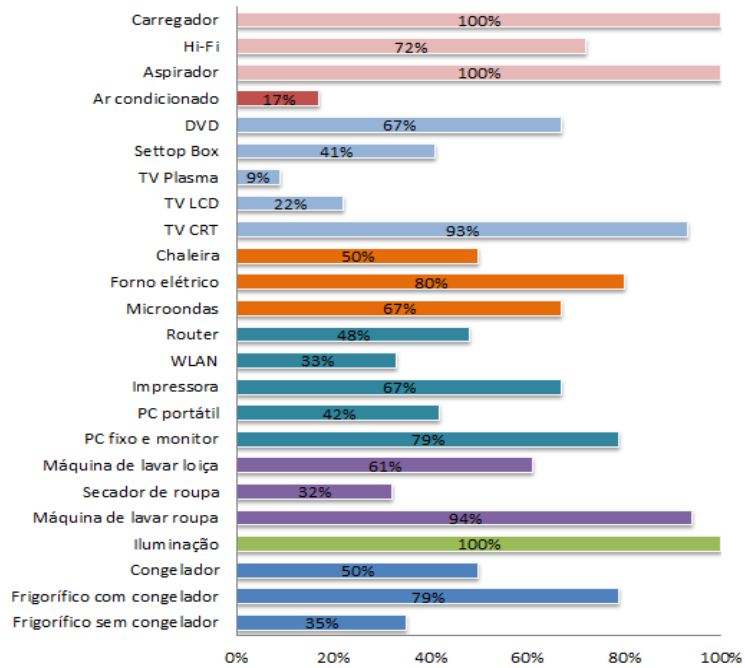


Figura 4.7 Taxa de posse dos equipamentos domésticos em Portugal [26].

Da observação das figuras 4.8 e 4.9, diagramas de carga do sector doméstico, estimados para o caso de Portugal, como foi referido anteriormente, pode ter-se uma ideia mais precisa de como são divididos os consumos nas habitações, observando os diagramas de carga médios para os dias úteis e fins de semana.

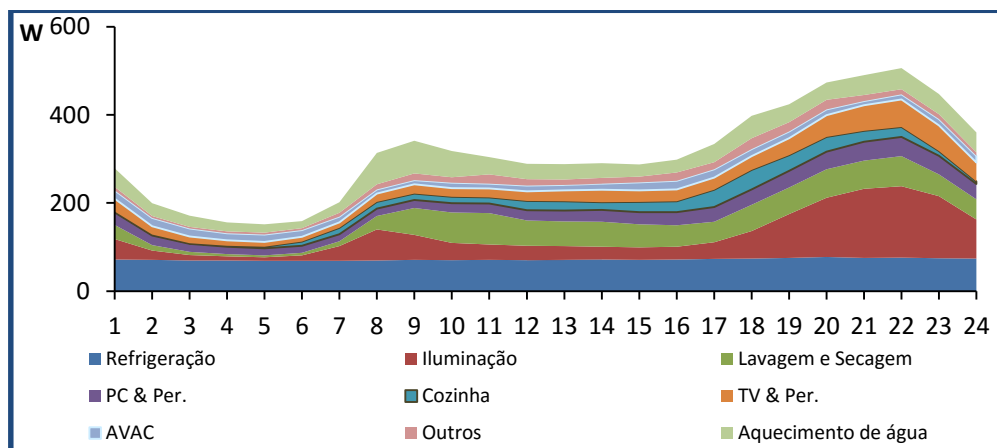


Figura 4.8 Diagrama de carga médio do sector residencial para os dias úteis.

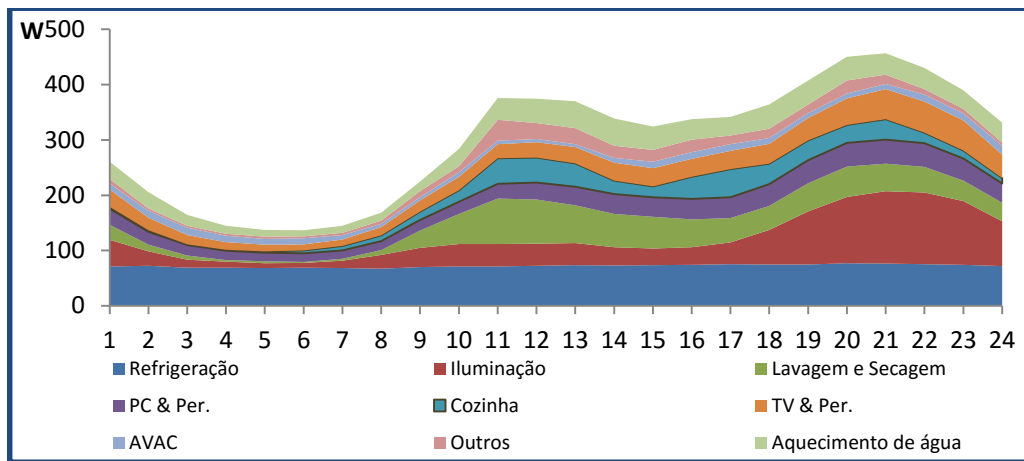


Figura 4.9 Diagrama de carga médio do sector residencial para os fins de semana.

Através da análise dos diagramas de carga é observável uma utilização contínua de sistemas de aquecimento e de arrefecimento, e uma redução notória durante o período entre as 2h e as 7h da utilização de sistemas de lavagem e secagem e da iluminação. A observação destes diagramas é muito importante, de forma a analisar as cargas que podem ser desviadas para horários em que a produção renovável seja mais elevada, bem como as cargas que podem ser desligadas em certos períodos de tempo, e o efeito destas medidas no diagrama de carga.

De forma a saber que cargas podem ser deslocadas ou desligadas, será efetuada uma análise das cargas domésticas presentes no diagrama de carga anteriormente apresentado. Uma parte das cargas presentes no diagrama, não pode ser controlada pois isso iria provocar uma diminuição do conforto e das condições necessárias à boa utilização dos espaços. São essas cargas a iluminação e as outras cargas (eletrodomésticos como secadores, varinhas mágicas, torradeiras, máquinas de café, etc.). Por outro lado, existem cargas em que pode ser efetuado um ajuste no seu funcionamento de forma a ter um menor consumo de energia em períodos de fraca geração ou de elevada procura, ou até podem mesmo ser desligadas nesses períodos alterando o seu funcionamento para outros períodos horários, cargas como frigoríficos, termoacumuladores e sistemas de ar condicionado, em que a sua temperatura é regulável. Existem também cargas em que o seu período de funcionamento pode ser regulado, ou seja, desviando-as para períodos de menos procura ou maior geração, como por exemplo máquinas de lavar e secar.

Nas figuras 4.10 e 4.11, pode ser observado de forma mais nítida as cargas controláveis e não controláveis, para dias úteis e fins de semana. A obtenção deste diagrama foi feita, tendo em conta os diagramas médios para Portugal apresentados anteriormente e o número total de habitações, 3.9 milhões [22]. As cargas dos diagramas anteriores foram também divididas em cargas controláveis e não controláveis. As cargas controláveis foram ainda divididas em interruptíveis e reprogramáveis.

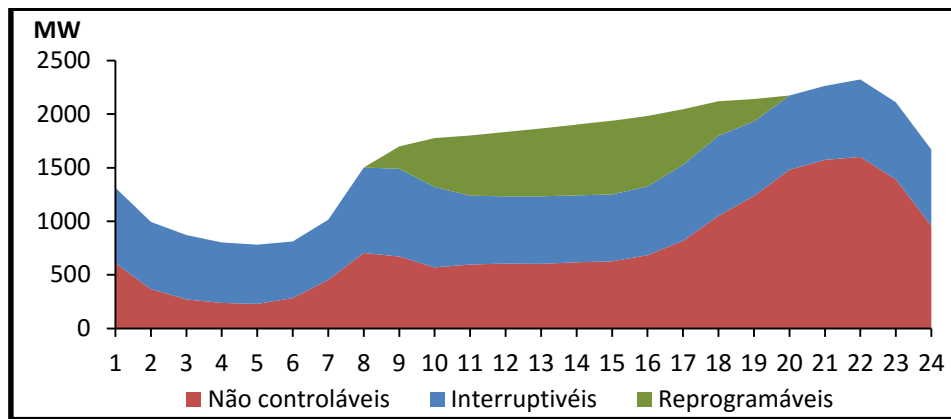


Figura 4.10 Diagrama de carga com divisão entre cargas não controláveis, que podem ser interrompidas, e reprogramáveis nos dias úteis.

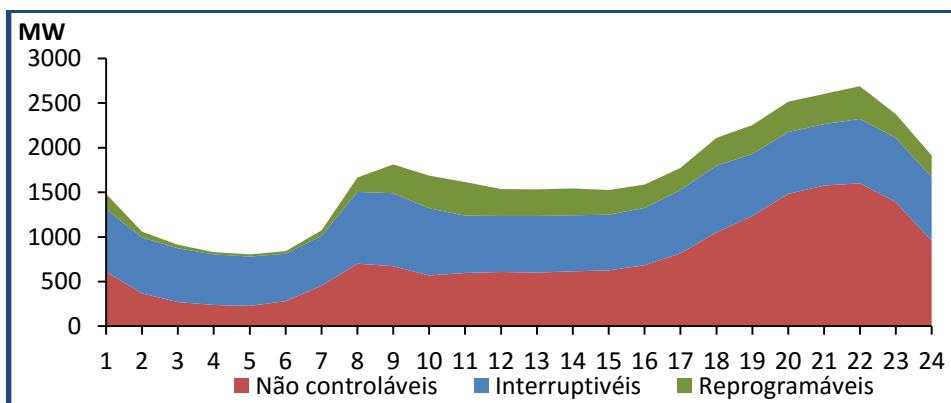


Figura 4.11 Diagrama de carga com divisão entre cargas não controláveis, que podem ser interrompidas, e reprogramáveis nos fins de semana.

Da observação das figuras, pode-se constatar que através do controlo de cargas se pode reajustar o horário de funcionamento das cargas reprogramáveis, para as horas de menor consumo ou maior geração. As cargas em que se pode interromper o ciclo de funcionamento ocupam uma faixa quase contínua do diagrama, podendo ser interrompidas durante períodos curtos para fazer face a reduções súbitas da geração, como por exemplo variações da geração eólica.

Capítulo 5 – Casos de estudo

No capítulo 3 foram analisados casos de excessos de geração bem como, casos de variabilidade de geração eólica e erros de previsão. No capítulo 4 foi feita uma análise dos consumos nos sectores dos serviços e residencial, nomeadamente do seu potencial de alteração para aplicar medidas de *Demand Response*. No presente capítulo, usam-se os métodos de *Demand Response*, analisados, de forma a que se consiga diminuir excessos de geração e adaptar o sistema a mudanças bruscas da geração de energia eólica.

5.1 – Apresentação dos casos de estudo

No capítulo 3.1, foram analisados os excessos de geração que existem na rede portuguesa e conclui-se, no capítulo 4.2, que com medidas de *Demand Response* seria possível a mobilização de cargas de períodos com baixa geração renovável para períodos com maior geração. No capítulo 3.1, optou-se por analisar as situações mais graves no que toca a excessos de geração, dias esses que ocorrem nos fins-semana. Neste capítulo optou-se por analisar principalmente situações de excessos de geração que ocorrem em dias úteis, pois embora não sejam as mais graves ao longo do ano, são nestes dias em que se tem um maior consumo e há assim maior potencial para ações de *Demand Response*. Contudo, optou-se por analisar também dois dias de fim de semana. Seguidamente são apresentados os dias considerados para os casos de estudo para os excessos de geração.

Primeiro caso de estudo para excessos de geração – 10 de março de 2014

O dia 10 de março de 2014 (segunda-feira), é um dos dias úteis que apresenta um maior excesso de geração renovável durante o período nocturno, como pode ser visto na figura 5.1, onde está representada a geração registada para este dia, bem como os consumos totais do sector residencial e o diagrama de carga do aquecimento para o sector dos serviços.

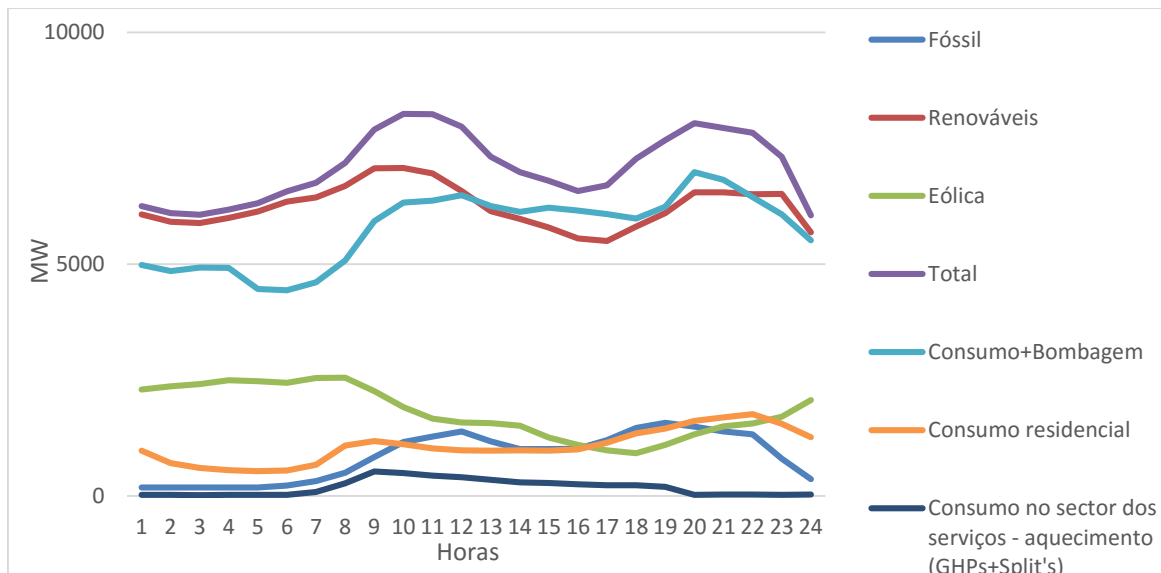


Figura 5.1 Diagrama de geração e consumos do dia 10 de março de 2014, curva típica do consumo no sector residencial e diagrama do aquecimento no sector dos serviços.

Segundo caso de estudo para excessos de geração – 6 de fevereiro de 2014

Para o segundo caso de estudo, foi escolhido o dia 6 de fevereiro de 2014 (quinta-feira). Como pode ser observado na figura 5.2, neste dia os excessos de geração renovável são constantes, ou seja, o excesso da geração face ao consumo é uniforme.

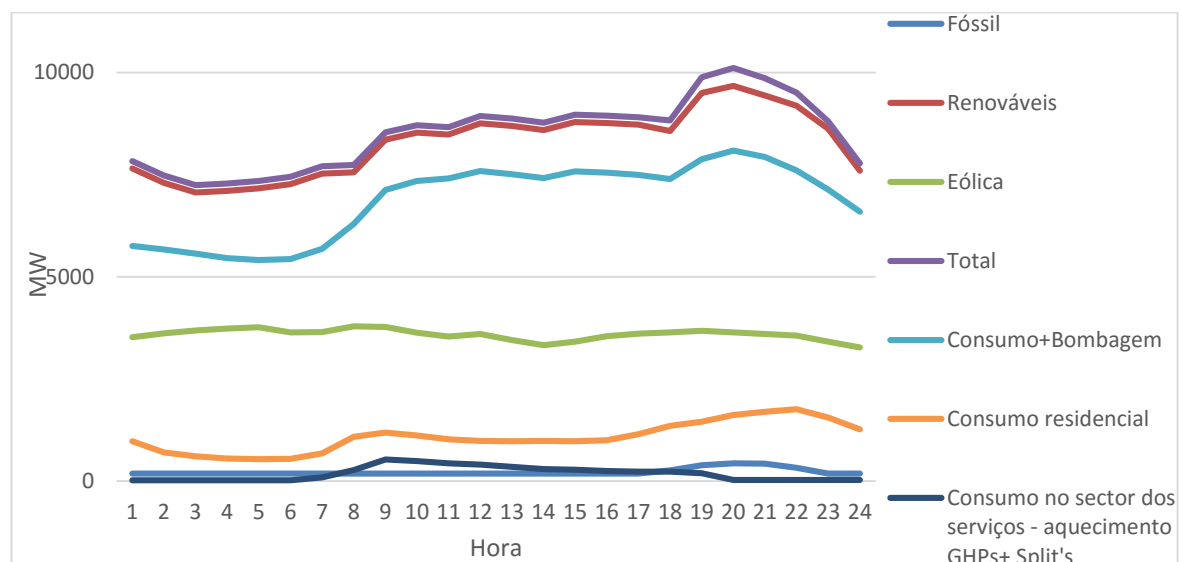


Figura 5.2 Diagrama de geração e consumos do dia 6 de fevereiro de 2014, curva típica do consumo no sector residencial e diagrama do aquecimento no sector dos serviços.

Terceiro caso de estudo para excessos de geração – 1 de março de 2014

O terceiro caso de estudo é um dia de fim de semana, 1 de março de 2014 (sábado). Como foi referido no capítulo 4.2, o diagrama do consumo nos fins de semana é diferente dos dias úteis. Na figura 5.3, pode ser observado o diagrama de geração e consumos do dia 1 de março bem como o consumo residencial num fim de semana. Como nos fins de semana, para o tipo de edifícios considerados, o sector dos serviços não desenvolve as suas funções, neste caso foi considerado apenas o diagrama do setor residencial.

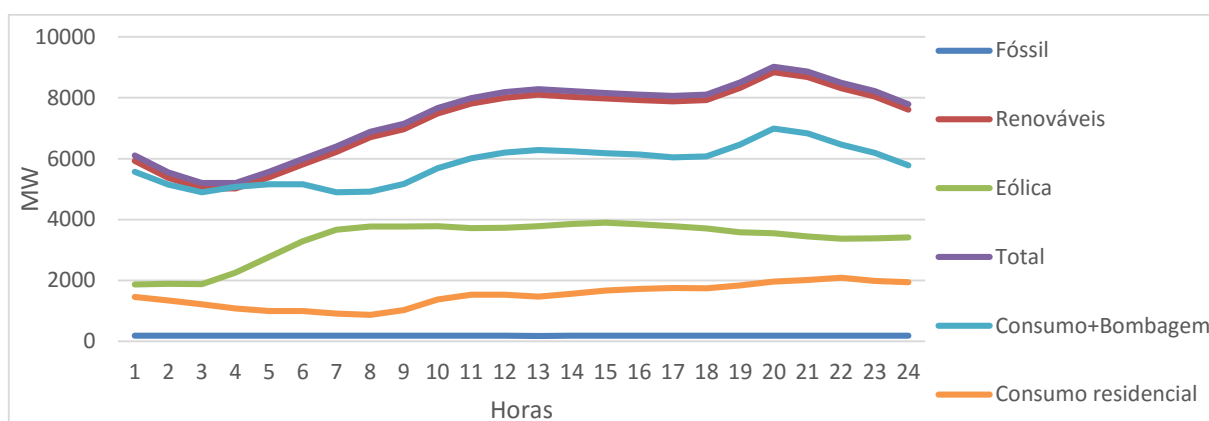


Figura 5.3 Diagrama de geração e consumos do dia 1 de março de 2014 curva típica do consumo no sector residencial.

Quarto caso de estudo para excessos de geração – 22 de março de 2014

Devido ao facto do excesso no dia analisado anteriormente ocorrer durante todo o dia, foi também analisado um dia de fim de semana com o excesso de geração renováveis a concentrar-se maioritariamente durante a noite, horário de menor procura. Para isso, analisou-se o dia 22 de março (sábado), cujo diagrama de geração se encontra na figura 5.4.

Observando o diagrama, conclui-se que os excessos de geração renovável se centram entre as 6h e as 12h e entre as 18h e as 20h, existindo no restante dia um défice de geração renovável ou uma geração perto da soma do consumo e da bombagem.

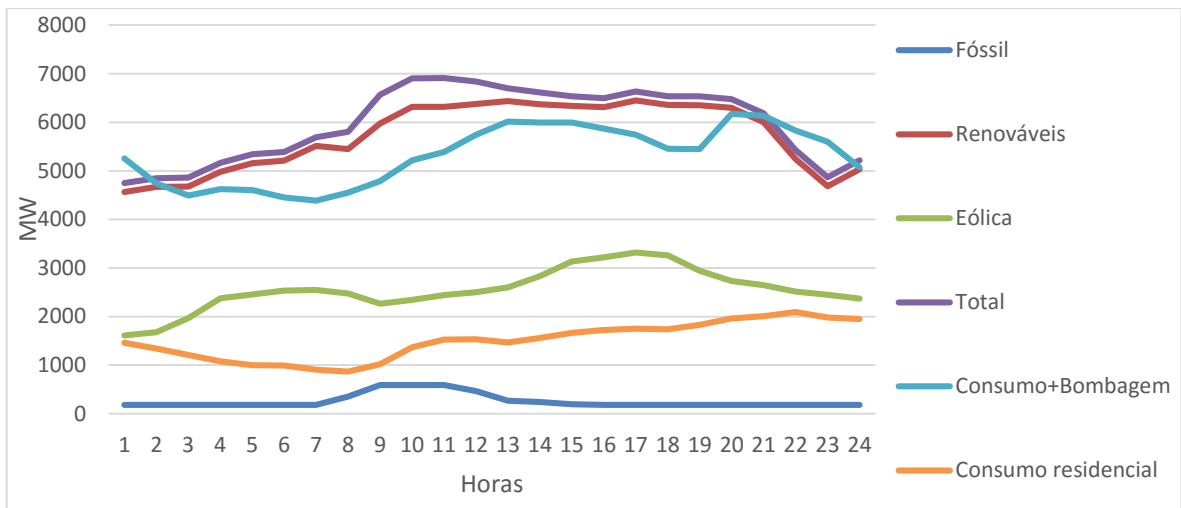


Figura 5.4 Diagrama de geração e consumos do dia 22 de março de 2014 curva típica do consumo no sector residencial.

No capítulo 3.2, foram analisadas situações em que ocorriam variações bruscas da geração eólica bem como erros de geração. No presente capítulo, foram escolhidos alguns dos dias analisados nesse capítulo, os quais são apresentados de seguida.

Primeiro caso de estudo para variabilidade de geração – 3 de janeiro de 2014

Para analisar o impacto da variabilidade da geração eólica, e como se pode colmatar com medidas de *Demand Response*, usou-se como primeiro caso de estudo o dia 3 de janeiro de 2014 (sexta-feira). Na figura 5.5, está representado o diagrama de geração eólica (real e prevista) do primeiro caso de estudo, bem como o consumo residencial típico de um dia útil e o diagrama de carga da climatização para o sector dos serviços.

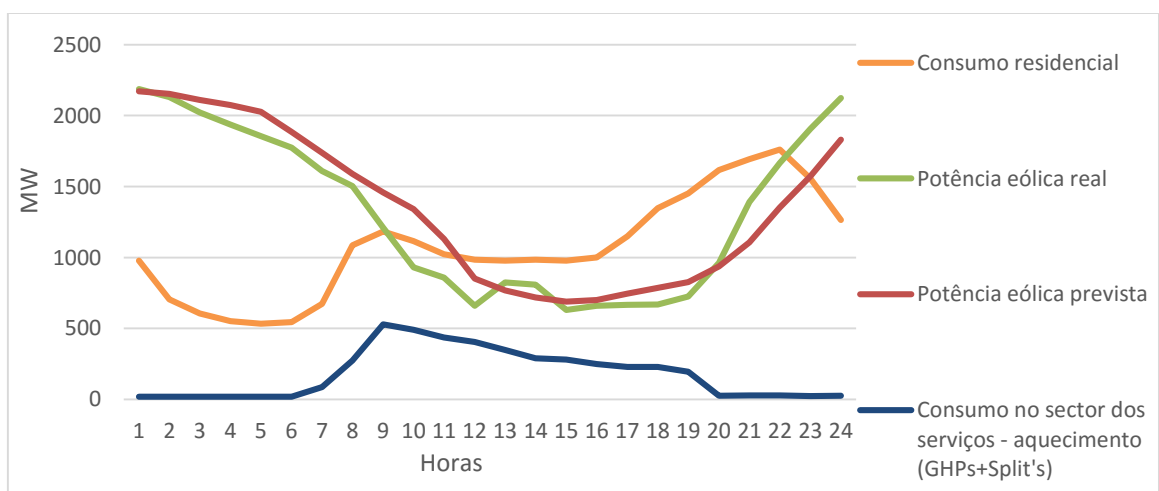


Figura 5.5 Diagrama de geração eólica real e prevista do segundo caso de estudo, consumo residencial típico para um dia útil e consumo do aquecimento no sector dos serviços – dia 3 de janeiro de 2014.

Segundo caso de estudo para variabilidade de geração – 19 de março de 2014

O segundo caso analisado foi o dia 19 de março de 2014 (quarta-feira). Como pode ser observado na figura 5.6, neste dia existe uma diminuição acentuada da geração eólica, bem como um erro máximo de previsão negativo de -375,3 MW e um erro relativo de -41%, pelas 9h45.

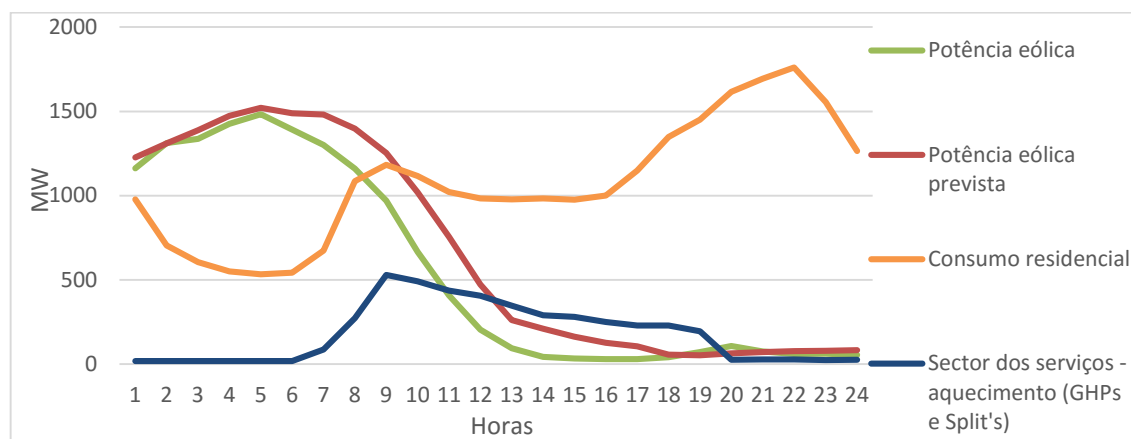


Figura 5.6 Diagrama de geração eólica real e prevista do segundo caso de estudo, consumo residencial típico para um dia útil e consumo da climatização no sector dos serviços– dia 19 de março de 2014.

5.2 – Sector dos serviços –excessos de geração

No capítulo 4.1 foram analisados os consumos dos sistemas de AVAC centralizado, GHPs e Splits. Para diminuir excessos de geração renovável, foram introduzidas medidas de *Demand Response*. Para o caso do sector dos serviços foi feito um pré-aquecimento dos edifícios, às 4h30, antes da sua utilização, de forma a absorver parte do excesso de geração durante a noite e assegurar que durante o seu horário de funcionamento fosse apenas necessário manter a temperatura de forma a garantir o conforto dos utilizadores. No diagrama da figura 5.7, está representado o diagrama do consumo com e sem pré-aquecimento do sector dos serviços, para o qual vão ser analisados os impactos nos diagramas nacionais para os dias em estudo.

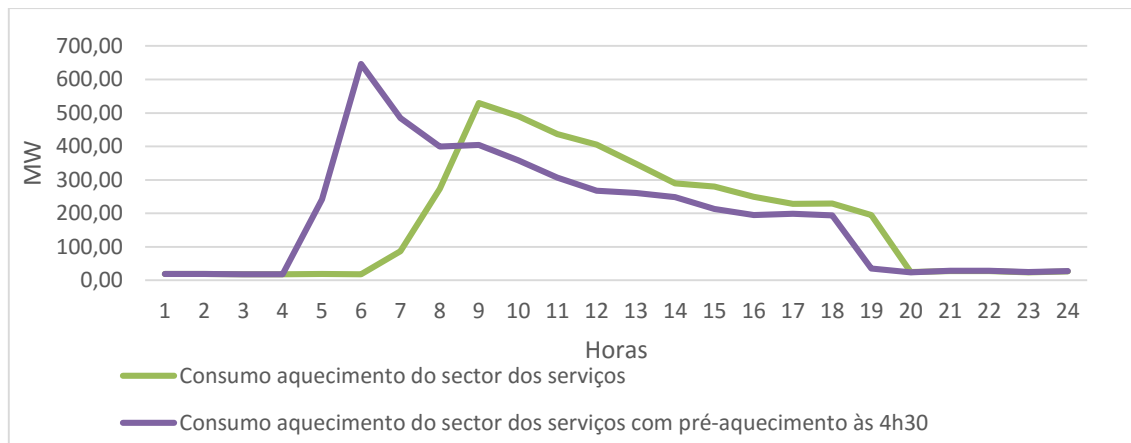


Figura 5.7 Diagrama do consumo com e sem pré-aquecimento do sector dos serviços para equipamentos GHPs e Splits.

5.2.1 - Dia 10 de março de 2014

No diagrama da figura 5.8 pode ser observada a curva da geração renovável, bem como os consumos+bombagem sem e com pré-aquecimento, sendo assim visível o impacto da mudança do horário de todos os sistemas de AVAC centralizado, GHPs e Splits.

Com esta medida de *Demand Response* há um aumento dos consumos entre as 4h e as 7h, que corresponde a 1427,76 MWh. Como neste dia os excessos de geração ocorrem no horário noturno, este aumento vai reduzir esses excessos. O valor do consumo entre as 8h e as 19h vai ser reduzido em 1079,06 MWh, valor que ao ser distribuído ao longo de várias horas não é facilmente observável no diagrama.

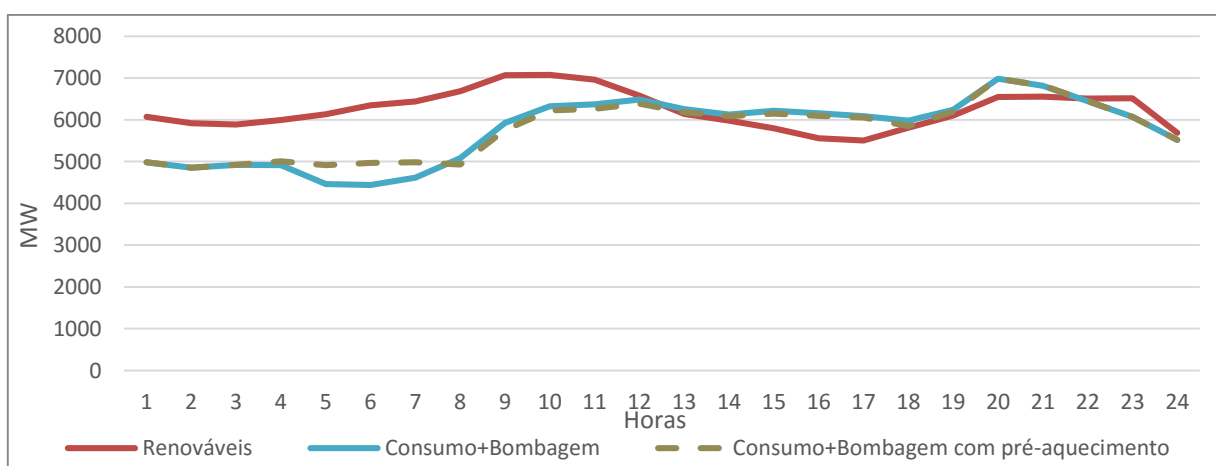


Figura 5.8 Diagrama de geração renovável e consumos+bombagem com e sem pré-aquecimento dos edifícios do sector dos serviços para o dia 10 de março.

5.2.2 – Dia 6 de fevereiro de 2014

No dia 6 de fevereiro, como foi visto no capítulo 5.1, os excessos de geração são uniformes durante todo o dia. Fazendo um pré-aquecimento, alterando o início do aquecimento dos edifícios dos serviços com controlo AVAC centralizado obteve-se o diagrama da figura 5.9.

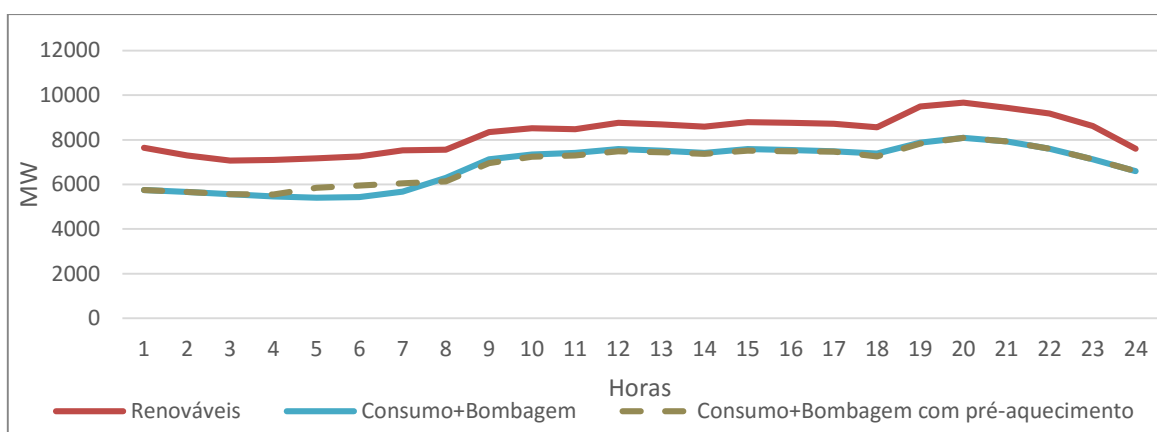


Figura 5.9 Diagrama de geração renovável e consumos+bombagem com e sem pré-aquecimento dos edifícios do sector dos serviços para o dia 6 de fevereiro.

Analisando o diagrama da figura 5.9, verifica-se um aumento do consumo+bombagem entre as 4h30 e as 7h30 (o mesmo valor que no caso anterior - 1427,76 MWh), sendo o excesso de geração reduzido nesse horário. A redução de consumos ao longo do dia não tem um grande impacto no diagrama, no entanto existe entre as 8h e as 19h, a mesma redução do caso anterior (1079,06 MWh).

5.3 – Sector dos serviços –variabilidade de geração eólica

De forma a colmatar a variabilidade de geração eólica, foram implementadas medidas de *Demand Response* para adaptar os consumos de aquecimento no sector dos serviços às variações de geração eólica, bem como ao erro de previsão resultante dessas variações. Os edifícios dos serviços foram pré aquecidos, antes da sua utilização, e os equipamentos de climatização desligados ou parcialmente desligados em períodos em que a redução da geração eólica é mais brusca. Considerou-se que na hora seguinte a que os equipamentos são desligados, há um acréscimo de 25% no consumo, pois quando se volta a ligar o equipamento, como a temperatura está afastada da temperatura ótima, o equipamento vai ter um consumo maior para retomar esse valor da temperatura. As estratégias de controlo adotadas no sector dos serviços, referentes à interrupção do ciclo de funcionamento dos equipamentos de aquecimento encontra-se no Anexo A.

5.3.1 – Dia 19 de março de 2014

Neste dia optou-se por pré aquecer os edifícios, ligando os sistemas de AVAC às 4h30. Como entre as 9h e as 11h ocorre uma variação acentuada da geração eólica, optou-se por desligar 50% das cargas nesse horário, ficando metade desligados das 9h às 10h e os restantes das 10h às 11h. Com este controlo foram obtidos os diagramas da figura 5.10.

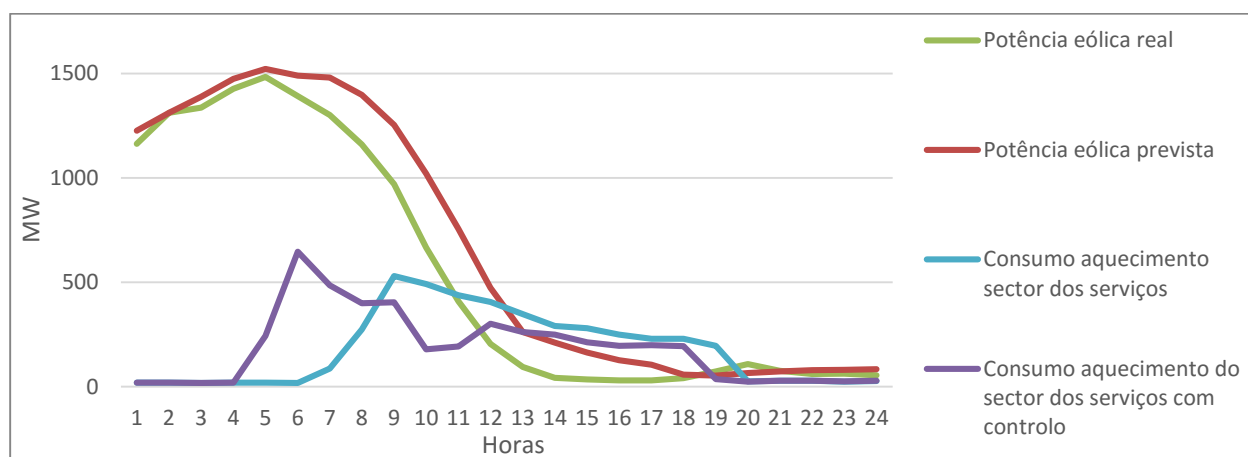


Figura 5.10 Diagrama de geração real e prevista e consumo do aquecimento com e sem controlo dos edifícios do sector dos serviços para o dia 19 de março.

Neste diagrama pode-se verificar uma mudança dos consumos mais elevados para o período entre as 4h30 e as 8h, horário em que a variação não é tão grave, o que permite que quando ocorre essa variação exista um menor consumo no sistema. Para adaptar o sistema à variação de geração e aos erros que dela advêm, os consumos entre as 9h e as 11h foram reduzidos em 50%, sendo essa diminuição notória no diagrama. Para que o edifício possa retomar à temperatura ótima, entre as 11h e as 12h, os equipamentos vão ter um aumento de consumo.

O dia 3 de janeiro, encontra-se analisado no Anexo B.

5.4 – Sector residencial – excessos de geração

Para verificar os impactos das reduções obtidas com medidas de *Demand Response* nos diagramas de geração, foi analisado o impacto das estratégias de controlo, de acordo com o caso de estudo. Para este caso, optou-se pela mudança horária das máquinas de lavar e secar, ou seja, as cargas foram mobilizadas para períodos de elevada geração renovável ou pouca procura. As estratégias de controlo adotadas, estão descritas no Anexo A.

5.4.1 - Dia 10 de março de 2014

Para eliminar os excessos de geração, verificados na figura 5.1, pode ser feito um deslocamento de cargas controláveis do sector doméstico de forma a que essas cargas funcionem dos períodos de maior excesso, como já foi analisado anteriormente.

Pode verificar-se que entre as 14h e as 22h os valores do consumo+bombagem, se aproximam do valor total da geração renovável, pelo que parte das cargas controláveis em operação nesse período podem ser deslocadas. Neste primeiro caso de estudo, optou-se por fazer um deslocamento horário das cargas de lavar e secar, para as horas de menor procura. Com esta alteração de consumos foi obtido o gráfico da figura 5.11.

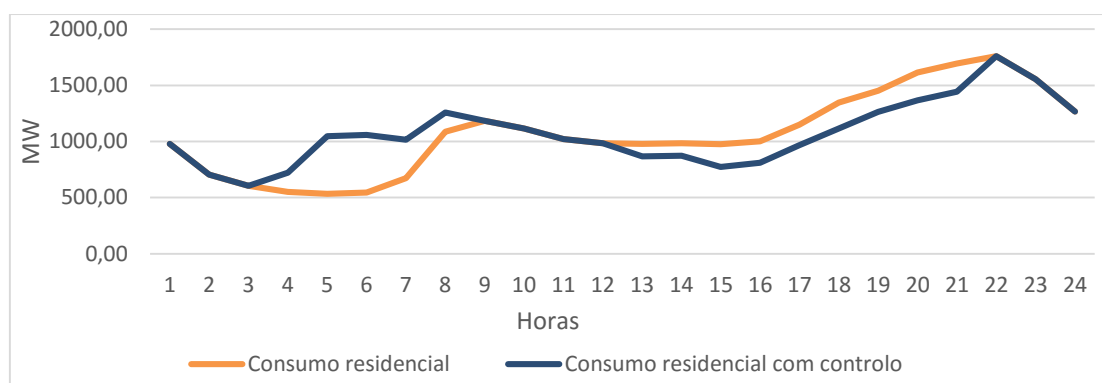


Figura 5.11 Diagrama de consumos sem controlo e com controlo do sector residencial para o primeiro caso de estudo.

Pela observação da figura 5.11, verifica-se que aplicando o controlo anteriormente descrito se obtém uma mudança de consumos de 1714,93 MWh de entre as 13 e as 21h, para o horário entre as 4h e as 8h. Desta forma consegue-se diminuir o consumo na hora em que o excesso de geração não era tão elevado e reduzir o excesso que se verifica nos períodos noturnos. Na figura 5.12, pode ser observado o impacto do controlo realizado no diagrama de carga total.

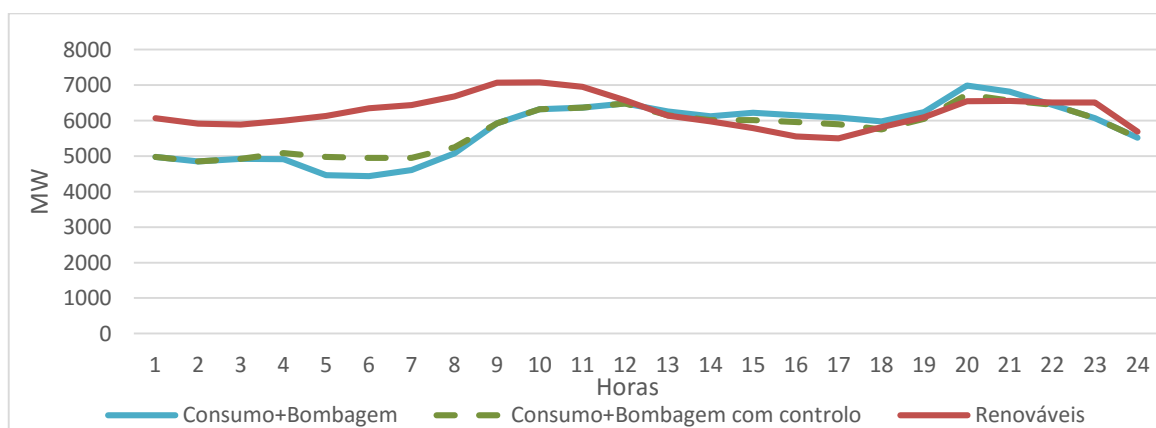


Figura 5.12 Diagrama de carga, com consumos sem controlo e com controlo do consumo total para o primeiro caso de estudo 10 de março de 2014.

Com este tipo de medidas de *Demand Response*, consegue-se alterar os consumos da forma mais conveniente para que se consiga diminuir os excessos de geração.

5.4.2 – Dia 6 de fevereiro de 2014

Para este caso, uma vez que os consumos e geração têm uma variação constante, tentou-se diminuir os consumos nas horas de maior procura, entre as 8h e as 24h, de forma a diminuir alguns picos do diagrama de carga. Para tal, as máquinas de lavar e secar foram reprogramadas para o horário noturno em que a procura é menor. Apenas se mudou de horário 50% das cargas por cada hora, uma vez que mudar mais cargas ia levar a um aumento de excesso no horário de onde a carga era proveniente. Com este controlo, foi obtida a alteração de consumos apresentada na figura 5.13.

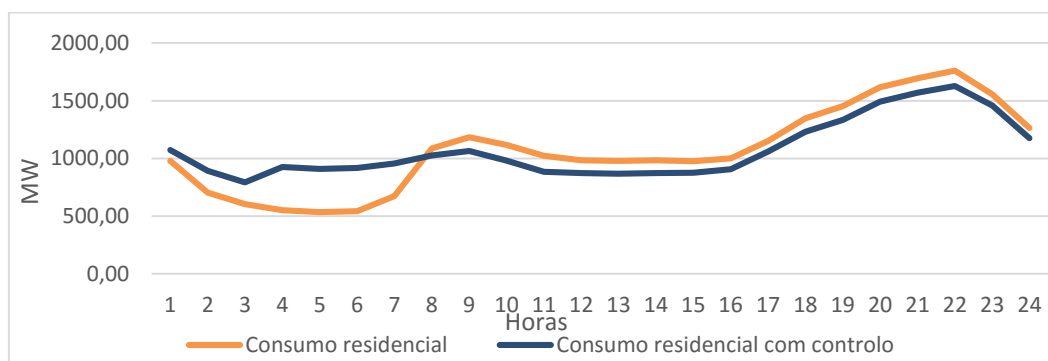


Figura 5.13 Diagrama de consumos sem controlo e com controlo do sector residencial para o segundo caso de estudo.

Analisando o diagrama anterior, conclui-se que com a reprogramação das máquinas de lavar e secar vai existir um aumento de 1873,63 MWh no consumo, no período noturno, entre as 1h e as 8h. Na figura 5.14 pode ser visualizado o impacto do controlo aplicado neste segundo caso de estudo no diagrama de carga do dia 6 de fevereiro.

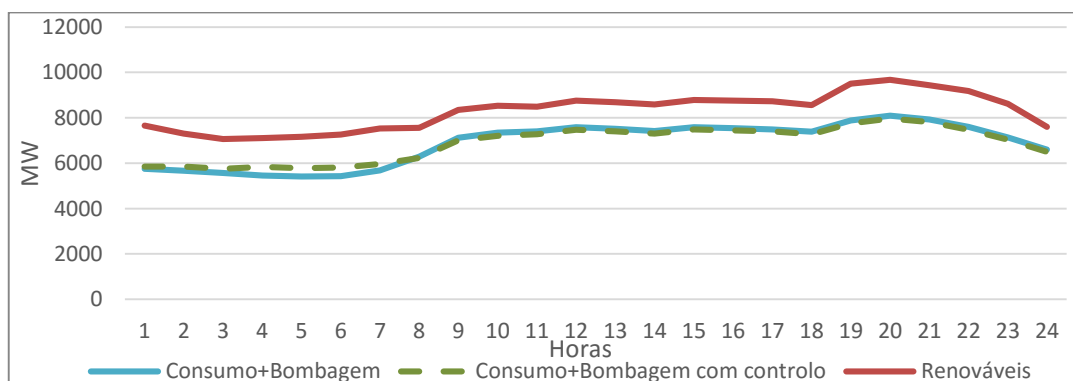


Figura 5.14 Diagrama de carga, com consumos sem controlo e com controlo do consumo total para o segundo caso de estudo 6 de fevereiro de 2014.

Com esta estratégia, consegue-se diminuir o consumo total nos horários em que a maior parte de edifícios de serviços e indústria estão em funcionamento, a reprogramação de cargas provoca também um aumento do consumo no horário de menor procura, que é o horário noturno.

5.4.3 – Dia 22 de março de 2014

Na figura 5.4, verifica-se que neste dia existe um excesso entre as 6h e 12h e entre as 18 e as 20h. Como durante os fins de semana o consumo no sector residencial é mais regular durante o dia, optou-se por fazer uma mudança horária das cargas de lavar e secar das horas de menor geração para as de maior excesso. Com esta estratégia de controlo foi obtido o diagrama de consumos da figura 5.15.

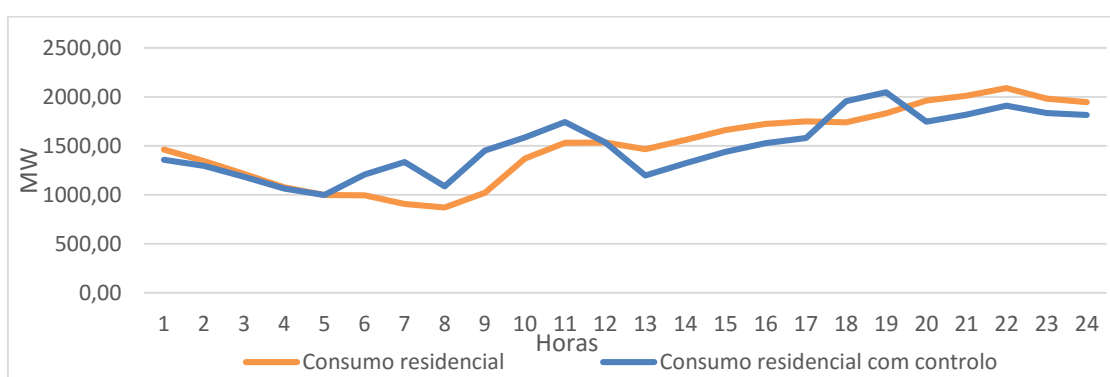


Figura 5.15 Diagrama de carga, com consumos sem controlo e com controlo do consumo total para o segundo caso de estudo 22 de março de 2014.

Com esta estratégia, o excesso de geração renovável entre as 6h e as 19h sofreu uma redução de 1056,94 MWh e entre as 8h e as 20h de 440,74 MWh, devido à mobilização horária das cargas de lavar e secar para estes horários. Com este controlo obteve-se o diagrama de geração e consumo com e sem controlo, representa do na figura 5.16.

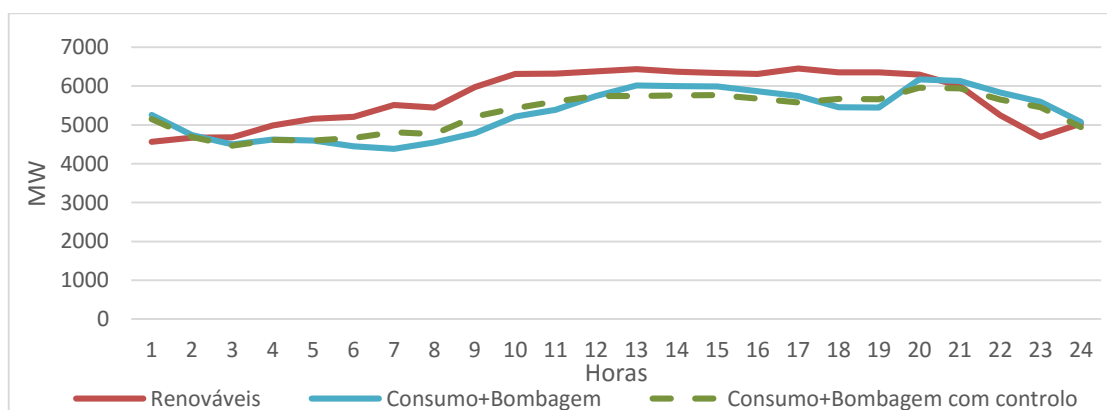


Figura 5.16 Diagrama de carga, com consumos sem controlo e com controlo do consumo total para o segundo caso de estudo 22 de março de 2014.

Com esta estratégia conseguiu-se mudar cargas para horários em que antes existiam excessos de geração, diminuindo assim o consumo em horários de fraca geração renovável.

A análise relativa ao dia 1 de março encontra-se no Anexo A.

5.5 – Sector residencial –variabilidade de geração eólica

Com a introdução da energia eólica no sistema elétrico português, surge o problema de prever a geração e conseguir compensar a variabilidade do vento. Uma das soluções consiste na redução temporária dos consumos da climatização. Reduziu-se então, 50% do consumo das cargas de climatização na primeira hora, tendo estas sido ligadas na segunda hora, e os restantes 50% desligados. Por vezes, e de forma a que se conseguisse um maior impacto estas cargas que já tinham sido desligadas anteriormente, foram novamente desligadas noutros períodos horários. Considerou-se, tal como para o sector dos serviços, que na hora seguinte há um acréscimo de 25% no consumo, pois quando se volta a ligar o equipamento, como a temperatura está afastada da temperatura ótima, o equipamento vai ter um consumo maior para retomar esse valor de temperatura.

5.5.1 – Dia 19 de março de 2014

Neste dia, como é visível na figura 5.5, verifica-se uma grande diminuição da geração (e um erro de previsão elevado) às 8h, horário em que o consumo residencial tende a aumentar. Uma possível solução é diminuir os consumos da climatização entre as 9h e as 24h, desligando as cargas de AVAC, termoacumuladores e frio doméstico, em 50% durante períodos de 1h, de forma a não afetar o conforto dos utilizadores e sabendo que na hora seguinte existirá um aumento do consumo destes equipamentos. Começou-se a diminuição do consumo residencial às 6h, devido ao facto de ser a hora a que a diminuição de geração começa. Os consumos foram controlados de forma a que fossem os mais baixos possíveis no período entre as 9h e as 12h, período em que ocorre uma redução mais rápida da geração, considerando-se que após esse horário o sistema já se adaptou às condições. Com a aplicação deste controlo no consumo residencial foi obtido o diagrama da figura 5.17, onde pode ser visto o consumo com e sem controlo e a geração eólica.

Com as medidas de *Demand Response* aplicadas neste caso de estudo, conseguiu-se uma redução nos consumos entre as 9h e as 12h, de forma mais acentuada, pois é o período que tem maior impacto no diagrama. É também neste período que existe um maior erro de previsão, sendo

necessário adequar os consumos à geração real. Consegue-se deste modo ajustar os consumos no sector residencial às possíveis variações da geração eólica e aos erros de previsão associados a essas variações.

Foi também analisado o dia 3 de janeiro, o qual se encontra no Anexo B.

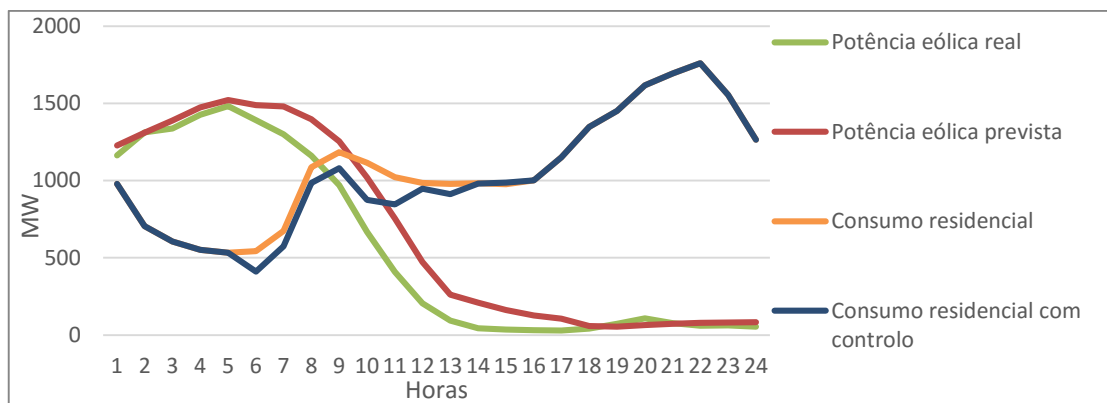


Figura 5.17 Diagrama de geração eólica do segundo caso de estudo e consumo residencial com e sem controlo – dia 19 de março de 2014.

Capítulo 6 – Análise dos impactos dos casos de estudo

No capítulo anterior foram analisados os impactos do controlo de cargas através da implementação de medidas de *Demand Response* nos consumos do sector residencial e nos consumos da climatização no sector dos serviços. No presente capítulo vão ser analisados os impactos globais das medidas aplicadas anteriormente, analisando os diagramas de consumo e geração, quando o controlo é aplicado no consumo residencial e no consumo da climatização dos serviços em simultâneo.

6.1 – Excessos de geração

6.1.1 – Dia 10 de março de 2014

Para analisar os impactos globais das estratégias utilizadas para diminuir os excessos de geração no capítulo anterior, foram somados os consumos do sector residencial e dos serviços e foi obtido o diagrama de consumo com controlo representado na figura 6.1.

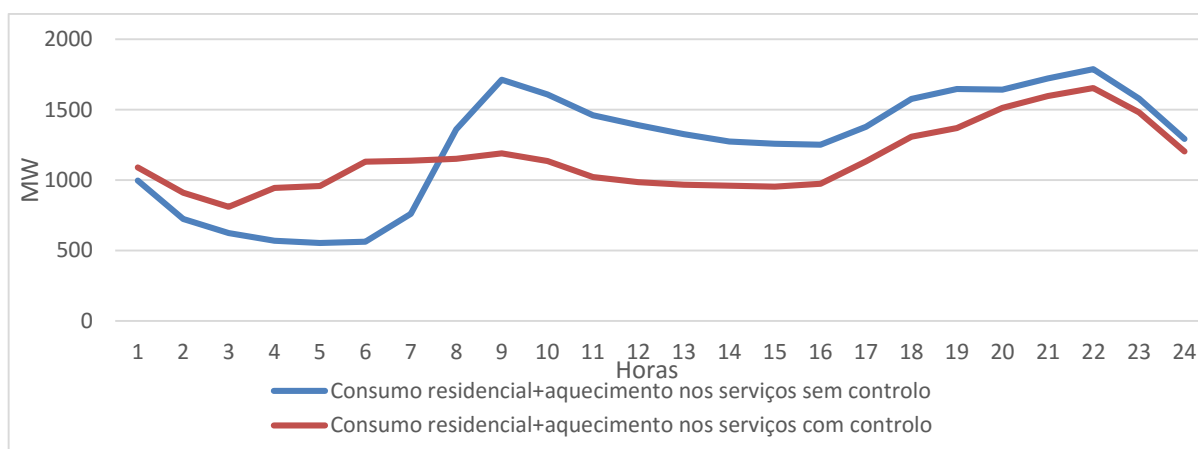


Figura 6.1 Diagrama de consumo do sector residencial+serviços com e sem controlo total e geração renovável para o dia 10 de março de 2014.

Com os consumos obtidos na figura 6.1, foi obtido o diagrama de consumo+bombagem que se encontra na figura 6.2.

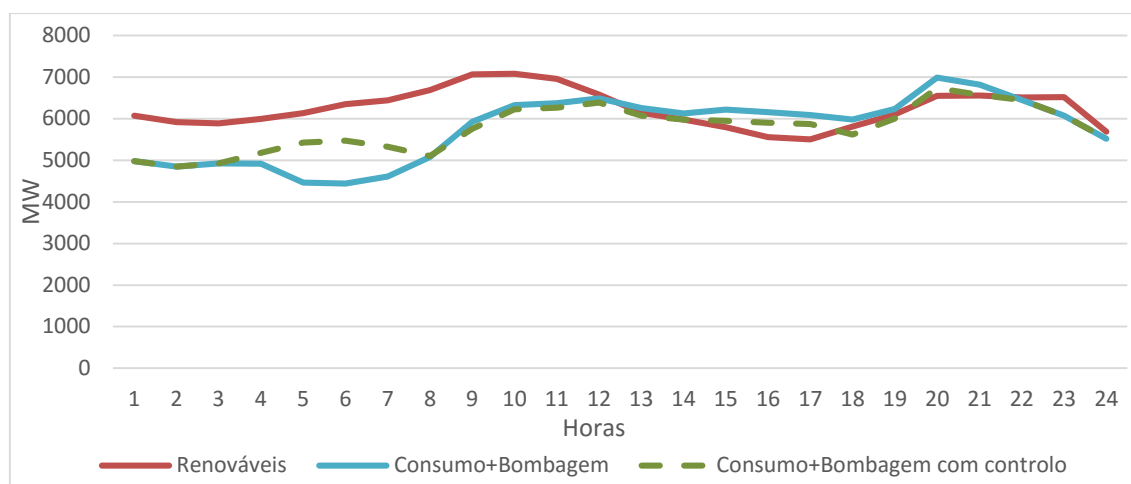


Figura 6.2 Diagrama de consumo+bombagem nacional com e sem controlo total e geração renovável para o dia 10 de março de 2014.

Analisando a figura, verifica-se uma redução do excesso de geração durante a noite, entre as 4h e as 8h, de 2971,38 MWh, sendo a percentagem de diminuição do excesso de 30,90% neste horário. Entre as 13h e as 21h o consumo aumentou 2157,42 MWh, tornando-se o seu valor mais próximo do valor da geração renovável, sendo assim estas fontes capazes de fornecer energia para alimentar todo o sistema durante a maior parte deste dia. Com base nestes resultados pode-se concluir que com o controlo aplicado ao dia 10 de março se obtém uma redução do excesso diário de geração renovável de 2150,07 MWh, o que em percentagem representa 14,87% do excesso existente sem controlo.

Com a aplicação destas medidas consegue-se também uma diminuição nas emissões de CO₂. Para calcular essas emissões foram usados os fatores de emissão da tabela 6.1.

Tabela 6.1 Fatores de emissão de CO₂.

Fonte de energia fóssil	Fator de emissão de CO ₂ (kg(CO ₂)/kWh)
Carvão	0,916
Gás Natural	0,354

Aplicando estes fatores de emissão no horário entre as 13h e as 22h, horário em que o uso de carvão e gás natural é maior obteve-se os dados da tabela 6.2, onde se pode analisar as emissões de CO₂ com e sem o controlo aplicado. Para calcular as reduções de CO₂, reduziu-se primeiro o uso de centrais a gás natural e posteriormente a carvão.

Tabela 6.2 Emissão de CO₂ com e sem controlo para o dia 10 de março entre as 13h e as 22h.

Fonte fóssil	Sem controlo ton(CO ₂)/MWh	Com controlo ton(CO ₂)/MWh
Carvão	9380,3	9380,3
Gás natural	855,5	91,8
Total	10235,8	9472,1

Observando a tabela anterior, calcula-se que se conseguiu reduzir as emissões de CO₂ em 763,73 ton(CO₂)/MWh, o que representa uma redução em percentagem de 7,46% face às emissões existentes antes de aplicada a estratégia de controlo, entre as 13h e as 21h, horário em que se reduziu os consumos.

Com base nos preços de mercado da eletricidade, disponibilizados pelo Mibel, vê-se que para Portugal a média diária foi de 28,59 €/MWh [27]. Nas horas em que existe um maior excesso, os preços atingem os valores mínimos diários, sendo o mais baixo de 8,80 €/MWh [28], atingido às 3h. A partir das 10h os valores são superiores à media diária, pois são postas em funcionamento centrais que usam combustíveis fósseis, atingindo um máximo de 50,54 €/MWh [28], às 20h.

6.1.2 - Dia 6 de fevereiro de 2014

O excesso ao longo do dia 6 de fevereiro de 2014 é constante durante todo o dia. Com a implementação de sistemas de controlo, foi obtido o diagrama da figura 6.3.

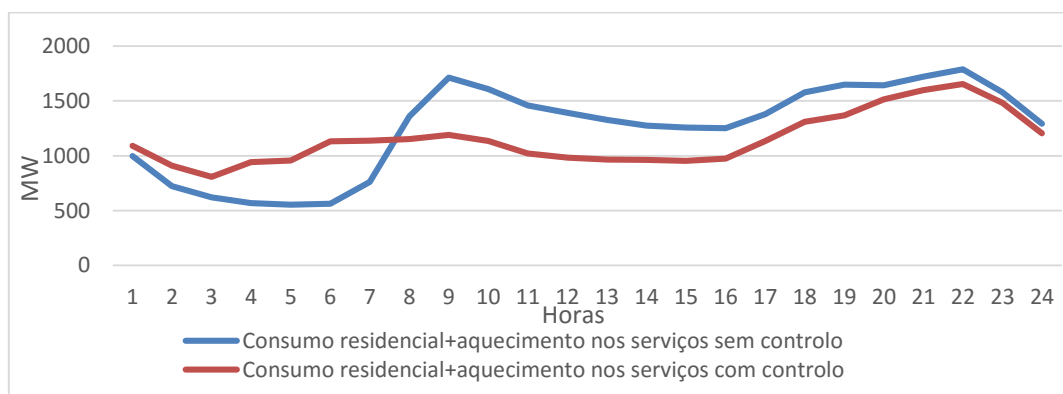


Figura 6.3 Diagrama de consumo do sector residencial+serviços com e sem controlo total e geração renovável para o dia 6 de fevereiro de 2014.

Aplicando o controlo que deu origem ao diagrama de consumos anterior ao diagrama de geração e consumo+bombagem nacional, obteve-se o diagrama da figura 6.4.

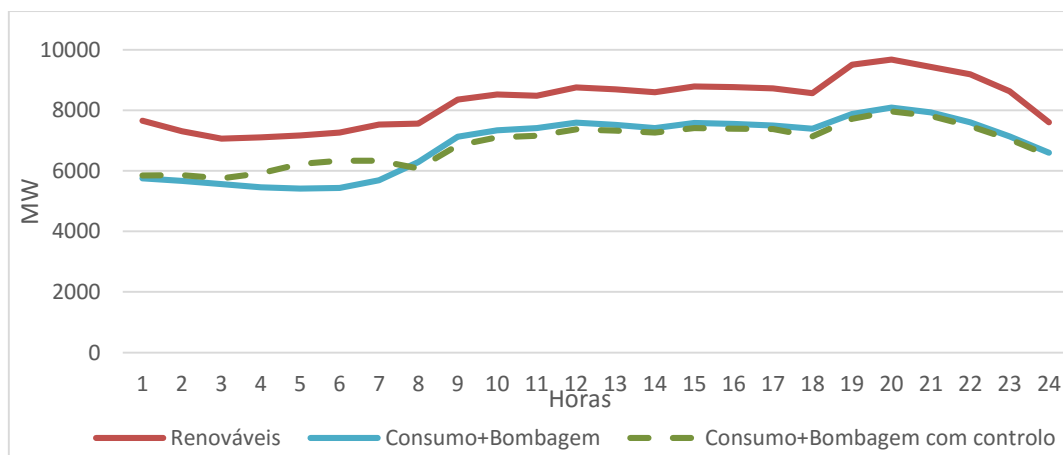


Figura 6.4 Diagrama de consumo com e sem controlo total e geração renovável para o dia 6 de fevereiro de 2014.

Como é observável na figura anterior, com as estratégias aplicadas, tanto nos diagramas do sector dos serviços como nos diagramas do sector residencial, tentou-se que os consumos fossem mais uniformes ao longo do dia, mudando algumas cargas para o período de menor consumo, entre as 1h e as 8h, período para onde foram movidas cargas de lavar e secar no caso do sector residencial, e para onde foi feito o pré-aquecimento no caso do sector dos serviços. Obteve-se assim neste horário uma diminuição do excesso de geração renovável de 2809,72 MWh, o correspondente a 28,57% de redução face ao excesso sem controlo. Assim, consegue-se mover 2737,09 MWh, 2,29%, para o período de menor consumo, diminuindo a procura nas horas de maior consumo, e assim tornando o diagrama mais uniforme.

Com esta estratégia, conseguiu-se uma redução do excesso diário de geração renovável de 353,79 MWh, o que representa uma redução de 1,04% face ao excesso existente antes de aplicado o controlo. Esta redução não é muito significativa devido ao facto dos excessos de geração serem constantes, pelo que diminuir o consumo num determinado horário significaria aumentar o excesso nesse mesmo horário.

Aplicando os fatores de emissão, presentes na tabela 6.1, aos consumos de fontes fósseis (carvão e gás natural) entre as 9h e as 24h, horário em que se diminuiu os consumos, obtém-se os dados da tabela 6.3, onde se pode analisar as emissões de CO₂ com e sem o controlo aplicado.

Tabela 6.3 Emissão de CO₂ com e sem controlo para o dia 6 de fevereiro entre as 9h e as 24h.

Fonte fóssil	Sem controlo ton(CO₂)/MWh	Com controlo ton(CO₂)/MWh
Carvão	2888,2	1152,7
Gás natural	298,2	0
Total	3186,4	1152,7

Observando a tabela anterior, calcula-se que se conseguiu reduzir as emissões de CO₂ em 2033,75 ton(CO₂)/MWh, o que representa uma redução em percentagem de 63,8% face às emissões existentes antes de aplicada a estratégia de controlo. No entanto, as emissões neste dia não eram significativas uma vez que a energia produzida era quase na totalidade proveniente de fontes de energia renováveis.

Fazendo uma análise aos preços de mercado da eletricidade, verifica-se uma média diária de 1,55 €/MWh [27], o que é consequência de ser um dia em que o excesso de geração é contante e em que a geração proveniente de fontes de energia fósseis não é significativa. No horário em que existe um maior excesso o preço é 0 €/MWh [28], entre as 3h e as 19h, sendo para este dia o preço máximo de 10,03 €/MWh [28], registado às 22h.

6.1.3 – Dia 22 de março de 2014

O dia 22 de março de 2014 é um dia de fim de semana e foi analisado no capítulo 5 do ponto de vista de controlo de cargas do sector residencial. Para este dia, como pode ser visto na figura 5.19, conseguiu-se uma redução diária de excesso de geração renovável de 648,43 MWh, ou seja, diminuiu-se o excesso em 5,42%. Nos dias de fim de semana, as reduções não são tão grandes, devido ao facto de só se considerar o consumo residencial. Nestes dias, os excessos tendem a ser distribuídos durante o dia pois o consumo durante os fins de semana é menor que durante os dias úteis.

Para este dia as emissões de CO₂ não são muito significativas, apenas são usadas centrais a carvão, no entanto as reduções obtidas estão representadas na tabela 6.4.

Tabela 6.4 Emissão de CO₂ com e sem controlo para o dia 1 de março entre as 1h e as 4h, entre as 13h e as 18h e entre as 20h e as 24h.

Fonte fóssil	Sem controlo ton(CO ₂)/MWh	Com controlo ton(CO ₂)/MWh
Carvão	2462,8	490,1
Gás natural	0	0
Total	2462,8	490,1

Com a estratégia aplicada reduziu-se as emissões das centrais a carvão em 1972,8 ton(CO₂)/MWh, o que equivale a 80,1%, uma vez que não existem centrais a gás natural em funcionamento.

O preço médio da eletricidade neste dia foi de 12,64 €/kWh [27], tendo-se verificado que os valores mais baixos estão entre as 13h e as 18h, preço mínimo de 3,00 €/kWh [27].

A mesma análise, relativa ao dia 1 de março, encontra-se no Anexo A.

6.1.4 – Total anual

Com os resultados apresentados anteriormente, foi realizada uma extrapolação da redução obtida para o total nacional para os meses de Inverno. Para a realização dessa extrapolação foram usadas as reduções obtidas nos dias 10 de março, 6 de fevereiro e 22 de março.

O dia 10 março foi usado como referência para os dias em que os excessos se centram em horas noturnas e para os dias em que os excessos são constantes ao longo do dia foi usado o dia 6 de fevereiro. Para estimar o impacto anual dos fins de semana e feriados foram usados os dados obtidos para o dia 22 de março.

Para obter a redução anual em emissões de CO₂, procedeu-se de igual forma. Os valores usados na extrapolação encontram-se na tabela 6.5. Com base nestes dados pode-se concluir que uma maior redução do excesso, não está associada a uma maior redução de emissões de CO₂.

Tabela 6.5 Redução do excesso e redução de emissões de CO₂, utilizadas na extrapolação.

Dia	Redução do excesso MWh	Redução de emissões de CO₂ ton(CO₂)/MWh
10 de março	2150	763,7
6 de fevereiro	353	2033,7
22 de março	648	1972,8

A redução anual conseguida com as estratégias de controlo está representada na tabela 6.6 e na tabela 6.7.

Tabela 6.6 Redução do excesso de geração renovável anual divididos em dias úteis e fins de semana.

Dia	Excesso s/ controlo MWh	Excesso c/ controlo MWh	Redução MWh	Redução %
Dias úteis com excessos em horas noturnas	522520,3	397156,1	174150	33,33
Dias úteis com excessos distribuídos	1005508,8	100550,8	1416	1,41
Fins de semana e feriados	381373,9	358761,5	22612,4	5,93

Tabela 6.7 Redução das emissões de CO₂ anuais divididas em dias úteis e fins de semana.

Dia	Emissões s/ controlo ton(CO₂)/MWh	Emissões c/ controlo ton(CO₂)/MWh	Redução ton(CO₂)/MWh	Redução %
Dias úteis com excessos em horas noturnas	2914666,0	2945227,0	90883,5	3,12
Dias úteis com excessos distribuídos	28918,0	20783,1	8135,0	28,13
Fins de semana e feriados	965167,6	850745,4	114422,3	11,86

Analisando os dados presentes nas tabelas anteriores, conclui-se que em dias em que os excessos se centram em horas noturnas, e com a mudança de cargas de lavar e secar para esses horários, conseguiu-se uma diminuição do excesso de geração renovável de 33,33%. No entanto a redução de emissões de CO₂ conseguida foi de apenas 3,12%. Para os dias em que os excessos são constantes durante todo o dia, não se consegue uma diminuição grande, sendo de apenas

1,41%, pois uma mudança horaria de cargas em pouco influencia o excesso. Nestes dias conseguiu-se sim, uma diminuição de emissões de CO₂ de 28,13%. Nos dias de fim de semana conseguiu-se uma redução de excesso de geração de 5,93%, o impacto não é tão grande como para os dias úteis, uma vez que apenas podem ser aplicadas medidas de *Demand Response* aos consumos do sector residencial. Para este caso as reduções de CO₂, foram de 11,86%.

Considerou-se, para a extrapolação, um total de 181 dias, compreendidos entre janeiro e abril, e entre novembro e dezembro de 2014. Destes dias, 58 dias são dias de fim de semana e feriados, no entanto em 21 desses dias não existem excessos de geração renovável. Dos restantes, dias úteis, analisou-se quais os dias em que ocorria um maior excesso de geração e verificou-se se nesses dias os excessos estavam distribuídos pelas 24h, encontrou-se 4 dias em que tal acontecia, dos 119 dias úteis sobranes, em 38 não existe qualquer excesso. A estes dias, foram aplicadas as reduções obtidas anteriormente. Após a aplicação da redução, foram somados os valores obtidos para cada situação (dias úteis e fins de semana) e foram calculados os impactos totais anuais, os quais são apresentados nas tabelas 6.8 e 6.9.

Tabela 6.8 Redução do excesso de geração renovável – Total Anual.

Excesso s/ controlo MWh	Excesso c/ controlo MWh	Redução MWh	Redução %
1004445	855052,3	149392,7	14,87

Tabela 6.9 Redução de emissões de CO₂ – Total Anual.

Emissões s/ controlo ton(CO₂)/MWh	Emissões c/ controlo ton(CO₂)/MWh	Redução ton(CO₂)/MWh	Redução %
4014375,5	3816755,4	197620,1	4,92

Com a aplicação das medidas de *Demand Response* conseguiu-se diminuir os excessos anuais bem como as emissões de CO₂, o que permite aumentar a fiabilidade do sistema de energia e tirar maior partido das fontes de energia renováveis em larga escala.

6.2 – Variabilidade de geração

6.2.1 – Dia 19 de março de 2014

No dia 19 de março, optou-se por adaptar os diagramas do aquecimento do sector dos serviços e do sector residencial à geração no horário entre as 9h e as 12h, horário em que se dá a diminuição mais brusca da geração eólica e onde o erro de previsão é maior, no entanto a redução de consumos

foi realizada a partir das 6h, hora a partir da qual a geração eólica começa a diminuir. O diagrama de geração real e prevista, bem como a geração eólica obtida com a aplicação das estratégias de controlo, encontram-se representados na figura 6.5.

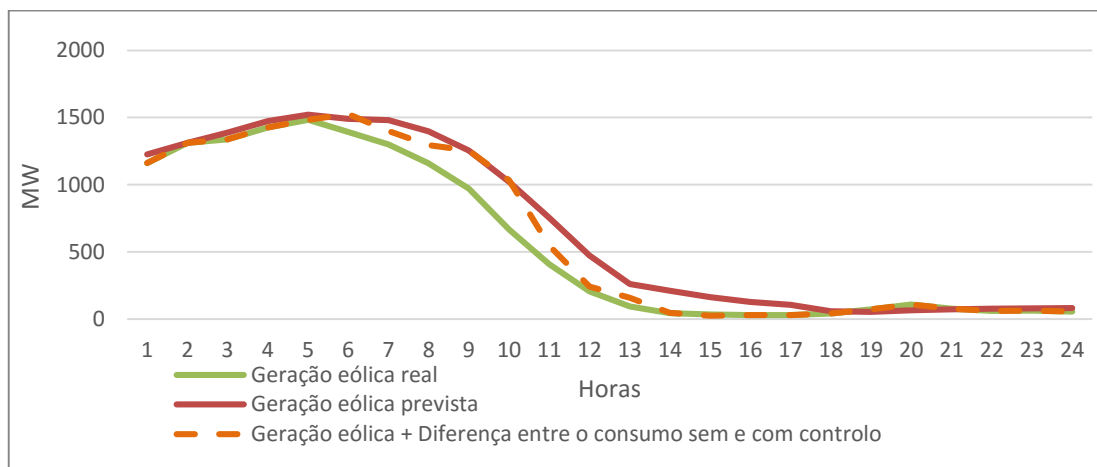


Figura 6.5 Diagrama de geração eólica real e prevista e geração eólica + diferença entre o consumo sem e com controlo, para o dia 19 de março de 2014.

Observando o diagrama, conclui-se que com as estratégias de *Demand Response* aplicadas no capítulo 5 foi obtido um aumento virtual da geração eólica, a partir das 6h, horário a partir do qual a geração eólica começa a diminuir. Entre as 9h e as 12h, como já foi referido, tentou-se adaptar o consumo à geração, tendo-se obtido um aumento virtual da geração, de forma a que o sistema se consiga adaptar à rápida diminuição da geração. Como o sistema a partir das 12h já se adaptou à fraca geração eólica, a redução posterior de consumos não é importante. Os dados referentes às horas onde foram aplicadas estratégias de controlo podem ser observados na tabela 6.10, na qual o valor da variação compensada em MWh e em percentagem foram calculados de acordo com as equações 6.1 e 6.2.

$$VC(h) = |GSC(h) - GCC(h)| \quad (6.1)$$

Onde,

VC – Variação compensada GSC – Geração sem controlo GCC - Geração com controlo h – hora

$$VC(h)(\%) = \frac{VC(h)}{GSC(h)} \times 100 \quad (6.2)$$

Onde,

VC – Variação compensada GSC – Geração sem controlo h – hora

Tabela 6.10 Compensação obtida com a estratégia de controlo aplicada para o dia 19 de março.

Horas	Variação compensada		Erro absoluto sem controlo		Erro relativo com controlo	
	MWh	%	MWh	%	MWh	%
9	284,44	29,33	-283,75	-22,63	0,69	0,00
10	366,94	55,05	-353,58	-34,66	13,37	1,31
11	137,27	33,59	-346,23	-45,86	-208,00	-27,67
12	36,07	17,61	-267,45	-56,63	-231,38	-49,00

Analisando a tabela anterior, pode afirmar-se que com a estratégia de *Demand Response* aplicada, se conseguiu compensar 29,33% da variação na primeira hora, sendo o erro reduzido a 0%, uma vez que o valor da geração com controlo iguala ao valor da previsão. Na segunda hora compensou-se 55,05% da geração e o valor do erro relativo de previsão 13,33% do erro, positivo, uma vez que passa a ter um valor de geração superior ao da previsão. Na terceira e quarta hora, os valores da compensação diminuem, no entanto, o sistema já teve tempo para se adaptar à diminuição da geração. No total consegue-se compensar 824,72 MWh, entre as 9h e as 12h, representando 36,65%, valor calculado através da equação 6.3. Com esta compensação da variação consegue-se que o sistema se adapte à fraca geração eólica, servindo-se de outras fontes energéticas. Neste dia, e para este período horário, conseguiu-se também, uma diminuição do erro de 66%, face ao erro que existia antes de ser aplicado o controlo, valor obtido através da aplicação da equação 6.4.

$$VC(\%) = \frac{|\sum_{h=9}^{12} GSC - \sum_{h=9}^{12} GCC|}{\sum_{h=9}^{12} GSC} \times 100 \quad (6.3)$$

Onde,

VC – Variação compensada GSC – Geração sem controlo GCC - Geração com controlo h – hora

$$EC(\%) = \frac{|\sum_{h=9}^{12} ERSC - \sum_{h=9}^{12} ERCC|}{\sum_{h=9}^{12} ERSC} \times 100 \quad (6.4)$$

Onde,

EC – Erro relativo compensado ERSC – Erro relativo sem controlo ERCC - Erro relativo h – hora

O dia 3 de janeiro, também analisado, encontra-se no Anexo B.

Capítulo 7 – Conclusões e trabalho futuro

7.1 – Conclusões

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar a potencial redução do impacto da variabilidade da geração eólica e dos excessos de geração, implementando para tal, estratégias de controlo com recurso a medidas de *Demand Response* nos sectores residencial e dos serviços.

O mundo tem uma necessidade crescente de energia. Com esta crescente necessidade, e com os problemas que advêm do uso de fontes fósseis na geração de energia, como o aquecimento global, é necessário a introdução de fontes não poluentes, renováveis. Contudo, com o uso das ditas fontes de energia renovável, surgem problemas relacionados com o facto de estas não serem fontes de geração constante e controlável. Estas dependem de condições meteorológicas, por vezes de difícil previsão, levando a erros de previsão elevados e pondo assim em causa a fiabilidade e qualidade do sistema de energia. Assim, em certos momentos pode-se ter uma geração superior ao consumo, existindo excessos de energia, e noutras horas uma geração reduzida.

Uma das fontes de energia mais usadas no sistema elétrico português, é a energia eólica. Para resolver a problemática da sua variabilidade e de forma a colmatar os erros de previsão que lhes estão associados são utilizadas varias técnicas. Desde a utilização de centrais de reserva, para os períodos em que existe uma geração inferior à procura, à retirada de serviço de geradores eólicos em horas de geração elevada (*curtailment*). Outra das soluções é planear o sistema de forma a que haja uma complementaridade entre fontes renováveis, por exemplo entre a eólica a solar. O armazenamento de energia nas horas de elevada geração para uso nas horas em que existe um défice também é uma solução já testada. Outras soluções são o uso de medidas de *Demand-Side Management* e de *Demand Response*, sendo as medidas de *Demand Response* as utilizadas na presente dissertação.

Neste trabalho, começou-se por analisar os excessos de geração renovável na rede elétrica portuguesa, durante os meses de Inverno, sendo no mês de fevereiro que se verifica um excesso diário maior, de 15529,1 MWh/dia. Analisaram-se também dias em que a variabilidade de geração foi elevada. Nestes dias ocorreram reduções rápidas da geração eólica, atingindo máximos de 120 MW/hora. Com esta variabilidade surgem, como já foi dito anteriormente, erros de previsão, sendo o erro médio absoluto obtido de 105,14 MW (geração superior à procura) e de -106,47 MW (procura superior à geração).

Analisando os consumos dos diferentes sectores de atividade em Portugal, conclui-se que 26% do consumo pertence ao sector residencial e 34% ao sector dos serviços. Através da análise dos consumos do sector dos serviços concluiu-se que 18,5% pertence a equipamentos de aquecimento. Admitindo que em Portugal, 50% dos equipamentos de aquecimento nesse sector têm controlo centralizado, admitiu-se que 25% tem um diagrama de consumo como os equipamentos GHPs e os restantes 25% como os Split. Com os diagramas de carga de instalações típicas destes equipamentos foi feita uma extrapolação a nível nacional e os consumos somados de forma a obter um diagrama que representasse 50% do consumo nacional de energia com aquecimento neste sector.

Com este diagrama, para os dias úteis em que existem excessos de geração nas horas noturnas, foi testado o impacto no diagrama de cargas de um pré-aquecimento dos edifícios iniciado às 4h30, obtendo-se uma redução do excesso total de geração de 1427,76 MWh, entre as 4h e as 7h, horário para se alterou o aquecimento dos edifícios. No que toca a variabilidade da geração eólica, nas horas em que ocorre um decréscimo acentuado, desligou-se o aquecimento durante 1h ou 50% durante 2h, de forma a dar tempo para o sistema se adaptar.

No sector residencial foram tidos em conta os dados do estudo REMODECE, que estimou os diagramas de carga do setor residencial, separando as cargas em controláveis, não controláveis e reprogramáveis. Através da mudança horária de cargas de lavar e secar, que representam 17% do consumo residencial, de horários em que a procura é elevada e a geração baixa para as horas em que existe excessos de geração, estudou-se o impacto que essa mudança tem no diagrama de cargas para os dias com maior excesso de geração. Para fazer face à variabilidade de geração, desligaram-se as cargas de AVAC, frio doméstico e termoacumuladores durante certos períodos de tempo, de forma a que o sistema se ajustasse à variação existente e ao erro associado.

Calculando os impactos globais que tais estratégias de controlo têm nos diagramas de cargas, obteve-se para o dia 10 de março, dia em que os excessos de geração estavam centrados no período noturno, uma redução do excesso de geração diário de 14,87%. Neste caso conseguiu-se reduzir em 7,46% as emissões de CO₂, pois não serão necessárias tantas centrais de energia fóssil em funcionamento no horário em que foram reduzidas as cargas. Como o dia 6 de fevereiro é um dia em que os consumos estão distribuídos ao longo do dia, não se conseguiu uma redução do excesso significativa, apenas se consegue suavizar o diagrama tornando-o mais uniforme, sendo a redução de excesso de 1,04%, e nas emissões de CO₂ de 63,8%. Para se ter um exemplo de um dia de fim de semana usou-se os dias 1 e 22 de março. Como o dia 1 era um dia com excesso durante o dia todo, optou-se por no impacto global usar o dia 22 de março para o qual se obteve uma redução de 5,42%, um valor não muito elevado uma vez que nos fins de semana só se consegue aplicar medidas de *Demand Response* no sector residencial, sendo a redução de emissões de CO₂ de

80,1%. Contudo, neste dia as emissões não eram elevadas, daí se obter uma redução grande em percentagem.

Usando os dias anteriores foi feita uma extrapolação para o total anual, obtendo-se uma redução de excesso anual nos meses de Inverno de 14,87%. Este é um valor considerável, pois nem todos os dias têm excessos de geração e nos dias em que o excesso é uniforme não é possível atingir uma redução significativa. As emissões de CO₂ são reduzidas em 4,92%, explicado pelo facto de nos dias em que existem excessos não existir um número significativo de centrais fósseis em funcionamento.

Para a variabilidade de geração eólica, foram reduzidos os valores do consumo da climatização nas horas em que a variação de geração eólica se verificou mais acentuada. No dia 3 de janeiro, em que a variabilidade é mais suave consegue-se uma compensação de 23,42% da variabilidade e 98,09% do erro, porque o valor da geração eólica com controlo nas horas consideradas é muito próximo do valor da previsão de geração. No dia 19 de março, em que a variação é mais brusca, compensou-se a variação em 36,65% e o erro em 66%.

7.2 – Trabalho futuro

O estudo realizado nesta dissertação pode ser melhorado, podendo ser alargado a um maior número de dias ou até a vários anos, pode também ser estudada a implementação de medidas de *Demand Response* a outros sectores de atividade, como a indústria. Podendo neste estudo ser consideradas as restrições associadas às preferências dos utilizadores no impacto das medidas de *Demand Response*, como por exemplo evitar o funcionamento das máquinas de lavar a meio da noite. O estudo que foi realizado para as cargas referentes ao aquecimento no sector dos serviços, pode também ser alargado a outras cargas, como por exemplo os restantes 50% de equipamentos de aquecimento que não estão incluídos neste estudo. Também se pode usar modelos fisicamente baseados para caracterizar as diferentes cargas e o impacto das ações de *Demand Response*.

Outra análise a ser feita é a implementação de medidas de *Demand Response* em conjunto com soluções de armazenamento de energia.

Bibliografia

- [1] E. Rahimi, A. Rabiee, J. Aghaei e K. Muttaqi, “On the management of wind power intermittency,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 28, pp. 643-653, 2013.
- [2] F. Guitiérrez-Martín, P. Montoro-Pintado e D. S.-Á. R, “Effect of wind power intermittency on reduction of CO2 emissions: The case of the Spanish power system,” *Energy*, vol. 61, pp. 108-117, 2013.
- [3] REN, “Energia Eólica em Portugal,” 2014.
- [4] P. S. Moura, G. L. López, J. I. Moreno e A. T. de Almeida, “Monitoring and Control Platform for Energy Efficiency in Smart Buildings,” em *ECEEE 2013 SUMMER STUDY*, Belambra Les Criques, Toulon/Hyères, France, 2013.
- [5] B. Sovacool, “The intermittency of, wind, solar, and renewable electricity generators: Technical barrier or rhetorical excuse?,” *Utilities Policy*, vol. 17, pp. 288-296, 2009.
- [6] P. S. Moura e A. T. de Almeida, “Large Scale Integration of Wind Power,” em *Handbook of Power Systems I*, Berlim, Springer-Verlag, 2010, pp. 99-119.
- [7] H. Holttinen, “Impact of Hourly Wind Power Variations on the System Operation in the Nordic Countries,” *Wind Energy*, vol. 8, pp. 173-195, 2005.
- [8] A. Inda, G. Villa e E. Meraz, “Operational Impact Evaluation of Wind Generation Integration in the Mexican System,” em *2011 IEEE Trondheim PowerTech*, Trondheim, Noruega, 2011.
- [9] M. Albadi e E. El-Saadany, “Overview of wind power intermittency impacts on power systems,” *Electric Power Systems Research*, vol. 80, pp. 627-632, 2010.
- [10] Foley, Aoife, P. Leahy, A. Marvuglia e E. McKeogh, “Current methods and advances in forecasting of wind power generation,” *Renewable Energy*, vol. 37, pp. 1-8, 2012.
- [11] F. Noah, “Predicting Sudden Changes in Wind Power Generation,” *North American Wind Power*, 2008.
- [12] E. S. Karapidakis e A. G. Tsikalakis, “Network Stability Under High Wind Power Penetration,” *Handbook of Wind Power Systems*, pp. 333-355, 2013.
- [13] A. D. Carvalho, P. Moura, G. C. Vaz e A. T. de Almeida, “Ground source heat pumps as high efficient solutions for buildings space conditioning and for integration in smart grids,” *Energy Conversion and Management*, pp. 991-1007, 2015.

- [14] S. Martín-Martínez, E. Gómez-Lázaro, A. Molina-García e A. Honrubia-Escribano, “Impact of wind power curtailments on the Spanish Power System operation,” em *PES General Meeting / Conference & Exposition, 2014 IEEE*, National Harbor, 2014.
- [15] P. Georgilakis, “Technical challenges associated with the integration of wind power into power systems,” *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, pp. 852-863, 2008.
- [16] Á. Fleury, F. Arteiro, D. Brasil, P. Gomes e A. Franceschi, “Integration of wind power plants into the electric system - The Brazilian experience,” em *Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA), 2012 Sixth IEEE/PES*, Montevideo, 2012.
- [17] E. L. v. Emmerik, J. M. Steinberger e M. Aredes, “Um estudo para resolver a variabilidade da geração eólica através da integração em larga escala com geração hidráulica,” *Revista Brasileira de Energia*, vol. 17, pp. 83-89, 2011.
- [18] B. Hartmann e A. Dán, “Methodologies for Storage Size Determination for the Integration of Wind Power,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, pp. 182-189, 2014.
- [19] T. Ayodele e A. Ogunjuyigbe, “Mitigation of wind power intermittency: Storage technology approach,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44, pp. 447-456, 2015.
- [20] M. Gibescu, W. L. Kling e B. C. Ummels, “Case of Study for the Integration of 12 GW Wind Power in the Dutch Power System by 2020,” 2009.
- [21] P. S. Moura e A. T. de Almeida, “The role of demand-side management in the grid integration of wind power,” *Applied Energy*, pp. 2581-2588, 2010.
- [22] P. S. Moura, G. L. López, J. I. Moreno e A. T. de Almeida, “Impact of Residential Demand Response on the Integration Intermittent Renewable Generation into the Smart Grid,” em *7th International Conference on Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting*, Coimbra, Portugal, 2013.
- [23] G. Papaefthymiou, B. Hasche e C. Nabe, “Potencial of Heat Pumps for Demand Side Management and Wind Power Integration in German Electricity Market,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 3, 2012.
- [24] Direcção-Geral de Energia e Geologia- Energia em Portugal 2014, março 2016.
- [25] I. N. d. Estatística e D. G. d. E. e. Geologia, “Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010,” 2001.
- [26] F. Couto, “Demand Response Residencial para a Integração de Renováveis Intermitentes, Tese de Mestrado,” Universidade de Coimbra, 2012.
- [27] “Mibel - Documentos: <http://www.mibel.com/index.php?lang=pt>”.

- [28] “REN - Sistema de Informação de Mercados de Energia:
<http://www.mercado.ren.pt/PT/Electr/InfoMercado/InfOp/MercOmel/Paginas/Precos.aspx>”.
- [29] J. Sousa, S. Silva e M. Almeida, “Enquadramento Energético do Sector Residencial Português,” em *Seminário Reabilitação Energética de Edifícios*, Universidade do Minho, 2012.
- [30] “REN - Centro de Informação:
<http://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT/Paginas/CIHomePage.aspx>”.

Anexos

Anexo A – Casos de estudo: Sector residencial – excessos de geração

Dia 10 de março de 2014

Tabela A.1 Controlo aplicado no primeiro caso de estudo no sector residencial.

Horas	Frio Doméstico	Termoacumulador	AVAC	Lavar e Secar	
				OFF	ON
1	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
3	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
4	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	10,0%
5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	30,0%
6	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	30,0%
7	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	20,0%
8	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	10,0%
9	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
10	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
11	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
12	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
13	0,0%	0,0%	0,0%	50,0%	0,0%
14	0,0%	0,0%	0,0%	50,0%	0,0%
15	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%
16	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%
17	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%
18	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%
19	0,0%	0,0%	0,0%	80,0%	0,0%
20	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%
21	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%
22	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
23	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
24	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Dia 6 de fevereiro de 2014

Tabela A.2 Controlo aplicado no segundo caso de estudo no sector residencial.

Horas	Lavar e Secar				
	Frio Doméstico	Termoacumulador	AVAC	OFF	ON
1	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	5,0%
2	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	10,0%
3	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	10,0%
4	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	20,0%
5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	20,0%
6	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	20,0%
7	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	15,0%
8	0,0%	0,0%	0,0%	50,0%	0,0%
9	0,0%	0,0%	0,0%	50,0%	0,0%
10	0,0%	0,0%	0,0%	50,0%	0,0%
11	0,0%	0,0%	0,0%	50,0%	0,0%
12	0,0%	0,0%	0,0%	50,0%	0,0%
13	0,0%	0,0%	0,0%	50,0%	0,0%
14	0,0%	0,0%	0,0%	50,0%	0,0%
15	0,0%	0,0%	0,0%	50,0%	0,0%
16	0,0%	0,0%	0,0%	50,0%	0,0%
17	0,0%	0,0%	0,0%	50,0%	0,0%
18	0,0%	0,0%	0,0%	50,0%	0,0%
19	0,0%	0,0%	0,0%	50,0%	0,0%
20	0,0%	0,0%	0,0%	50,0%	0,0%
21	0,0%	0,0%	0,0%	50,0%	0,0%
22	0,0%	0,0%	0,0%	50,0%	0,0%
23	0,0%	0,0%	0,0%	50,0%	0,0%
24	0,0%	0,0%	0,0%	50,0%	0,0%

Dia 1 de março de 2014

Tabela A.3 Controlo aplicado no terceiro caso de estudo no sector residencial.

Horas	Lavar e Secar				
	Frio Doméstico	Termoacumulador	AVAC	OFF	ON
1	50,0%	50,0%	50,0%	0,0%	0,0%
2	37,5%	37,5%	37,5%	0,0%	0,0%
3	37,5%	37,5%	37,5%	0,0%	0,0%
4	37,5%	37,5%	37,5%	0,0%	0,0%
5	37,5%	37,5%	37,5%	0,0%	0,0%
6	-12,5%	-12,5%	-12,5%	0,0%	0,0%
7	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
8	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
9	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
10	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
11	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
12	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
13	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
14	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
15	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
16	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
17	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
18	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
19	0,0%	0,0%	0,0%	75,0%	0,0%
20	0,0%	0,0%	50,0%	80,0%	0,0%
21	0,0%	0,0%	37,5%	75,0%	0,0%
22	0,0%	0,0%	-12,5%	0,0%	30,0%
23	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	40,0%
24	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	30,0%

Na figura 5.3 verificou-se que o consumo total e a geração renovável são muito próximos no período entre a 1h e as 5h, existindo no resto do dia um excesso de geração. De forma a obter um diagrama de geração mais uniforme, pode desligar-se parte das cargas de climatização no período entre as 1h e as 5h. Neste período o consumo das cargas de lavar e secar não são relevantes. Para diminuir a ponta do gráfico podem ser desligadas parte das cargas de climatização, bem como uma parte das cargas de lavar e secar, sendo essas reprogramadas para o período entre as 22h e as 24h. Com esta estratégia de controlo, foi obtido o diagrama de consumos da figura A.1, onde se pode verificar o impacto deste controlo a nível de consumo residencial.

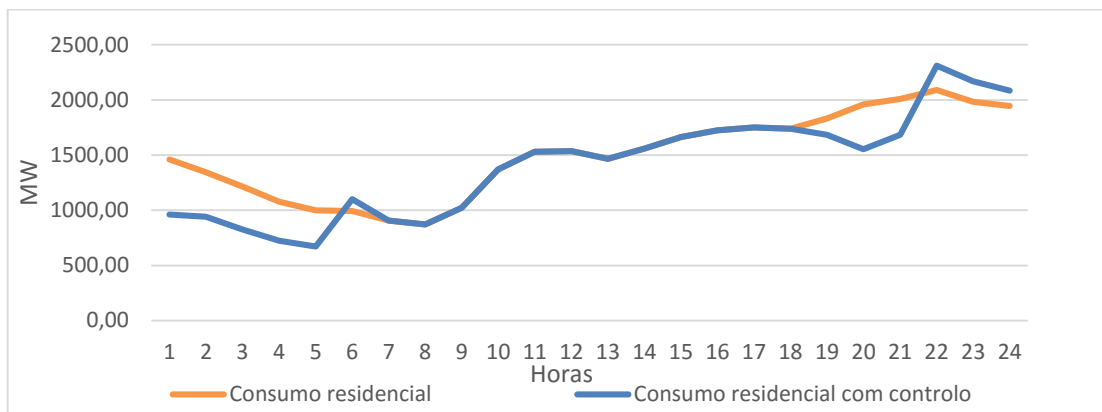


Figura A.1 Diagrama de consumos sem controlo e com controlo do sector residencial para o terceiro caso de estudo.

Para a diminuição pretendida no consumo total, o consumo residencial foi diminuído em 1972,86 MWh entre a 1h e as 5h e 882,56 MWh entre as 19h e as 21h. No período entre as 22h e as 24h, horário para onde foram mudadas as cargas de lavar e secar, obteve-se um aumento de 546,57 MWh. Na figura A.2 pode ser observado o impacto do controlo de cargas no diagrama de carga total.

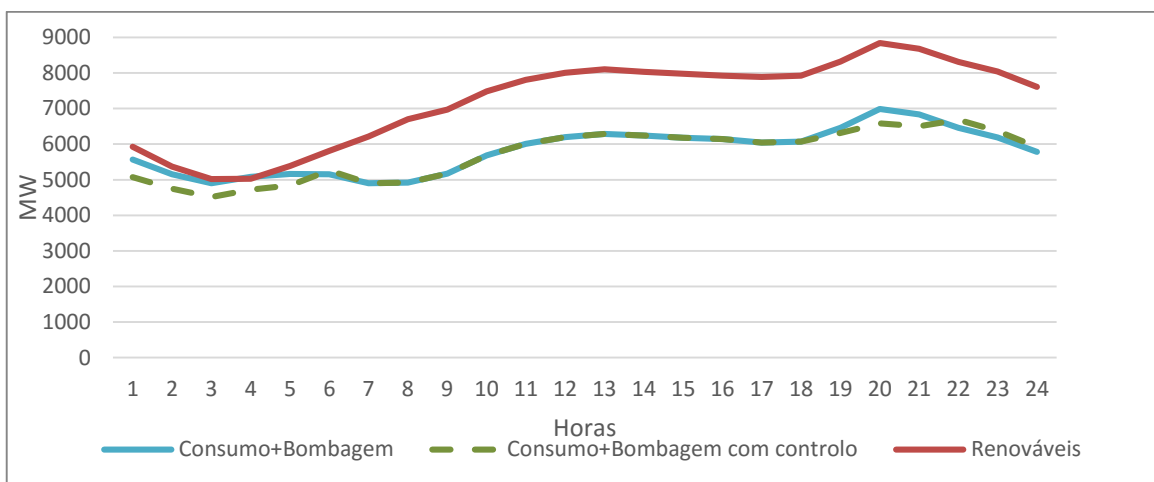


Figura A.2 Diagrama de carga, com consumos sem controlo e com controlo do consumo total para o segundo caso de estudo
1 de março de 2014.

Com a estratégia adotada consegue-se diminuir os consumos no horário em que o excesso de geração renovável é quase nulo, e diminuir a ponta do diagrama, tendo assim os consumos ficado mais uniformes durante o dia.

Análise do impacto do caso de estudo:

O dia 1 de março de 2014 é um dia de fim de semana, pelo que a maioria dos edifícios dos serviços considerados não se encontram em funcionamento, tendo-se optado por apenas analisar este dia apenas do ponto de vista do controlo das cargas do sector residencial, no subcapítulo 5.4.3.

A nível diário o excesso não foi reduzido, como pode ser visto na figura 5.17, uma vez que o excesso era constante ao longo do dia. O objetivo foi então obter um diagrama de consumo mais uniforme ao longo do dia, tendo sido obtida uma redução negativa do excesso de geração renovável de -2146,77,1 MWh, ou seja, -6,34%. Conclui-se que para casos em que o excesso não pode ser colmatado apenas com a mudança horária das cargas de lavar e secar e em que há um excesso de geração durante todo o dia, não se consegue obter uma redução do mesmo.

Neste dia as emissões de CO₂ não são muito significativas, no entanto as reduções obtidas estão representadas na tabela A.4.

Tabela A.4 Emissão de CO₂ com e sem controlo para o dia 1 de março entre as 1h e as 5h e entre as 19h e as 21h.

Fonte fóssil	Sem controlo ton(CO₂)/MWh	Com controlo ton(CO₂)/MWh
Carvão	1323,7	0
Gás natural	0	0
Total	1323,7	0

Com a estratégia aplicada reduziu-se as emissões das centrais a carvão em 100%, uma vez que não existem centrais a gás natural em funcionamento.

O preço médio da eletricidade neste dia foi de 1,81 €/kWh [27], não tendo variado muito ao longo do dia, os valores mais elevados ocorreram entre as 1h e 4h [28], pois como se pode verificar na figura 5.3 são os horários em que não existe excesso de energia.

Dia 22 de março de 2014

Tabela A.5 Controlo aplicado no quarto caso de estudo.

Lavar e Secar					
Horas	Frio Doméstico	Termoacumulador	AVAC	OFF	ON
1	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%
2	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%
3	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%
4	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%
5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
6	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	10,0%
7	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	20,0%
8	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	10,0%
9	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	20,0%
10	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	10,0%
11	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	10,0%
12	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
13	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%
14	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%
15	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%
16	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%
17	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%
18	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	10,0%
19	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	10,0%
20	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%
21	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%
22	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%
23	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%
24	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%

Anexo B – Casos de estudo: Sector residencial - variabilidade de geração

Dia 3 de janeiro de 2014

Tabela B.1 Controlo aplicado no primeiro caso de estudo no sector residencial.

Horas	Lavar e Secar				
	Frio Doméstico	Termoacumulador	AVAC	OFF	ON
1	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
3	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
4	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
6	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
7	0,0%	50,0%	0,0%	0,0%	0,0%
8	0,0%	37,5%	0,0%	0,0%	0,0%
9	0,0%	37,5%	0,0%	0,0%	0,0%
10	50,0%	37,5%	0,0%	0,0%	0,0%
11	37,5%	37,5%	50,0%	0,0%	0,0%
12	37,5%	37,5%	37,5%	0,0%	0,0%
13	37,5%	37,5%	37,5%	0,0%	0,0%
14	37,5%	37,5%	37,5%	0,0%	0,0%
15	37,5%	37,5%	0,0%	0,0%	0,0%
16	-12,5%	-12,5%	0,0%	0,0%	0,0%
17	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
18	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
19	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
20	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
21	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
22	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
23	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
24	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Através da análise do gráfico da figura 4.4, pode-se concluir que a geração eólica começa a baixar logo no início do dia, sendo o horário mais crítico entre as 8h e as 11h, devido ao decréscimo de geração ser mais acentuado. Após esse período a geração mantém-se constante, aumentando de seguida. Pode então ser aplicado um controlo em que se interrompe o ciclo dos aparelhos de climatização, optando-se por fazê-lo entre as 7h e as 15h, de forma a que o sistema possa recuperar do decréscimo da geração eólica.

Neste controlo optou-se por desligar parte do frio doméstico, AVAC e termoacumuladores de forma a que apenas 50% das cargas sejam desligadas, em períodos de 1h, e sabendo que na hora seguinte os equipamentos vão consumir mais de forma a manter a temperatura constante. Com este controlo obteve-se o gráfico da figura B.1, onde pode ser observada a geração eólica real e prevista e o consumo residencial com e sem controlo.

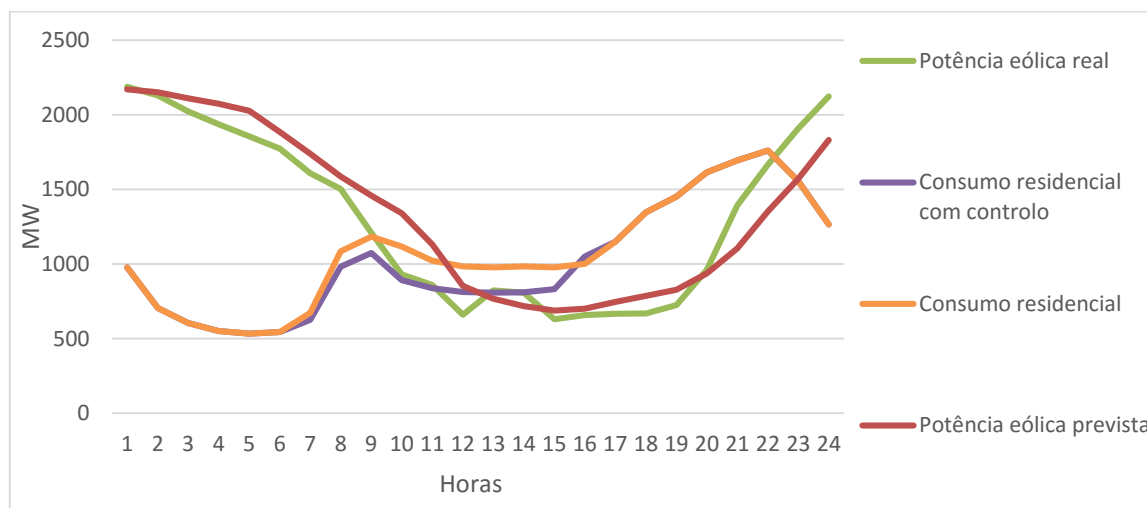


Figura B.1 Diagrama de geração eólica real e prevista do primeiro caso de estudo e consumo residencial com e sem controlo – dia 3 de janeiro de 2014.

Com o controlo aplicado, foi conseguida uma diminuição de consumos nos horários de baixa geração eólica. Conseguiu-se deste modo colmatar o défice de geração eólica. Como pode ser observado, neste caso a potencia eólica real é inferior à prevista, com a diminuição de consumos consegue-se também que os erros de previsão não tenham um impacto tão significativo no sistema.

Tabela B.2 Controlo aplicado no segundo caso de estudo no sector dos serviços.

Horas	Aquecimento
1	0,0%
2	0,0%
3	0,0%
4	0,0%
5	0,0%
6	0,0%
7	0,0%
8	50,0%
9	37,5,0%
10	-12,5%
11	0,0%
12	0,0%
13	0,0%
14	0,0%
15	0,0%
16	0,0%
17	0,0%
18	0,0%
19	0,0%
20	0,0%
21	0,0%
22	0,0%
23	0,0%
24	0,0%

Para colmatar a variabilidade de geração, optou-se por desligar os sistemas de aquecimento em estudo durante 2h, entre as 8 e as 10h (sendo que durante a primeira hora ficam desligados 50% dos equipamentos e na segunda hora os restantes), no horário em que a previsão de geração eólica tem um maior erro face ao valor real, obtendo assim o diagrama da figura B.2.

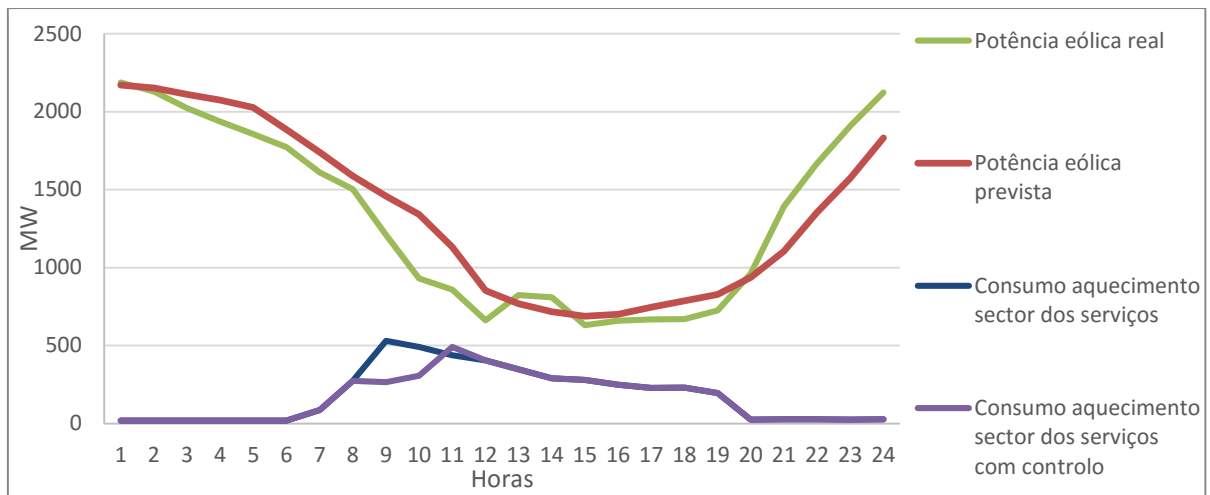


Figura B.2 Diagrama de geração eólica real e prevista e consumo do aquecimento com e sem controlo dos edifícios do sector dos serviços para o dia 3 de janeiro.

Pela observação do diagrama, conclui-se que ocorreu uma diminuição dos consumos do edifício entre as 8h e as 10h, horário em que a redução de geração é mais acentuada, o que permite a adaptação do sistema de energia à redução de geração eólica. Entre as 10h e as 11h, existe um aumento de consumo, devido ao facto de a temperatura ter de regressar à temperatura ótima.

Análise do impacto do caso de estudo:

A variação da geração eólica no dia 3 de janeiro sofre uma diminuição acentuada entre as 1h e as 12h, no entanto o período com maior erro de previsão é entre as 8h e as 12h, tendo-se optado tanto no sector residencial como no dos serviços por diminuir o consumo nesse horário de forma a adaptar o sistema a essa falta de geração. Uma diminuição no consumo vai ser equivalente a um aumento virtual da geração eólica. No diagrama da figura B.3, pode ser vista a curva da geração real e a curva virtual da geração eólica obtida com o controlo aplicado.

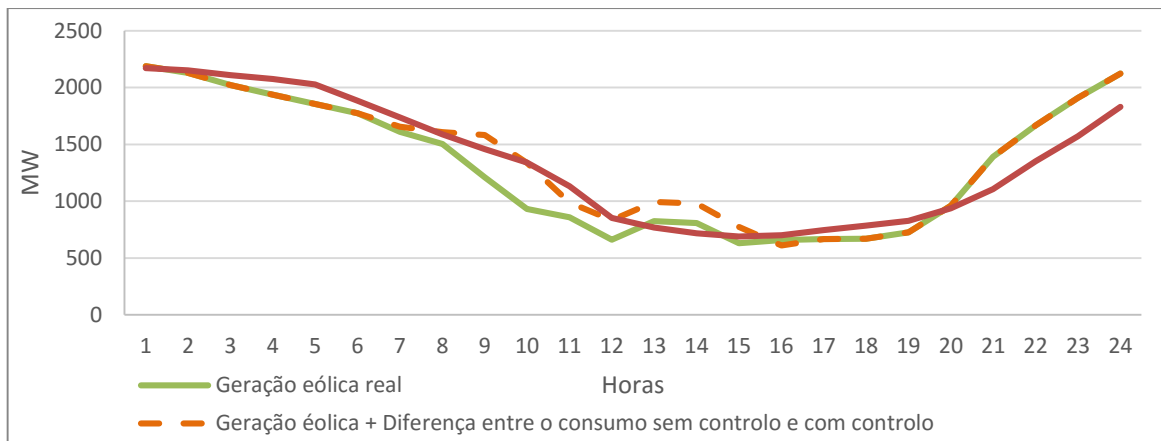


Figura B.3 Diagrama de geração eólica real e prevista e geração eólica + diferença entre o consumo sem e com controlo, para o dia 3 de janeiro de 2014.

Pela observação do diagrama anterior, verifica-se que, virtualmente, a geração eólica aumenta no período entre as 7h e as 15h. O horário mais problemático no que toca a diminuição de geração é entre as 8h e as 12h, pois é onde se verifica um maior aumento virtual da produção de energia eólica, devido ao facto de o controlo aplicado levar a uma maior redução do consumo. Após as 15h, a geração eólica aumenta, não sendo necessário efectuar um controlo do consumo. Os dados referentes às horas onde foram aplicadas estratégias de controlo podem ser observados na tabela B.3, na qual o valor da variação compensada em MWh e em percentagem foram calculados de acordo com as equações 6.1 e 6.2.

Tabela B.3 Compensação obtida com a estratégia de controlo aplicada para o dia 3 de janeiro.

Horas	Variação compensada		Erro absoluto sem controlo		Erro absoluto com controlo	
	MWh	%	MWh	%	MWh	%
8	104,58	6,96	-84,68	-5,33	19,91	1,25
9	373,28	30,85	-249,08	-17,07	124,21	8,51
10	407,27	43,76	-410,30	-30,60	-3,03	-0,02
11	128,37	14,94	-273,28	-24,14	-144,91	-12,80
12	172,25	26,13	-191,83	-22,50	-19,23	-2,23

Com base na tabela B.3, pode-se verificar que se compensou na primeira hora 6,96% da variação da geração eólica e 6,59% do erro, tendo o erro associado passado de negativo a positivo, uma vez que o valor da geração eólica obtido com controlo é superior ao valor previsto. Na segunda hora, a compensação da variabilidade aumenta para 30,85% e o erro compensado para

25,59%. Na terceira hora, a compensação da variação é de 43,76%, baixando este valor na quarta hora para 14,94%, uma vez que a geração eólica atinge o valor mínimo e mantém-se constante.

No total, conseguiu-se uma compensação da variação da geração eólica de 1209,15 MWh, ou seja de 23,42% face ao valor sem controlo (valor calculado com base na equação B.1). É também conseguida uma compensação do erro de 98,09% face ao erro sem controlo (valor calculado pela equação B.2), pois nas horas tidas em conta o valor da geração com controlo é muito próximo do valor da geração previsto. Com esta compensação, o sistema consegue adaptar-se à redução de geração ocorrida, e consegue-se também reduzir o erro de previsão.

$$VC(\%) = \frac{|\sum_{h=8}^{12} GSC - \sum_{h=8}^{12} GCC|}{\sum_{h=8}^{12} GSC} \times 100 \quad (B.1)$$

Onde,

VC – Variação compensada GSC – Geração sem controlo GCC - Geração com controlo h – hora

$$EC(\%) = \frac{|\sum_{h=8}^{12} ERSC - \sum_{h=8}^{12} ERCC|}{\sum_{h=8}^{12} ERSC} \times 100 \quad (B.2)$$

Onde,

EC – Erro relativo compensado ERSC – Erro relativo sem controlo ERCC - Erro relativo h – hora

Dia 19 de março de 2014

Tabela B.4 Controlo aplicado no segundo caso de estudo no sector residencial.

Horas	Lavar e Secar				
	Frio Doméstico	Termoacumulador	AVAC	OFF	ON
1	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
3	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
4	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
6	50,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
7	37,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
8	37,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
9	37,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
10	37,5%	50,0%	50,0%	0,0%	0,0%
11	37,5%	37,5%	37,5%	0,0%	0,0%
12	-12,5%	37,5%	37,5%	0,0%	0,0%
13	0,0%	37,5%	37,5%	0,0%	0,0%
14	0,0%	-12,5%	37,5%	0,0%	0,0%
15	0,0%	0,0%	-12,5%	0,0%	0,0%
16	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
17	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
18	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
19	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
20	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
21	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
22	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
23	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
24	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Tabela B.5 Controlo aplicado no primeiro caso de estudo no sector dos serviços.

Horas	Aquecimento
1	0,0%
2	0,0%
3	0,0%
4	0,0%
5	0,0%
6	0,0%
7	0,0%
8	0,0%
9	50,0%
10	37,5%
11	-12,5%
12	0,0%
13	0,0%
14	0,0%
15	0,0%
16	0,0%
17	0,0%
18	0,0%
19	0,0%
20	0,0%
21	0,0%
22	0,0%
23	0,0%
24	0,0%