

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



## **Impacto técnico-económico de medidas de gestão do consumo**

**Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente**

Ana Rita Coentro Brás

Dissertação orientada por:

Prof. Dra. Ana Estanqueiro (Orientadora FCUL)

Eng. Luís Rodrigues Jr. (Coorientador LNEG)

2016

## Resumo

O desafio principal de um sistema eletroprodutor é o de assegurar o equilíbrio entre a energia solicitada pelos consumidores e a que é entregue pelas fontes produtoras de energia, sendo esta a chave para a manutenção de um sistema estável. Tradicionalmente o consumo variava livremente, cabendo aos centros de produção de energia elétrica ajustarem-se a essa variação. No entanto, a atual e elevada penetração renovável variável no tempo – cuja produção é caracterizada pela não controlabilidade – dificulta a gestão do sistema electroprodutor e, em casos de penetração renovável extrema, exige capacidade de controlo adicional do binómio produção/consumo, a qual se situava do lado da produção e, recentemente, se tem vindo a explorar do lado do consumo, de modo a permitir o crescimento do sector renovável.

A reestruturação das atuais redes de energia em redes inteligentes apresenta diversos benefícios tanto para os consumidores como para os produtores e gestores da rede de transporte e distribuição. Este novo conceito de sistema electroprodutor promove a interação entre o lado do consumo e o lado da produção através da implementação de novas tecnologias. O envio de sinais de preço aos consumidores domésticos, por exemplo, contribui para a sua consciencialização para o preço da eletricidade em tempo real. Desta forma, a manutenção do equilíbrio entre produção e consumo deixa de ser um encargo somente do lado da produção.

Por forma a caracterizar o potencial de controlo do consumo e alcançar o objetivo desta dissertação é necessária a modelação do comportamento dos consumidores. Neste trabalho pretende-se modelar a variação da procura de eletricidade em função do preço da energia sob a forma de funções de elasticidade. A composição dos fatores de elasticidade para os consumidores resultará numa matriz de elasticidade, que poderá conduzir à previsão e conceção de cenários para o sistema eletroprodutor português.

**Palavras-Chave:** Sistema eletroprodutor, redes inteligentes, gestão do consumo, elasticidade

## Abstract

The main operational challenge of an electric power system is to insure the balance between the power demanded by the consumers and the one that is delivered by the operating power plants, being this the key to the maintenance of a stable system. Traditionally, the electric consumption varies freely in time and it was the responsibility of the production centers to adjust themselves to these variations.

Nonetheless, the current high penetration of renewable power generation – which production is characterized by its non-controllability – difficult the power system management and, in cases of extremely high renewable penetration, requires additional control capability on existing conventional generation and that, recently, has also been explored on the consumption side in order to allow the growth of variable renewable sector.

The restructuring of the current power grid into smart grids has many benefits for both consumers and producers. This new concept of power generation system allows and promotes an interaction between these two main players through the implementation of innovating technologies. Given the awareness of consumers to the price of electricity in real time – strongly correlated with the amount of energy being consumed -, the maintenance of the balance between production and consumption becomes not only a producers' responsibility but also a consumers' one.

In order to characterize the potential regarding consumption management and attain the goal of this thesis it is necessary to model consumer's profile behavior. Thus, it is intend of this work to model the electricity demand variation due to electricity's price fluctuations in the form of elasticity functions. The composition of elasticity factors for consumers and different price signals result in an elasticity matrix, which leads to the prediction and generation of scenarios for the Portuguese power system.

**Keywords:** power generation system, smart grids, demand management, elasticity

## Índice

|   |      |
|---|------|
| Resumo.....   |      |
| Abstract .....  | ii   |
| Índice de Figuras .....   | iv   |
| Índice de Tabelas.....  | vii  |
| Agradecimentos.....   | viii |
| Simbologia e Notações.....  | ix   |
| Capítulo 1 – Introdução.....  | 1    |
| Capítulo 2 – O Sistema eletroprodutor, os consumos elétricos e a sua flexibilização .....   | 4    |
| 2.1. As redes inteligentes.....   | 6    |
| 2.2. Vias para a flexibilização dos consumos domésticos.....                                | 8    |
| 2.3. Equipamentos elétricos .....   | 13   |
| Capítulo 3 – Elasticidade da procura.....   | 17   |
| 3.1. Conceito de matriz de elasticidade.....  | 18   |
| Capítulo 4 – Modelação do comportamento dos consumidores e do funcionamento das cargas..... | 22   |
| 4.1. Dados iniciais .....   | 22   |
| 4.2. Considerações procedimentais .....   | 23   |
| 4.2.1. Reagendamento de cargas: Blocos de movimentações dos consumos.....                   | 23   |
| 4.2.2. Cenários: Percentagem horária de gestão de consumo.....                              | 26   |
| 4.2.3. Número de horas recetoras .....  | 27   |
| 4.2.4. Extrapolação dos consumos a valores de 2020 .....                                    | 27   |
| 4.3. Metodologia .....  | 30   |
| 4.3.1. Movimentações entre horas do mesmo período de preços.....                            | 30   |
| 4.3.2. Movimentações entre horas de diferentes períodos.....                                | 31   |
| Capítulo 5 – Resultados .....   | 33   |
| 5.1. Cenário A .....  | 33   |
| 5.2. Cenário B .....  | 36   |
| 5.3. Cenário C .....  | 39   |
| 5.4. Comparação de cenários e análise de resultados.....                                    | 42   |
| Capítulo 6 – Conclusões e Desenvolvimentos Futuros .....                                    | 50   |
| Referências .....   | 51   |
| Anexos.....   | 53   |

## Índice de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Evolução do consumo total de energia no setor doméstico (tep) – representado pelas barras laranjas – e peso do consumo do setor doméstico (%) – representado pela linha a vermelho – no consumo final de energia entre os anos de 1989 e 2009 para Portugal [7]. .....                    | 5  |
| Figura 2: Taxas de crescimento previstas do consumo de eletricidade entre 2007 e 2050 por regiões do mundo [6]. .....   | 5  |
| Figura 3: Tipos de tarifas dinâmicas associadas ao consumo de eletricidade. ....  | 9  |
| Figura 4: Distribuição de preços e consumos elétricos horários por consumidor para o ano de 2008, registados durante o programa PSP [21]. .....   | 11 |
| Figura 5: Distribuição de preços e consumos elétricos horários por consumidor para o ano de 2009 registados durante o programa PSP [21]. .....  | 11 |
| Figura 6: Tarifas associadas ao momento do consumo. Adaptado de [22]. .....   | 12 |
| Figura 7: Fenómenos de corte do consumo nas horas de pico (à esquerda) e diferimento temporal da carga (à direita). Adaptado de [17]. .....   | 13 |
| Figura 8: Diagrama de carga dos consumos domésticos agregados em 2000 [26]. .....   | 15 |
| Figura 9: Diagrama de carga das máquinas de lavar roupa [26]. .....   | 16 |
| Figura 10: Ciclos típicos de funcionamento de uma máquina de lavar roupa para 2 temperaturas diferentes [26]. .....   | 16 |
| Figura 11: Matriz de elasticidade para consumidores de longo espectro [28]. .....   | 19 |
| Figura 12: Matrizes de elasticidade da 1ª tipologia de consumidores do “mundo real” [28]. .....   | 20 |
| Figura 13: Matriz de elasticidades da 2ª tipologia de consumidores do “mundo real” [28]. .....  | 20 |
| Figura 14: Matriz de elasticidades da 3ª tipologia de consumidores do “mundo real” [28]. .....  | 21 |
| Figura 15: Exemplos das movimentações de uma máquina de lavar roupa (MLR), uma máquina de lavar loiça (MLL) e uma máquina de secar roupa (MSR) entre horas pertencentes aos mesmos períodos de preços. As setas representam a movimentação de consumo da hora de origem para a hora destino. ....   | 24 |
| Figura 16: Exemplos das movimentações de uma máquina de lavar roupa (MLR), uma máquina de lavar loiça (MLL) e uma máquina de secar roupa (MSR) entre horas pertencentes a diferentes períodos de preços. As setas representam a movimentação de consumo da hora de origem para a hora destino. .... | 25 |
| Figura 17: Figura explicativa das movimentações de consumos que ocorreram de acordo com a modelação desenvolvida (blocos de movimentações). .....   | 25 |
| Figura 18: Comparação entre o consumo doméstico do agregado verificado em 2000, adaptado de [26] e o consumo previsto para 2020. ....   | 29 |
| Figura 19: Diagrama que traduz a procedimento adotado para as movimentações entre horas do mesmo período de preços. Neste diagrama é apresentado um exemplo para as horas de preços   |    |

|  |    |
|--|----|
| altos. Contudo, o procedimento é idêntico para todas as outras movimentações de 2ª e 3ª fases.<br>.....  | 31 |
| Figura 20: Diagrama que traduz a procedimento adotado para as movimentações entre horas de diferentes períodos de preços. Neste diagrama é apresentado um exemplo para as horas de preços altos e horas de preços baixos. Contudo, o procedimento é idêntico para todas as outras movimentações de 5ª e 6ª fases. .... | 32 |
| Figura 21: Comparação entre o consumo inicial, consumo final (consumos NP) e variação de preços para o cenário A.....  | 34 |
| Figura 22: Matriz de elasticidades obtida para o cenário A. Cada linha/coluna representa um subintervalo de tempo equivalente a 1 hora. ....   | 35 |
| Figura 23: Comparação entre o consumo inicial, consumo final (consumos NP) e variação de preços para o cenário B. ....   | 36 |
| Figura 24: Matriz de elasticidades obtida para o cenário B. Cada linha/coluna representa um subintervalo de tempo equivalente a 1 hora. ....   | 38 |
| Figura 25: Comparação entre o consumo inicial, consumo final (consumos NP) e variação de preços para o cenário C. ....   | 39 |
| Figura 26: Matriz de elasticidades obtida para o cenário C. Cada linha/coluna representa um subintervalo de tempo equivalente a 1 hora. ....   | 41 |
| Figura 27: Comparação entre os consumos iniciais e finais (equipamentos não prioritários) dos 3 cenários de consumidores.....  | 42 |
| Figura 28: Curvas de consumo doméstico agregado em 2020. ....  | 43 |
| Figura 29: Consumos detalhados nas horas de preços baixos para os diferentes cenários. ....  | 43 |
| Figura 30: Consumos detalhados nas horas de preços intermédios para os diferentes cenários. ....   | 44 |
| Figura 31: Consumos detalhados nas horas de preços altos para os diferentes cenários. ....   | 44 |
| Figura 32: Excerto da matriz de elasticidades dos consumidores de curto alcance para consumos e preços compreendidos entre as 11 e as 18 horas (horas intermédias). ....   | 46 |
| Figura 33: Excerto da matriz de elasticidades dos consumidores de longo alcance para consumos compreendidos entre as 7 e as 18 horas e preços compreendidos entre as 7 e as 10 horas. ....   | 47 |
| Figura 34: Excerto da matriz de elasticidades dos consumidores “inteligentes” para os consumos de 1 dia e preços compreendidos entre as 16 e as 24 horas.....  | 48 |
| Figura 35: Diagrama de carga das máquinas de secar roupa [26]. ....  | 53 |
| Figura 36: Ciclo típico de funcionamento de uma máquina de secar roupa [26]. ....  | 53 |
| Figura 37: Diagrama de carga das máquinas de lavar loiça [26]. ....  | 54 |
| Figura 38: Ciclo típico de funcionamento de uma máquina de lavar loiça [26]. ....  | 54 |
| Figura 39: Matriz de elasticidades para consumidores de curto alcance com escala de cores (Do cinzento ao verde, passando pelo azul, traduz um aumento absoluto das elasticidades.....   | 55 |

Figura 40: Matriz de elasticidades para consumidores de longo alcance com escala de cores (Do cinzento ao verde, passando pelo azul, traduz um aumento absoluto das elasticidades..... 56

Figura 41: Matriz de elasticidades para consumidores “inteligentes” com escala de cores (Do cinzento ao verde, passando pelo azul, traduz um aumento absoluto das elasticidades..... 57

## Índice de Tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1: Excerto dos resultados do inquérito [25] aos equipamentos mais gastadores. Os valores percentuais indicam a percentagem de inquiridos que mencionou o respetivo equipamento. .... | 14 |
| Tabela 2: Percentagens de DR consoante as fases de movimentações de consumos e o cenário considerado (tipologia de consumidor) .....  | 26 |
| Tabela 3: PIB <i>per capita</i> [29] e consumo doméstico em 2000 e 2010 e respetivas taxas de crescimento. ....   | 27 |
| Tabela 4: PIB <i>per capita</i> em 2010 e 2020, respetiva TC e consumo doméstico em 2010. ....  | 28 |
| Tabela 5: PIB <i>per capita</i> para os anos de 2010 e 2020, consumos domésticos para 2010 e respetivas TC.....   | 28 |
| Tabela 6: Consumo doméstico em 2000 [26], 2010 e 2020 e TC entre 2000 e 2020. ....  | 29 |
| Tabela 7: Exemplo da categorização de horas dadoras e horas recetoras. ....   | 30 |
| Tabela 8: Horas pertencentes a cada período horário estabelecido.....   | 33 |
| Tabela 9: Variação do consumo de eletricidade do agregado Português por período de preços e para o cenário A, ano 2020.....   | 33 |
| Tabela 10: Variações dos custos com os consumos de um agregado familiar Português por período de preço, num ano e para o cenário A.....   | 34 |
| Tabela 11: Variações do consumo de eletricidade do agregado Português por período de preço e para o cenário B. ....   | 36 |
| Tabela 12: Variações dos gastos com os consumos de um agregado Português por período de preço, por dia e para o cenário B.....  | 37 |
| Tabela 13: Variações do consumo de eletricidade do agregado Português por período de preço e para o cenário C. ....   | 39 |
| Tabela 14: Variações dos gastos com os consumos de um agregado Português por período de preço, por dia e para o cenário C.....  | 40 |

## Agradecimentos

Agradeço à Prof. Dra. Ana Estanqueiro e ao Eng. Luís Rodrigues pela oportunidade que me deram em poder desenvolver este trabalho sob as suas orientações. Agradeço ainda todos os esclarecimentos e direções que me deram e que possibilitaram a conclusão desta dissertação.

À minha família, principalmente aos meus pais, agradeço todo o investimento financeiro e a ambição que me inculcaram desde cedo e que me ensinou a nunca desistir.

Pedro, obrigada por me teres acompanhado nesta jornada, por me maneres no caminho certo e mostrares-me que todo o esforço é, mais cedo ou mais tarde, compensado.

Aos meus amigos, Janine, Francisco, Andreia, Ana Barata e David, que sempre estiveram disponíveis, agradeço toda a ajuda e conselhos que me deram.

## Simbologia e Notações

|     |   |
|-----|---|
| SEP | Sistema eletroprodutor  |
| NP  | Consumos não prioritários   |
| DR  | Resposta da procura (do inglês <i>demand response</i> )                               |
| DSM | Gestão de consumo do lado dos consumidores (do inglês <i>demand side management</i> ) |
| TOU | Tarifas associadas ao momento do consumo (do inglês <i>time of use</i> )              |
| RTP | Preços em tempo real (do inglês <i>real time pricing</i> )                            |
| CPP | Preços de ponta (do inglês <i>critical peak pricing</i> )                             |
| PSP | Tarifas inteligentes da energia (do inglês <i>power smart pricing</i> )               |
| AQS | Águas quentes sanitárias  |
| e   | Elasticidade  |
| CAE | Coefficiente(s) de autoelasticidade   |
| CEC | Coefficiente(s) de elasticidade cruzada   |
| CCA | Consumidores de curto alcance   |
| CLA | Consumidores de longo alcance   |
| CI  | Consumidores “inteligentes”   |
| TC  | Taxa de crescimento   |
| RP  | Relação de proporcionalidade  |



## Capítulo 1 – Introdução

A procura por eletricidade global tem vindo a aumentar – o fornecimento de energia, a sua utilização e as tecnologias envolvidas necessitam de ser mais económicas, com diminuto impacto ambiental e socialmente sustentáveis [1].

A eletricidade traduz-se por um fluxo de carga eléctrica instantânea e, quando em larga escala, o seu armazenamento é tecnicamente difícil e economicamente dispendioso. Por esta razão é necessário garantir que a produção de eletricidade iguale a procura – quer instantaneamente, quer atendendo aos padrões típicos de consumo sazonal [2]. Contudo, a manutenção do equilíbrio entre produção e consumo pode não ser trivial em sistemas electroprodutores como o de Portugal, onde o perfil diário do consumo eléctrico evidencia variações acentuadas ao longo do dia e a participação renovável é, por regra, muito elevada.

Hoje em dia, a variedade de fontes de energia permite que o sistema eletroprodutor seja gerido de forma mais eficiente, tirando partido das qualidades de cada tipo de central. Nesta perspetiva, as centrais são normalmente agrupadas em 3 grandes categorias consoante as suas características operacionais – centrais de base (*Base-load power plants*), centrais intermédias (*intermediate power plants*) e centrais de ponta (*peak power plants*).

As centrais de base são caracterizadas pela sua elevada fiabilidade, eficiência e baixos custos operacionais. Contudo, demoram muito tempo a atingir o seu pleno funcionamento (potência nominal) o que faz delas centrais com baixa flexibilidade operacional. Assim, e uma vez alcançada a potência de regulação, permanecem em funcionamento contínuo e estável ao longo de todo o ano (cerca de 70% do tempo), apenas interrompendo a sua produção em situações em que seja necessário proceder a manobras de manutenção ou reparações. São exemplos destas centrais as nucleares e as de carvão [2].

As centrais de ponta são em tudo diferentes das centrais de base, anteriormente referidas. Estas centrais demonstram uma enorme capacidade de ajuste, uma vez que podem ser ligadas e desligadas muito rapidamente, sendo esta a principal razão pela qual são utilizadas para realizarem os ajustes às rápidas variações de consumo. Contudo, são centrais muito caras de operar e que apenas funcionam em cerca de 20% do tempo do ano, para além de entregarem energia regularmente abaixo da sua potência nominal. Este último fator condiciona o fator de capacidade médio <sup>1</sup> destas centrais que se situa abaixo dos 30%, dependendo da região considerada [2]. As centrais de turbinas a gás de ciclo aberto são exemplos deste bloco de centrais.

Por último, o bloco de centrais intermédias opera entre 20% a 70% do tempo, fazendo a ponte entre a produção das centrais de ponta e a produção das centrais de base em termos de custos e flexibilidade de operação.

A atual inclusão de fontes de produção de energia renovável no sistema eletroprodutor português é outro fator a considerar.

A grande maioria das fontes de energia renovável é caracterizada por possuir ciclos naturais que alteram a sua disponibilidade ao longo de diferentes horizontes temporais. Estes ciclos podem variar em escalas de tempo muito pequenas, como é o caso da produção fotovoltaica – que é altamente influenciada pelo efeito das nuvens – ou podem variar em escalas de tempo mais

---

<sup>1</sup> O fator de capacidade médio avalia a relação que existe entre a potência média a que uma central opera e a potência instalada dessa mesma central

alargadas, como é o caso das centrais hídricas cujos ciclos naturais são da ordem dos meses a anos. O impacto que as flutuações de produção renovável representam para o sistema dependem diretamente do nível de penetração dessa fonte – esta terminologia está associada à ponderação da produção renovável com respeito à produção total do sistema eletroprodutor [3].

Em algumas alturas do dia e conforme a estação do ano, o consumo do agregado é sustido parcialmente pela produção de energia renovável que pode a qualquer momento diminuir (ou aumentar) drasticamente. Nestas situações, e dada a fraca previsibilidade da produção de energia proveniente destas fontes, é imperativo que o sistema eletroprodutor (SEP) seja suficientemente flexível para dar resposta a tais flutuações sem comprometer a qualidade do seu serviço. Idealmente, a previsão dos níveis de produção de energia vinda de fontes renováveis – possibilitada através do estudo do clima – e associada à flexibilização do SEP seria a conjugação de excelência.

É claro que o estudo do clima e a sua repercussão direta na produção de energia por centrais renováveis variáveis no tempo é ainda uma área em franco desenvolvimento, sendo os erros associados à previsão da produção renovável significativos. Este facto, e num cenário de elevada penetração de produção variável no tempo, associado ainda à reduzida capacidade de controlo deste tipo de centrais e às limitações técnicas das restantes (convencionais), remete-nos para outro aspeto que é o objetivo desta tese – o controlo do consumo elétrico.

Esta é uma visão que desloca o foco dos centros de produção e redistribui as ações conducentes à manutenção da estabilidade do SEP tanto pelo lado da produção como pelo lado dos consumidores. Tal significa que é essencial uma maior coordenação entre os consumidores e os produtores de eletricidade. Essa coordenação dependerá da sensibilização dos consumidores para a necessidade de diminuir o consumo e/ou alterar os seus hábitos ao longo do dia (ou da semana), acabando por beneficiar o sistema elétrico, quer nos aspetos técnicos, quer nos económicos, sociais e ambientais.

Aferir o impacto que uma mudança de hábitos terá em termos técnico e económicos a longo prazo será o objetivo desta tese. Para tal, foram estudados os perfis de funcionamento de vários equipamentos domésticos bem como aqueles cujo período de funcionamento poderia ser mais facilmente reagendado. A estes equipamentos e aos respetivos consumos será aplicada a terminologia de consumos não prioritários (NP).

Por outro lado, e com vista a modelar o comportamento dos consumidores, foi admitido que a taxa de adesão por parte da população aos programas de gestão de consumo seria de 25%. Para além disso foram definidos 3 tipologias de consumidores – cada uma com uma preferência temporal de consumo diferente – repercutindo-se, desta forma, em vários cenários hipotéticos para o ano 2020 – ano que se pretende projetar a curva de consumo doméstico afetada da gestão consciente do consumo.

No 2º capítulo introduz-se o conceito de redes inteligentes e como estas possibilitam a integração de tecnologias promotoras de medidas de gestão do consumo por parte dos consumidores. É feita uma revisão bibliográfica de como os consumidores veem os equipamentos elétricos que têm nas suas habitações em termos de gastos energéticos. Desta forma, obter-se-á uma primeira ideia de quais os equipamentos cujo horário de funcionamento deverá ser reagendado mais à frente. Este capítulo termina com a análise destes mesmos perfis de funcionamento bem como dos diagramas de carga de cada um dos equipamentos.

O 3º capítulo introduz o tema da elasticidade da procura, o conceito de matriz de elasticidade e o seu significado prático.

O capítulo 4 inicia a descrição do processo de modelação realizado – todos os procedimentos, considerações e premissas levados em conta.

O capítulo 5 explicita os resultados obtidos para cada cenário considerado seguido de uma análise desses mesmos resultados.

Finalmente, no 6º capítulo são apresentadas as principais conclusões desta tese, sendo ainda mencionadas algumas sugestões para trabalhos futuros que possam vir a ter como base este trabalho.

## Capítulo 2 – O Sistema eletroprodutor, os consumos elétricos e a sua flexibilização

O sistema elétrico é definido como a composição das centrais produtoras de eletricidade, consumidores e redes de transporte e distribuição de energia que permitem a transporte e distribuição da eletricidade desde as centrais até aos consumidores, sejam eles domésticos, comerciais ou industriais.

As práticas tradicionais envolvidas na conceção de um sistema de engenharia tentam antecipar e resistir a situações adversas, mas podem ser vulneráveis a situações imprevistas. Uma solução para este problema é a conceção de sistemas mais robustos, tirando partido das próprias características, como é o caso da diversidade, eficiência, capacidade de adaptação e coesão [4].

A preocupação que tem vindo a ser cada vez mais evidente no que diz respeito à dependência dos combustíveis fósseis e às emissões de gases com efeito de estufa, provocou um aumento do interesse do uso de políticas e tecnologias que permitam não só a redução do consumo de energia como também da mudança dos perfis de consumo [5].

A fiabilidade de um sistema elétrico depende da capacidade que o mesmo tem em dar resposta a variações do consumo de energia ao longo do dia garantindo assim o fornecimento ininterrupto deste serviço, tal como visto no capítulo 1. Um dos fatores que mais condiciona a capacidade – entenda-se potência – instalada num sistema eletroprodutor e que simultaneamente reforça o aumento do custo de produção da energia elétrica é a procura de eletricidade nos períodos de ponta<sup>2</sup>, visto haver necessidade de, nesses períodos, recorrer a centrais com custos produtivos mais elevados. Dado que esta acentuada procura de energia apenas ocorre em momentos específicos do dia e com alguma variabilidade, verifica-se que as instalações de produção, transporte e distribuição de eletricidade – que atendem a estes elevados valores de procura e que representam um enorme investimento – em termos anuais, estão a funcionar muito abaixo da sua potência nominal [2]. Significa isto que os investimentos feitos para dar resposta a picos de consumo ocasionais não teriam de ter sido realizados se a curva do consumo elétrico fosse constante [6].

A longo prazo, a sustentabilidade de um sistema eletroprodutor continuará a depender não só da sua capacidade de igualar a produção de eletricidade à procura, como também da sua capacidade de fornecer cada vez maiores quantidades de eletricidade exigidas pelos consumidores. Ou seja, para além de dever acompanhar as flutuações instantâneas do consumo, a produção deverá acompanhar o aumento do consumo médio que é expectável em qualquer país com desenvolvimento económico.

Em Portugal, o peso do consumo total de energia elétrica do setor doméstico tem vindo a diminuir desde 1989 até 2001 demonstrando um perfil maioritariamente constante nos anos seguintes. No ano de 2009 o peso do consumo neste setor atingiu os 17,7% do consumo final de energia [7]. Em 2010 este valor, e segundo a ADENE [8], situava-se em 16,6%. De salientar que, embora o peso do consumo mostre o perfil anteriormente descrito e tenha vindo a diminuir, o consumo de energia no setor residencial em termos absolutos tem vindo a aumentar significativamente ao longo dos anos (de, aproximadamente, 2300 ktep, em 1989 para 3200

---

<sup>2</sup> Os períodos de ponta são caracterizados por apresentarem um preço de energia mais elevado dada a elevada procura de eletricidade nestes períodos horários. Pelo contrário, os períodos de vazio são caracterizados por um preço de electricidade mais apelativo (mais reduzido) e que por norma caracteriza os períodos da noite e madrugada. Outras horas com um preço de energia intermédio compõem um espaço de tempo dado por períodos de cheia.

ktep em 2009) tal como ilustra a Figura 1. Tal significa que, não só o consumo doméstico aumentou, como também o consumo dos restantes setores, uma vez que para um aumento substancial do consumo doméstico, se verifica que a fatia a que a este setor corresponde se manteve maioritariamente constante.

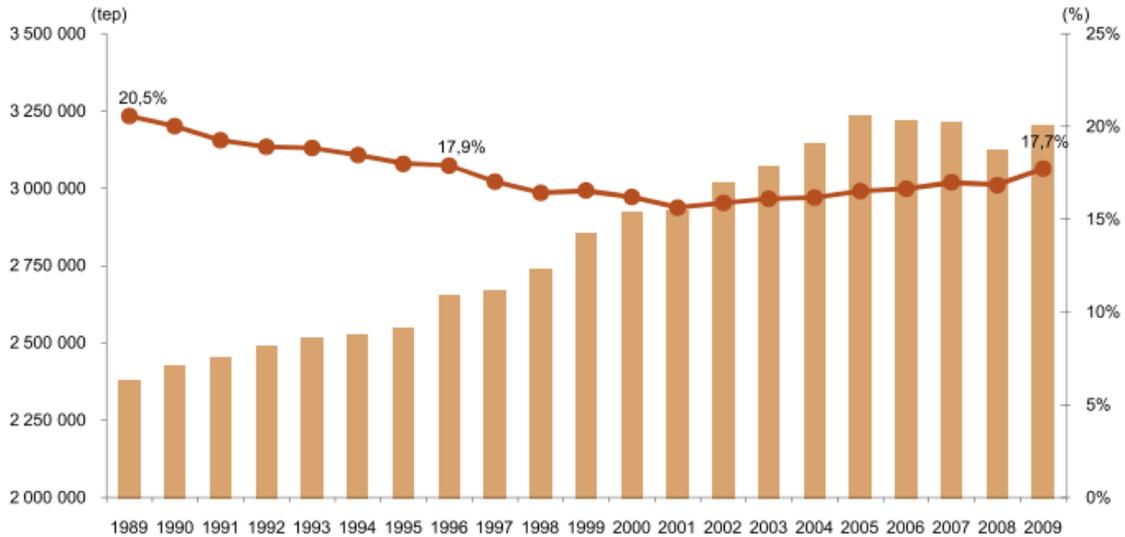


Figura 1: Evolução do consumo total de energia no setor doméstico (tep) – representado pelas barras laranjas – e peso do consumo do setor doméstico (%) – representado pela linha a vermelho – no consumo final de energia entre os anos de 1989 e 2009 para Portugal [7].

Países desenvolvidos encaram constantemente o desafio de igualar a oferta de energia à sua cada vez maior procura [9]. Em países em vias de desenvolvimento este desafio é ainda maior, uma vez que o aumento da procura é ainda mais acentuado tal como mostra a Figura 2.

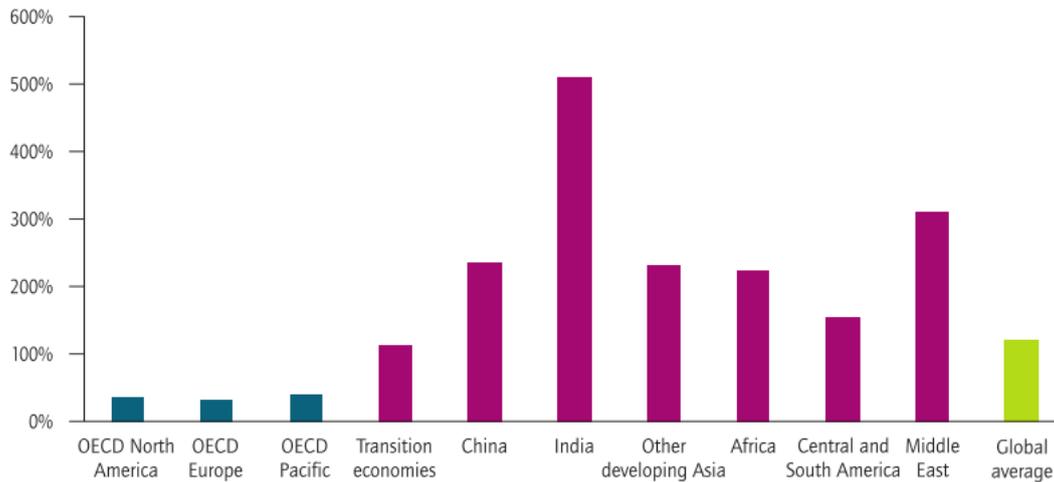


Figura 2: Taxas de crescimento previstas do consumo de eletricidade entre 2007 e 2050 por regiões do mundo [6].

A longo prazo, por medida de precaução, e como norma geral, a capacidade total instalada de centrais produtoras de eletricidade deve ser 20% superior ao consumo máximo verificado [2], assegurando assim a segurança de abastecimento do sistema mesmo em situações atípicas de consumo. Este conceito – normalmente denominado por reserva estática – é tido como um

instrumento de planeamento do sistema eletroprodutor a longo prazo. Uma vez que se verifique a melhoria dos padrões de vida dos consumidores é de esperar que estes passem a consumir mais energia por via da aquisição de novos equipamentos que, embora sejam mais eficientes, serão provavelmente adquiridos em maiores quantidades ou, por outro lado, serão postos em funcionamento com maior frequência.

O facto é que, com o passar dos anos, algumas redes de distribuição regional começam a não ser capazes de responder aos picos de procura embora, quando foram dimensionadas, o tenham sido para igualar a potência de ponta da altura e ainda com alguma capacidade extra para responder a imprevistos que possam exigir mais energia do que o esperado [10].

Com o trabalho desenvolvido no âmbito desta tese, pretende-se contribuir para o desenvolvimento de ferramentas de modelação do comportamento dos consumidores, que possam assumir um papel ativo na gestão dos consumos domésticos e, assim, diminuir a procura de eletricidade nas horas mais críticas de consumo. Desta forma deverá ser adiada ou mesmo evitada a necessidade de novos investimentos em infraestruturas de produção, distribuição e transporte de energia elétrica, contribuindo ao mesmo tempo para maximizar a participação de produção renovável variável no tempo no *mix* energético do SEP português.

A flexibilização dos consumos pode ser alcançada quer por implementação de medidas de eficiência energética, que conduzem a uma diminuição do consumo de energia ou por alteração dos padrões de consumo sensíveis a fatores externos, tais como o preço da eletricidade.

Neste trabalho seguiu-se uma abordagem de flexibilização dos consumos numa perspetiva de mudança dos padrões de consumo. Neste sentido, são enunciadas, neste capítulo, as tecnologias e mecanismos que atualmente existem e que permitem esta mesma flexibilização.

## 2.1. As redes inteligentes

São vários os fatores que impulsionam a movimentação entre as atuais redes de energia para as redes inteligentes – o aumento da procura de eletricidade, a utilização de fontes de energia renovável variáveis no tempo e não despacháveis e o envelhecimento da infraestrutura das atuais redes são alguns exemplos [11].

A transformação das atuais redes passa pelo desenvolvimento das redes inteligentes e pela comunicação entre consumidores, produtores, microprodutores e operadores da rede de forma a otimizar a produção de eletricidade proporcionalmente à procura da mesma por parte dos consumidores [12].

Esta constante conexão é possibilitada pela implementação de tecnologias de comunicação bidirecionais e de processamento computacional passando os consumidores a integrar e participar ativamente nos mercados de energia [2]. Ou seja, as redes inteligentes pretendem conjugar todas as necessidades e capacidades de todos os agentes do sistema: produtores, operadores de rede, consumidores e mercados, de forma a operar todas as partes do sistema da maneira mais eficiente minimizando os custos monetários e impactos ambientais e simultaneamente melhorando a fiabilidade do sistema [6].

Atualmente, as grandes vantagens das redes inteligentes referem-se à sua melhorada fiabilidade bem como o encorajamento que oferecem à tomada de decisões mais eficientes, quer por parte dos consumidores, quer por parte do prestador de serviços [13].

As chamadas rede inteligentes são sensíveis a sobrecargas nos componentes que compõem o sistema e, muitas vezes, são capazes de redirecionar o fluxo de energia prevenindo ou minimizando potenciais situações de corte de fornecimento de eletricidade. A sua capacidade de

funcionar autonomamente faz com que o seu tempo de reação seja inferior aos dos humanos – conseguindo resolver contingências com um impacto diminuto. A renovada eficiência deste novo conceito de rede permite responder ao aumento esperado do consumo de um agregado sem obrigar a que se tenha de proceder ao aumento das infraestruturas [14].

No entanto, são conhecidas várias barreiras que impedem a implementação das tecnologias associadas às redes inteligentes. Em [1] é feita uma extensa revisão bibliográfica que permitiu identificar algumas barreiras relevantes à implementação de tais tecnologias. Embora não seja objetivo deste trabalho o de discutir nem aprofundar este assunto, serão mencionadas algumas dessas barreiras a título de exemplo.

A diminuta consciencialização do público para os potenciais benefícios das redes inteligentes é uma das barreiras que tem de ser ultrapassada [1]. Só quando os consumidores estiverem completamente cientes de todo o potencial das redes inteligentes é que se poderão obter benefícios mesuráveis. A imaturidade da tecnologia envolvida atrasa a sua implementação para além de que a comunicação bidirecional poderá ser suscetível a desastres naturais, ou qualquer outra situação que comprometa a ligação. A segurança e a privacidade da conexão entre fornecedores e consumidores também poderão ficar suscetíveis a tentativas de roubo de informação [1]. Estas são algumas das barreiras mencionadas.

As redes inteligentes agregam, não só os sistemas de produção central de energia, como também os sistemas de produção distribuída [1] e, uma vez que estão conectadas a vários pontos de monitorização da rede – recebendo o seu *feedback* –, são capazes de otimizar a produção de eletricidade. No entanto, as redes inteligentes não beneficiam em exclusivo a produção e a distribuição de energia, tal como será comprovado de seguida – também o consumo é positivamente afetado por esta nova abordagem às redes de energia.

Na literatura são apontados não só os aspetos anteriormente mencionados como também outros relacionados com a sustentabilidade ambiental. A sustentabilidade envolve preocupações ambientais e climáticas e, em especial, uma nova e ambiciosa política europeia (conceito 20/20/20), com o horizonte temporal a 2020, proposta pela União Europeia que envolve diversos objetivos – a redução dos gases com efeito estufa em 20% comparativamente com os níveis de 1990; potenciar o aumento da participação da produção renovável para que esta atinja 20% da energia produzida e aumentar a eficiência energética em 20% [13], [15] .

O aparecimento de aparelhos inteligentes capazes de serem integrados, por exemplo numa casa, possibilita a flexibilização do lado do consumo. Isto é, com base nas preferências estabelecidas pelo consumidor, estes dispositivos inteligentes atuam em tempo real no consumo, ligando ou desligando cargas, possibilitando a redução da procura de energia em horas de pico [1].

Muitos dos contadores inteligentes são capazes de ler a tensão, a corrente e o fator de potência de um ponto da linha, suportando pela primeira vez a possibilidade de comunicação uni ou bidirecional entre consumidores e fornecedores de energia / operadores da rede. Estes contadores permitem ainda a deteção mais rápida de interrupções na entrega de energia e a localização de falhas, tornando a sua reparação mais rápida.

Dada a ininterrupta ligação entre todos os participantes deste novo conceito de rede, torna-se claro o enorme potencial das redes inteligentes – capazes de antecipar falhas através de dados que lhes são enviados em tempo real, como também através de dados gravados de acontecimentos do passado.

O desenvolvimento de sistemas de contagem inteligentes na Europa foi determinado pela Diretiva 2009/72/EC [13] que estabeleceu a necessidade de implementação de cerca de 250 milhões de contadores inteligentes no território Europeu até 2020. Na maioria dos casos, a sua instalação é levada a cabo pelo operador do sistema de distribuição ou pelas próprias empresas comercializadoras de energia, sendo esta ação tomada como parte de um projeto mais amplo no

contexto das redes inteligentes, combinada tipicamente com sistemas inovadores de automação e controlo do lado da rede ou com programas de resposta da procura (DR do inglês *demand response*) e aplicações de agendamento de consumo de energia em casas inteligentes – por exemplo, Grid4EU e Inovgrid [13].

## 2.2. Vias para a flexibilização dos consumos domésticos

Algo que beneficia tanto o operador da rede como os consumidores é a reorganização dos consumos diários, para que apresentem um perfil agregado constante. É claro que, esta reorganização dos consumos fica maioritariamente a cargo do consumidor e, como tal, o mesmo apenas transita de horário o funcionamento dos equipamentos que menos transtorno lhe causem.

Na tentativa melhor articular a conexão entre o produção/consumo existem já algumas propostas de soluções técnicas tais como tecnologias associadas a redes inteligentes e DR – ambas capazes de proporcionar um aumento da flexibilidade e capacidade de adaptação do consumo à produção de eletricidade [2].

A gestão do consumo do lado dos consumidores (DSM do inglês *demand side management*) traduz a adaptação da procura de eletricidade consoante a produção e disponibilidade de energia na rede, quer através da redução do consumo, quer através do reagendamento dos mesmos para horas fora do período de ponta [11]. Este conceito descreve todas as atividades que visam transformar o perfil da procura no tempo [16]. Para além de albergar o conceito de resposta da procura – e por isso ser considerado um conceito mais alargado – a gestão de consumo do lado dos consumidores integra também os efeitos decorrentes da aplicação de medidas de eficiência energética [17].

A resposta da procura é um dos tipos de DSM, tal como mencionado anteriormente, que agrega dois métodos possibilitantes de gerir o consumo – a gestão com base em tarifas dinâmicas ou a gestão com base em pagamentos incentivadores de redução do consumo [11].

Neste contexto, os pagamentos incentivadores concebidos aos consumidores são feitos com o intuito de diminuir o consumo de eletricidade em momentos específicos do dia [13] incentivando a mudança do perfil de consumo num determinado período de tempo em situações que o operador da rede entenda ser benéfico para o sistema [17] – por exemplo, situações em que a estabilidade do sistema esteja comprometida por haver um excesso de procura de energia, ou quaisquer outras razões que ponham em causa a fiabilidade do sistema e a segurança de abastecimento.

O facto de os consumidores estarem permanentemente ligados à rede possibilita que o operador da rede os possa contactar e oferecer tais incentivos. Nesta perspetiva, torna-se evidente a importância da resposta da procura, que viabiliza uma nova abordagem ao sistema electroprodutor onde os consumidores assumem uma função mais importante no que diz respeito à manutenção do equilíbrio entre produção e consumo. Tal como as redes inteligentes, também estes programas beneficiam consumidores e prestadores de serviços ao permitir que os mercados de energia operem de uma forma mais eficiente bem como reduzindo os elevados valores de procura (picos de procura) e ainda a volatilidade associada aos preços da energia. Numa perspetiva de longo prazo, verificam-se benefícios económicos adiando a necessidade de construção de novas centrais ou até mesmo de realizar melhorias na rede [13].

Por outro lado, as tarifas dinâmicas podem ser [18]: 1) tarifas associadas ao momento de consumo (TOU do inglês *Time-of-Use*); 2) preços em tempo real (RTP do inglês *real time pricing*); 3) preços de ponta (CPP do inglês *critical peak pricing*);

A Figura 3 esquematiza estas tarifas pela ordem que serão abordadas neste capítulo.

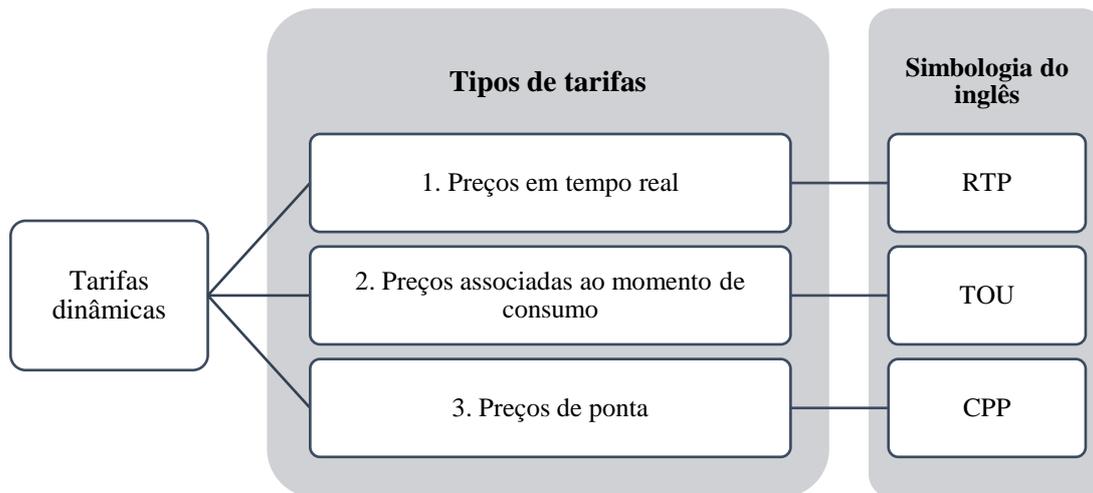


Figura 3: Tipos de tarifas dinâmicas associadas ao consumo de eletricidade.

Nos programas que oferecem preços em tempo real, o dia é normalmente dividido em 24 intervalos de tempo (1 hora para cada intervalo) e cada intervalo de tempo tem um preço de energia que reflete o preço do mercado [18]. Estes são usualmente direcionados a grandes consumidores comerciais ou industriais. Isto significa que os consumidores estão cientes de quanto a eletricidade vai custar no dia/hora seguinte [19]. Em geral, ao permitir que os consumidores vejam o preço real da eletricidade dá-se a oportunidade para que estes ajustem os seus consumos aos sinais de preço que lhe são enviados. Nesta perspetiva, potencia-se a estabilidade e eficiência do sistema eletroprodutor [20].

Tais benefícios não passaram despercebidos, o que permitiu o desenvolvimento de inúmeros programas piloto na área de tarifas diferenciadoras de preço para consumidores de larga escala. O corpo legislativo de Illinois foi um dos primeiros a encorajar a implementação de tarifas RTP como a possibilidade de consumidores domésticos poderem aderir também a este tipo de tarifas. Foi entretanto estipulado pelo Illinois Public Act 94/0977 que empresas fornecedoras de energia com mais de 100 000 clientes deveriam ter uma opção de RTP como uma das opções de tarifa aos clientes que assim o desejassem [20].

No decorrer do tempo ficou claro que o desenvolvimento de um programa com tarifas RTP traria benefícios económicos à comunidade residencial agregada. Desta forma, inaugurou-se o programa de tarifas inteligente da energia (PSP, do inglês *Power Smart Pricing*).

Em 2007, a Cooperativa da Comunidade Energética (CNT *Energy*) foi selecionada como administradora do programa que, através de inúmeras estratégias, conseguiu angariar cerca de 3147 participantes para o programa PSP. Experiências anteriores em programas piloto semelhantes comprovaram ser possível obterem-se benefícios económicos significativos sem recorrer a tecnologia de ponta e muito cara. Isto, porque o recurso a tecnologia de ponta envolveria um investimento muito superior, o que resultaria num retorno de investimento menor para os consumidores.

Um dos principais objetivos do programa PSP foi o de entender e caracterizar a forma como os participantes alteravam os seus consumos em resposta aos preços horários da eletricidade. Tal relação foi quantificada recorrendo ao conceito de elasticidade, definida como a variação de consumo (em percentagem) associada a uma variação de preço, também expressa em percentagem.

Em geral, e posteriormente à comparação dos diagramas de carga entre consumidores que participaram no programa PSP e outros consumidores que não participaram foi possível

concluir que os participantes do programa reduziram os seus consumos de dia e intensificaram os consumos durante a noite, sendo que se observou uma redução de 0,15 kW por consumidor desde o meio-dia até às 17 horas. Comprovou-se ainda que, em dias nos quais se deu um alerta de preço muito elevado, a redução foi de 0,23 kW por consumidor, no mesmo intervalo de tempo que o mencionado anteriormente [20].

A investigação ao nível dos programas de diferenciação do preço, como é o caso do RTP, está atualmente em pleno crescimento à medida que são reconhecidos mais benefícios da sua implementação [20].

Os benefícios do RTP revertem a favor dos participantes deste programa, possibilitando que estes poupem nas suas faturas mensais. Por outro lado, as empresas beneficiam com a diminuição da carga em horas de pico. No entanto, não são só os participantes ativos destes programas que beneficiam – também os consumidores não participantes nestes programas, mas que integram a região onde se aplicam estes programas, acabaram por beneficiar deles, uma vez que pequenas mudanças no perfil de consumo influenciam ativamente os picos de preço em ambiente de mercado, revertendo o benefício para toda a comunidade residencial [20].

O programa PSP foi um programa sequencial e que reportou os seus resultados à população ao longo dos anos. Um dos muitos resultados foi o que se mostra na Figura 4 e na Figura 5, que reporta visualmente o quanto os consumidores participantes no projeto se tornaram sensíveis aos preços da eletricidade entre os anos de 2008 e 2009.

Na Figura 4 são visíveis consumos em horas do dia cujos preços de eletricidade se situavam maioritariamente entre os 2 e os 20 cêntimos por kWh. Em contrapartida, em 2009 (Figura 5) os consumos restringiram-se a horas com preços não superiores a 9 cêntimos/kWh.

Estes resultados mostram a enorme sensibilidade adquirida pelos participantes bem como a rapidez com que o fizeram (no espaço de 1 ano).

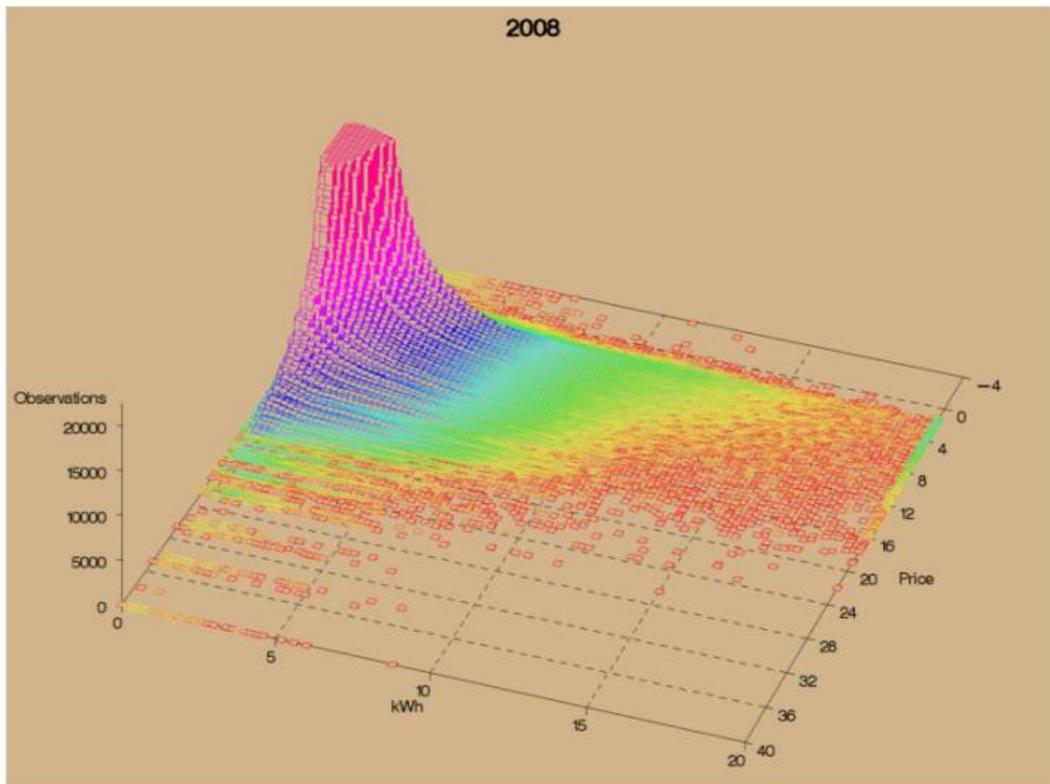


Figura 4: Distribuição de preços e consumos elétricos horários por consumidor para o ano de 2008, registados durante o programa PSP [21].

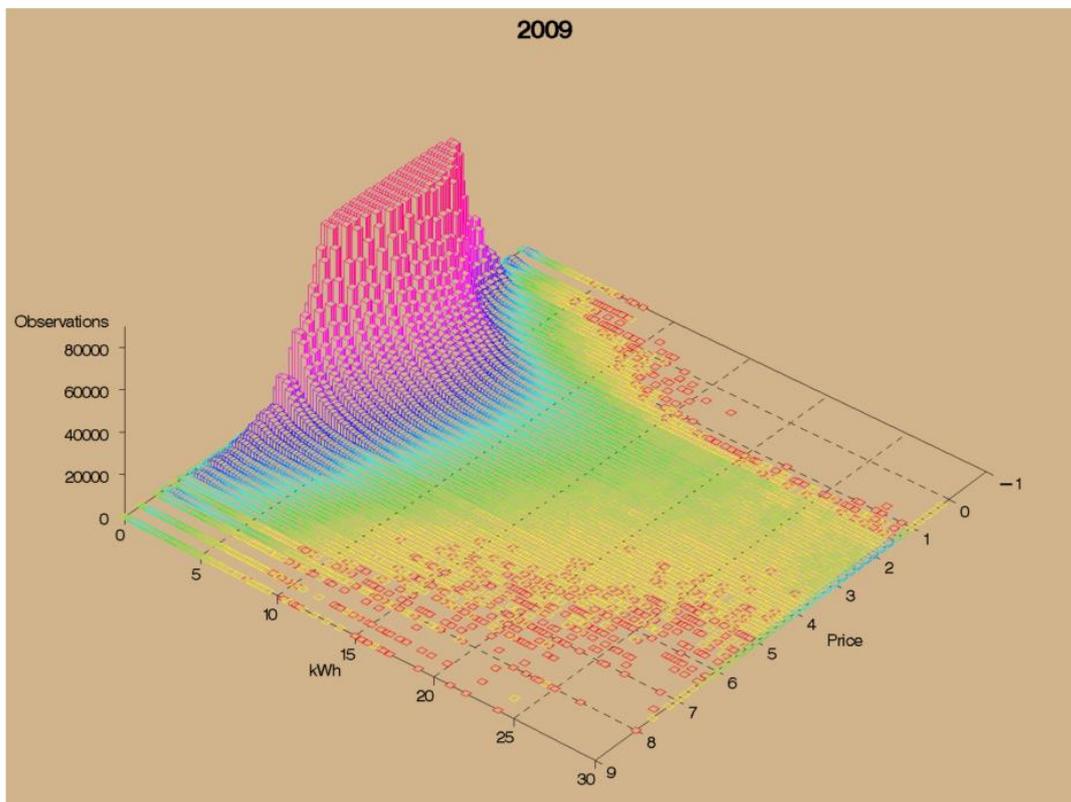


Figura 5: Distribuição de preços e consumos elétricos horários por consumidor para o ano de 2009 registados durante o programa PSP [21].

Retomando as diferentes tarifas dinâmicas; Os programas TOU são muito semelhantes aos de RTP, com a exceção de ter menos intervalos de tempo com o objetivo de diminuir a complexidade do programa de RTP.

A Figura 6 dá um exemplo deste tipo de tarifa.



Figura 6: Tarifas associadas ao momento do consumo. Adaptado de [22].

A corrente literatura relacionada com a caracterização da elasticidade refere-se, fundamentalmente, à caracterização da resposta a preços dinâmicos do tipo TOU [23].

Aigner et al., em 1994 [24] publicou um artigo que expôs os resultados alcançados relativamente à resposta que pequenos e médios consumidores do setor comercial e industrial de Israel demonstravam quando expostos a tarifas dinâmicas do tipo TOU. A recolha de dados decorreu ao longo de 15 meses, terminando em Junho de 1992 e que levou os autores a concluir que os ganhos estimados para os consumidores eram significativos ao ponto de justificarem o investimento inicial em adquirir tecnologia de monitorização. Outra conclusão do estudo foi a visível transferência de consumos de eletricidade das horas de pico para as horas vazias. Embora muito menos visível, foi observada a transferência de consumo das horas de pico para as horas intermédias de preço. Estas alterações foram observadas em todas as estações do ano, embora mais particularmente no inverno. Finalmente, o estudo acabou por verificar que as elasticidades obtidas variavam substancialmente ao longo das estações do ano e que, portanto, o clima é um fator importante que condicionou a resposta dos consumidores às tarifas TOU [24].

Por último, os programas CPP são aqueles que estipulam um preço fixo para o consumo de energia durante grande parte do dia mas que em horas previamente estipuladas demonstra preços muito mais altos e penalizadores para o consumo nessas mesmas horas [18].

As alterações visíveis ao nível do perfil da procura podem ser apelidadas consoante o processo envolvido. Em situações que os consumidores optam por deixar de consumir em horas de pico e redistribuem as suas cargas por horas de menor afluência, dá-se o nome de diferimento temporal de carga (*load shifting*, em inglês). Neste caso, (Figura 7 à direita) o consumo diário de energia será o mesmo, simplesmente estará dividido pelas horas de vazio [17].

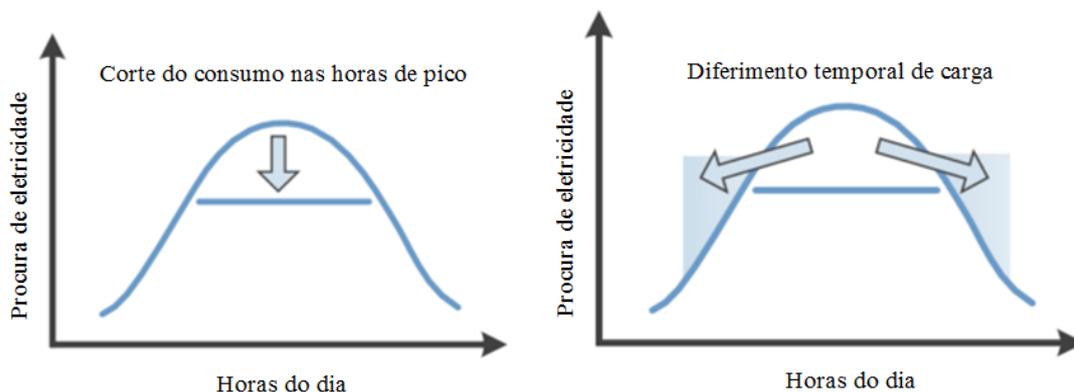


Figura 7: Fenómenos de corte do consumo nas horas de pico (à esquerda) e diferimento temporal da carga (à direita). Adaptado de [17].

Outro conceito semelhante a este é o de corte do consumo nas horas de pico (*peak clipping* em inglês) retratado na Figura 7 à esquerda.

Este fenómeno é induzido pelo pagamento de incentivos aos consumidores para que estes reduzam o seu consumo em horas de ponta [17], sem que, desta vez, recolquem este consumo “perdido” em horas de vazio. Nesta perspetiva existe redução do consumo diário, logo tal procedimento constitui, à partida, uma medida de eficiência energética.

### 2.3. Equipamentos elétricos

Num estudo conduzido em Portugal por Luísa Schmidt, Pedro Prista e Augusta Correia [25], uma amostra de 43 pessoas foi questionada acerca dos equipamentos mais gastadores das suas casas.

Este questionário foi primeiro levado a cabo sem mencionar qualquer tipo de equipamento doméstico, ou seja, sem comprometer a espontaneidade da resposta do inquirido. Foram recolhidas as respostas que são apresentadas na coluna “espontânea” da tabela que se segue e, de seguida, foram “relembrados” alguns equipamentos domésticos como potenciais gastadores. A amostra foi novamente questionada quanto aos equipamentos que achavam ser os mais gastadores sendo que os resultados desta segunda fase do inquérito estão reportados na coluna “induzida” da Tabela 1.

Tabela 1: Excerto dos resultados do inquérito [25] aos equipamentos mais gastadores. Os valores percentuais indicam a percentagem de inquiridos que mencionou o respetivo equipamento.

|                         | Reação induzida | Reação espontânea |                        |
|-------------------------|-----------------|-------------------|------------------------|
| Frigorífico combinado   | 100%            | 88%               | Frigorífico combinado  |
| Telemóvel               | 100%            | 86%               | Máquina de lavar roupa |
| Aspirador               | 98%             | 79%               | Microondas             |
| Iluminação              | 98%             | 79%               | Computador portátil    |
| Micro-ondas             | 98%             | 74%               | Máquina de lavar loiça |
| Máquina lavar roupa     | 98%             | 74%               | Televisão LCD          |
| Batedeira               | 95%             | 61%               | Computador             |
| Ferro de engomar        | 95%             | 58%               | Leitor de dvd          |
| Torradeira              | 95%             | 58%               | Televisão antiga       |
| Leitor dvd              | 91%             | 54%               | Iluminação             |
| Máquina lavar loiça     | 91%             | 54%               | Torradeira             |
| Picadora/varinha mágica | 88%             | 51%               | Forno elétrico         |
| Forno elétrico          | 88%             | 51%               | Aparelhagem hi-fi      |
| Computador portátil     | 88%             | 47%               | Telemóvel              |

Tal como indicado na tabela, cerca de 86% dos inquiridos indicou espontaneamente a máquina de lavar roupa como sendo o equipamento mais gastador do lar. Depois de coagidos, esta percentagem subiu para 98%. O mesmo cenário é observável no que diz respeito à máquina de lavar loiça. Cerca de 91% dos inquiridos indicaram este equipamento de forma induzida. Espontaneamente, este valor ficou-se nos 74%.

Quer tomemos em consideração a versão induzida ou espontânea, a verdade é que as máquinas de lavar ocupam as primeiras posições do *ranking*, o que mostra uma elevada sensibilidade dos consumidores para o quanto estes equipamentos gastam no dia-a-dia. A perceção dos consumidores para os equipamentos mais gastadores foi tida em conta na modelação adotada, uma vez que estes já estão sensibilizados para o quanto um equipamento gasta, o que tornará mais fácil a adoção de medidas de gestão do consumo sobre estes mesmo equipamentos.

Outros equipamentos, tais como o frigorífico ou o micro-ondas, foram ainda mais assinalados pelos inquiridos como sendo os equipamentos mais gastadores. Contudo, e para o propósito desta tese, não será tida em conta esta informação uma vez que nem o frigorífico nem o micro-ondas são equipamentos cujo funcionamento possa ser facilmente reagendado, ou seja, interrompido numas horas e reiniciado noutras.

Foram assinalados 4 equipamentos elétricos sobre os quais serão realizadas medidas de gestão do consumo. São eles as máquinas de lavar roupa e máquinas de lavar loiça (dada a sensibilidade dos consumidores para com estes equipamentos), as máquinas de secar roupa (dada à “semelhança” com os anteriores equipamentos mencionados) e equipamentos para águas quentes sanitárias (AQS).

A informação que se segue foi obtida de uma publicação da DGGE com o título “Eficiência energética em equipamentos e sistemas elétricos no sector residencial” [26].

Esta publicação agregou resultados de monitorizações a 150 habitações realizadas nos últimos anos em Portugal. Uma dessas monitorizações enquadrou-se no projeto EURECO desenvolvido na Europa e com o apoio de várias entidades como foi o caso da EDP (Energia de Portugal) e da ERSE (Entidade Reguladora do Setor Elétrico) [26].

O primeiro objetivo do projeto EURECO foi o de descrever com precisão a estrutura de cada tipo de utilização de eletricidade numa habitação para os seguintes países: Portugal, Dinamarca, Grécia e Itália. Esta recolha de dados – e posterior análise a cargo de França – foi feita com o intuito de futuramente servir como dados de referência de forma a ser possível a projeção de cenários de consumo para os restantes países Europeus, razão pela qual foram escolhidos os 4 países inicialmente referidos – por serem representativos do panorama Europeu. Outro grande objetivo do projeto EURECO foi o de decifrar e avaliar novas tendências de consumos que poderão não ser ainda completamente compreendidas ou que poderão ainda não estar definidas [27].

Os diagramas de carga apresentados neste capítulo referem-se aos consumos do agregado enquanto que os perfis de funcionamento se relacionam ao funcionamento de apenas um equipamento doméstico.

Na Figura 8 estão representados os consumos residenciais no ano 2000 divididos por grupos de equipamentos.

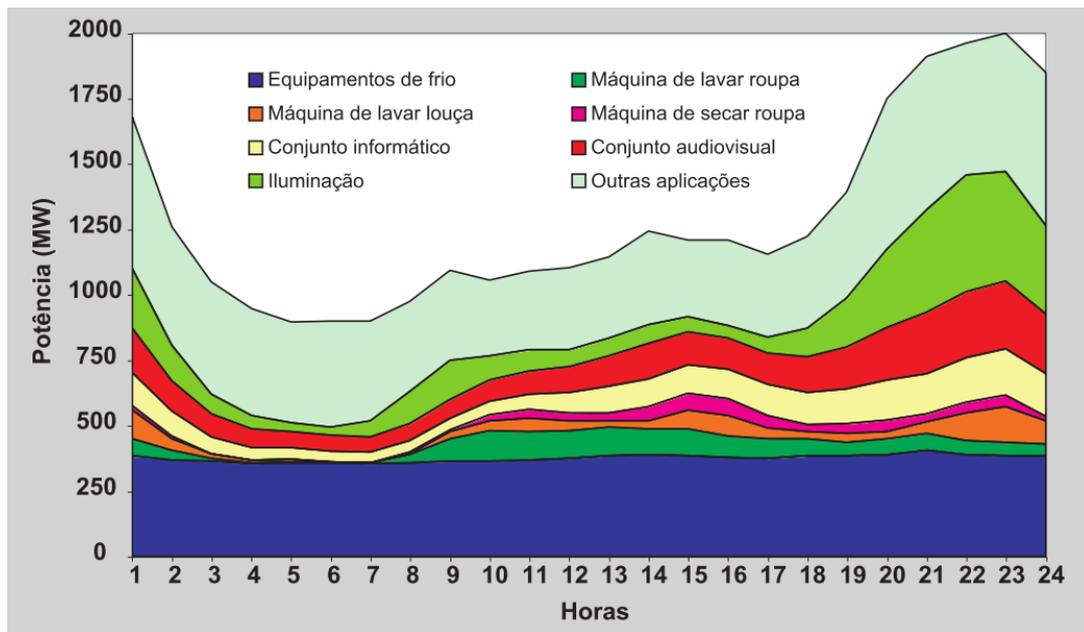


Figura 8: Diagrama de carga dos consumos domésticos agregados em 2000 [26].

As máquinas de lavar roupa demonstram um pico de consumo (Figura 9) perto das 10 horas da manhã antecedido por várias horas em que o funcionamento destes equipamentos é quase nulo (entre as 4 horas e as 7 horas).

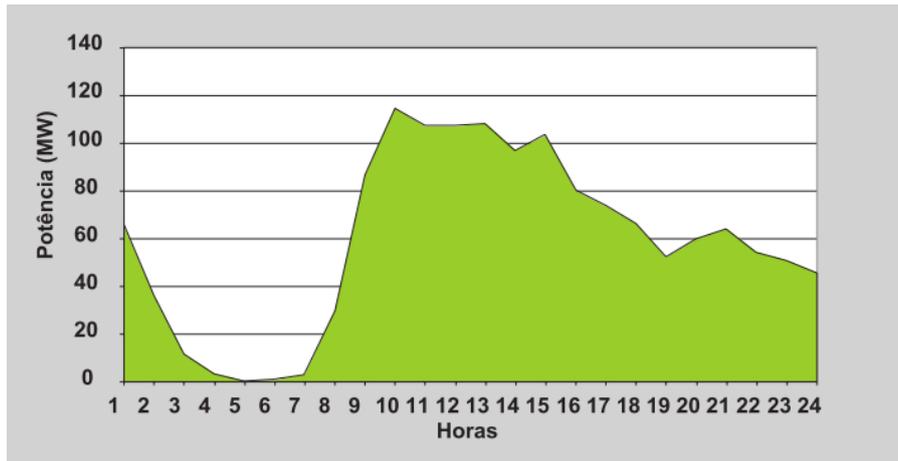


Figura 9: Diagrama de carga das máquinas de lavar roupa [26].

Torna-se evidente o enorme potencial de deslocação do consumo para estas horas onde não existe quase nenhuma carga em funcionamento.

Por outro lado, o perfil de funcionamento de um ciclo típico (Figura 10) mostra que a sua duração é normalmente de 2 horas.

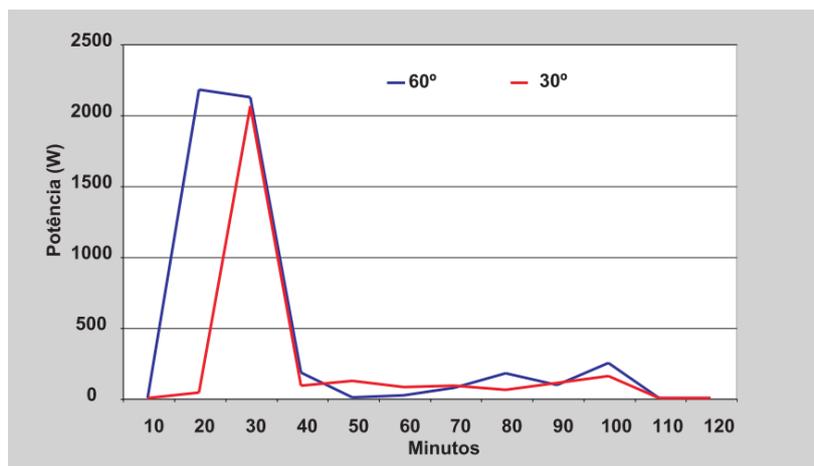


Figura 10: Ciclos típicos de funcionamento de uma máquina de lavar roupa para 2 temperaturas diferentes [26].

Significa isto que o período entre as 4 e as 7 horas era mais do que suficiente para aceitar o consumo vindo das 10 horas, uma vez o consumo mais acentuado deste equipamento demora no máximo apenas meia hora (aquecimento da água).

No Anexo 1 prossegue uma análise aos vários tipos de perfis de consumo dos equipamentos bem como os respetivos diagramas de carga (Figura 35, Figura 36, Figura 37 e Figura 38).

### Capítulo 3 – Elasticidade da procura

Neste capítulo é feita a revisão dos artigos científicos e da documentação técnica que constituem a base metodológica deste trabalho.

Em geral, a sensibilidade da procura de eletricidade do consumidor pode ser representada pela noção de elasticidade [28].

A elasticidade,  $e$ , é caracterizada pela taxa de variação da procura relativamente à taxa de variação do preço a qual se exprime pela equação (1).

$$e = \frac{dD}{dp} \quad (1)$$

Nesta equação,  $D$  representa a procura/consumo de eletricidade e  $p$  representa o preço da eletricidade (ambos adimensionalizados a partir de 2 valores base escolhidos para a adimensionalização). O quociente entre a procura e o preço, desejavelmente, deverá traduzir-se numa elasticidade negativa, desde que se verifique a condição intuitiva de que quando o preço aumenta ( $dp > 0$ ), a procura diminui ( $dD < 0$ ) e vice-versa. [28].

A análise anterior é feita considerando um mesmo instante  $t$  do tempo. Ou seja, a procura em  $t$ ,  $D_t$ , depende apenas do respetivo preço nesse mesmo instante,  $p_t$ . Desta forma, o conceito que melhor traduz esta dependência é o de autoelasticidade, definido pela equação (2) [28].

$$e_{tt} = \frac{dD_t}{dp_t} \quad (2)$$

Contudo, é ainda possível fazer uma análise semelhante mas considerando a influência que a variação do preço num instante  $t'$  tem perante a procura da energia atual, em  $t$ . Nesta situação,  $t$  e  $t'$  pertencem a um período de tempo denominado por  $T$  sendo ainda assumido que  $t \neq t'$ . Este novo conceito é o de elasticidade cruzada sendo definida pela equação (3) [28].

$$e_{tt'} = \frac{\partial D_t}{\partial p_{t'}} \quad \forall t, t' \in T, t \neq t' \quad (3)$$

Ao contrário da autoelasticidade, este novo coeficiente deverá apresentar um valor positivo ou nulo. Isto porque a redução do preço em  $t'$  induz, teoricamente, uma redução da procura de energia em  $t$  e vice-versa. Por outro lado, considera-se  $e_{tt'} = 0$  quando os consumidores não têm conhecimento da evolução futura do preço e, portanto, são indiferentes a essas variações. De salientar ainda a introdução da derivada parcial, uma vez que a procura em  $t$  não depende exclusivamente – como no caso da autoelasticidade – do preço no mesmo instante. Neste caso, a procura em  $t$  pode depender, tanto do preço em  $t$ , como do preço noutros instantes pertencentes a  $T$ .

Embora a definição do conceito de elasticidade seja bastante simples, realizar uma estimativa do seu valor não é fácil, isto porque na realidade o consumo não depende apenas do preço da eletricidade, mas também de outros fatores. Por exemplo, o número de pessoas que está numa habitação e as suas entradas e saídas de casa, bem como o estado do tempo [20].

Um estudo realizado pela Summit Blue Consulting, LLC no ano de 2008 [20], calcula o consumo recorrendo à equação (4).

$$\ln(y_{it}) = \alpha_i + \rho \ln(\text{price}_t) + \beta x_{it} + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

Nesta equação:

$\ln(y_{it})$  refere-se ao logaritmo natural do consumo de eletricidade de uma habitação  $i$  durante a hora  $t$ .

$\alpha_i$  representa uma constante estimada que caracteriza a habitação  $i$ .

$\rho$  é a elasticidade.

$\ln(\text{price}_t)$  refere-se ao logaritmo natural do preço da eletricidade na hora  $t$ .

$\beta$  é um vetor de coeficientes estimados.

$x_{it}$  é um vetor de variáveis que representa fatores que causam variações no consumo de eletricidade na habitação  $i$  durante a hora  $t$  (ex.: estado do tempo).

$\varepsilon_{it}$  representa o erro associado ao consumo na habitação  $i$  durante a hora  $t$ .

Ou seja, são várias as variáveis intervenientes no cálculo bem como a complexidade que cada uma delas. No entanto, e como medida de simplificação, o conceito de autoelasticidade e elasticidade cruzada considerados serão aqui aplicados recorrendo às equações (2) e (3).

### 3.1. Conceito de matriz de elasticidade

É possível construir-se uma matriz de coeficientes de elasticidade,  $E$ , de dimensão  $T \times T$  – sendo  $T$  o intervalo de tempo máximo considerado, por exemplo, 24 horas – e que é representada pela equação (5) [28].

$$E = [e_{tt'}] \tag{5}$$

De uma forma explícita têm-se que:

$$E = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & e_{14} & \cdots & e_{1T} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & e_{24} & \cdots & e_{2T} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & e_{34} & \cdots & e_{3T} \\ e_{41} & e_{42} & e_{43} & e_{44} & \cdots & e_{4T} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{T1} & e_{T2} & e_{T3} & e_{T4} & \cdots & e_{TT} \end{bmatrix}$$

Consideremos o coeficiente  $e_{11}$ : Este coeficiente traduz o quanto que a procura pela eletricidade varia em  $t=1$  quando o preço varia em  $t'=1$ . Ora, neste exemplo,  $t$  e  $t'$  são iguais. Quer isto dizer que estamos a retratar um mesmo instante. “Se o preço nesta hora variar  $x$ , quanto irá variar a procura de eletricidade nesta mesma hora?” Esta é uma característica inerente a qualquer um dos coeficientes da diagonal principal. Por facilidade de linguagem, será considerado daqui em diante que  $t$  e  $t'$  representam horas do dia. Por exemplo, o coeficiente  $e_{33}$  traduz o quanto que a procura varia na hora 3 consoante a variação de preço (também) na hora 3. Conclui-se, portanto, que todos os coeficientes de autoelasticidade (CAE) caracterizados no começo deste capítulo se situam na diagonal principal.

Por outro lado, os elementos fora da diagonal principal, quer se situem acima ou abaixo da mesma, representam os coeficientes de elasticidade cruzada (CEC). Estes coeficientes são caracterizados por 2 subintervalos de tempo distintos, ao contrário do que acontece nos coeficientes de autoelasticidade. Por exemplo, o elemento  $e_{14}$  traduz-se pela variação da procura a hora 1 com base na variação de preço na hora 4. Quando este elemento é não-nulo significa que o consumidor é sensível a variações de preço futuras e, por isso, toma a decisão de antecipar os seus consumos. Por outro lado, é também possível que os consumidores desejem adiar os seus consumos. Nessa perspetiva, o coeficiente  $e_{43}$  traduz a variação de procura na 4ª hora com base na variação de preço ocorrida na 3ª hora.

Com estes exemplos, seguem-se algumas definições importantes [28] e imprescindíveis para o entendimento dos capítulos seguintes: a matriz de elasticidades é composta por vários elementos, sendo cada um deles representativo de 1 subintervalo de tempo (no caso de  $t=t'$ ) ou de 2 subintervalos de tempo distintos ( $t \neq t'$ ). Na primeira situação, estamos na presença de coeficientes de autoelasticidade que se situam na diagonal principal. A segunda situação representa os coeficientes de elasticidade cruzada que se encontram em toda a matriz exceto na diagonal principal.

Entende-se também que a existência de elementos não-nulos (e positivos) acima da diagonal principal traduz um consumidor predisposto a antecipar os seus consumos quando existem evidências de que futuramente o preço da eletricidade irá aumentar. “A eletricidade subirá x cêntimos às 10 horas. O consumidor decide colocar a máquina de lavar loiça a funcionar às 8h embora, por norma, coloque a funcionar as 10h.” Por outro lado, os elementos não-nulos – e que por definição deverão ser positivos – abaixo da diagonal principal traduzem um consumidor predisposto a adiar os seus consumos. “A eletricidade subirá x cêntimos às 10 horas. O consumidor decide iniciar o seu funcionamento mais tarde, às 21h.”

Por fim, quanto mais dispersos estiverem os coeficientes não nulos para os lados da diagonal principal, maior é a flexibilidade do consumidor em reagendar os seus consumos. Por exemplo, um consumidor que saiba que o preço da eletricidade subirá às 7h e reagenda os seus consumos para as 22h tem uma maior flexibilidade do que um consumidor que face ao mesmo conhecimento, reagenda os seus consumos para as 9h”.

Uma outra condicionante das elasticidades é o perfil do consumidor, ou seja, a sua predisposição para participar na gestão e consumos e o modo como o gere.

Neste sentido, em [28] os autores criaram 5 categorias de consumidores, cada um com um perfil de consumo distinto com o intuito de testar a reação que cada perfil de consumidor tinha quando exposto a RTP.

O primeiro bloco definido é o bloco de consumidores de longo espectro (do inglês *long range*) que os autores caracterizam como tendo total controlo sobre os seus consumos e sobre o quanto pagam pela energia. Ou seja, quer isto dizer que todos os equipamentos capazes de serem agendados são programados para horas específicas do dia conforme o preço que os seus utilizadores estão dispostos a pagar. Analisando a matriz de elasticidades considerada neste artigo, para este bloco verifica-se que estes consumidores exercem o total controlo no funcionamento dos seus equipamentos, sendo capazes de adiar consumos ou até mesmo de os antecipar (Figura 11).

[E] =

|      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| -0,5 | 0,2  | 0,05 | 0,05 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 |
| 0,05 | -0,5 | 0,2  | 0,05 | 0,05 | 0,02 | 0,02 | 0,01 |
| 0,02 | 0,05 | -0,5 | 0,2  | 0,05 | 0,05 | 0,02 | 0,02 |
| 0,02 | 0,02 | 0,05 | -0,5 | 0,2  | 0,05 | 0,05 | 0,02 |
| 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,05 | -0,5 | 0,2  | 0,05 | 0,05 |
| 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,05 | -0,5 | 0,2  | 0,05 |
| 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,05 | -0,5 | 0,2  |
| 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,05 | -0,5 |

Figura 11: Matriz de elasticidade para consumidores de longo espectro [28].

Numa perspetiva contrária, outro bloco de consumidores, são os consumidores não planeadores (de *spot rational*) que decidem se querem consumir, ou não, conforme o preço da energia

naquele mesmo instante. Neste sentido, não existe intenção de agendamento de cargas, pelo que os coeficientes de elasticidade cruzada deverão ser todos nulos.

Na esperança de conseguir modelar o comportamento dos consumidores o mais próximo possível da realidade, os autores criaram um terceiro bloco de consumidores do “mundo real” (do inglês *real world*). Este bloco subdivide-se em 3 tipologias de consumidor. O primeiro é o tipo de consumidor que toma as suas decisões consoante o preço atual e os preços dos 2 intervalos de tempo seguintes. Ou seja, é um consumidor que, com o conhecimento da evolução dos preços da energia no futuro (e na perspetiva de aumento), antecipa os seus consumos. Deste modo, a sua matriz é composta por zeros abaixo da diagonal principal. Acima da diagonal principal, têm-se elementos não-nulos correspondentes às duas horas seguintes e têm-se todos os outros elementos nulos que ficam fora do espetro de alcance deste tipo de consumidor. A Figura 12 mostra a matriz de elasticidade para esta tipologia de consumo.

$$[E] = \begin{bmatrix} -0,5 & 0,2 & 0,05 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,5 & 0,2 & 0,05 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,5 & 0,2 & 0,05 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,5 & 0,2 & 0,05 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,5 & 0,2 & 0,05 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,5 & 0,2 & 0,05 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,5 & 0,2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,5 \end{bmatrix}$$

Figura 12: Matrizes de elasticidade da 1ª tipologia de consumidores do “mundo real” [28].

Em contrapartida, os consumidores do “mundo real”, 2ª tipologia, (Figura 13) tomam em consideração os preços de 2 intervalos de tempo anteriores e o preço atual. Assim, estes consumidores são caracterizados por adiarem os consumos elétricos.

$$[E] = \begin{bmatrix} -0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,2 & -0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,05 & 0,2 & -0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,05 & 0,2 & -0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,05 & 0,2 & -0,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,05 & 0,2 & -0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,05 & 0,2 & -0,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,05 & 0,2 & -0,5 \end{bmatrix}$$

Figura 13: Matriz de elasticidades da 2ª tipologia de consumidores do “mundo real” [28].

Por último, os consumidores do “mundo real”, 3ª tipologia, (Figura 14) são os consumidores que consideram os preços passados e futuros, bem como o preço atual. São uma conjugação das anteriores 2 tipologias de consumidores. Contudo, o seu espetro de atuação não é tão largo quanto os de longo espetro. Ou seja, continuam a cingir-se aos 2 intervalos de tempo anteriores e posteriores, bem como ao tempo atual.

[E] =

|      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| -0,5 | 0,2  | 0,05 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 0,2  | -0,5 | 0,2  | 0,05 | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 0,05 | 0,2  | -0,5 | 0,2  | 0,05 | 0    | 0    | 0    |
| 0    | 0,05 | 0,2  | -0,5 | 0,2  | 0,05 | 0    | 0    |
| 0    | 0    | 0,05 | 0,2  | -0,5 | 0,2  | 0,05 | 0    |
| 0    | 0    | 0    | 0,05 | 0,2  | -0,5 | 0,2  | 0,05 |
| 0    | 0    | 0    | 0    | 0,05 | 0,2  | -0,5 | 0,2  |
| 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,05 | 0,2  | -0,5 |

Figura 14: Matriz de elasticidades da 3ª tipologia de consumidores do “mundo real” [28].

## Capítulo 4 – Modelação do comportamento dos consumidores e do funcionamento das cargas

Pretende-se com este capítulo explicitar as principais etapas da modelação do comportamento dos consumidores, que foi feita em MATLAB, bem como clarificar todos os critérios utilizados.

O maior objetivo desta modelação foi o de estudar o comportamento dos consumidores domésticos em 2020 sob a forma de cenários.

O primeiro pressuposto que se assumiu foi o de que os consumidores estariam expostos a tarifas do tipo TOU. O comportamento dos consumidores que se quis modelar foi de que forma estes poderão vir a gerir as suas cargas (gestão do consumo) não prioritárias quando expostos a estas tarifas. Tendo já o conhecimento de como se distribuem este tipo de consumos pelo dia foram testadas algumas movimentações de consumos entre vários períodos de preços com o objetivo de provocar o fenómeno de diferimento de carga já mencionado anteriormente. Este fenómeno foi fomentado não só pelos valores absolutos de preços da eletricidade como também pelas suas variações (aumento/diminuição do preço de eletricidade).

O procedimento aqui explicitado não teve com vista a diminuição do consumo elétrico por parte dos consumidores, mas sim o reagendamento de alguns consumos para diferentes horas do dia mais aliciantes em termos de preço. Isto significa que ao longo deste trabalho não haverá qualquer intenção de introduzir medidas de eficiência energética local – embora seja previsível o aumento da eficiência global do sistema eletroprodutor – e, como tal, o consumo diário depois deste procedimento deverá ser igual ao observado antes da implementação deste mesmo procedimento.

### 4.1. Dados iniciais

O processo de modelação começa pelo conhecimento dos preços da energia do mercado do MIBEL bem como do perfil de consumos programáveis. Foram coletados os preços horários da energia do MIBEL para todo o ano de 2014. Esta recolha fez-se a partir dos dados publicados pelo OMIE – operador do polo espanhol do mercado ibérico. Foram entretanto obtidas as médias horárias de todos os preços do ano de forma a se obter o perfil diário de preços, armazenando num vetor de 24 linhas, cada uma delas com o preço médio da eletricidade na respetiva hora.

Com vista a estabelecer uma aproximação do modo como os consumidores podem, ou não, manipular parte dos seus equipamentos elétricos, torna-se imperativo conhecer o comportamento dos equipamentos e da distribuição dos seus consumos ao longo do dia. A obtenção de dados relativos aos perfis de funcionamento e períodos de operação dos equipamentos domésticos teve como ponto de partida os diagramas de carga horários reportados na brochura editada no âmbito da Iniciativa Pública “ Eficiência Energética nos Edifícios” (P3E), promovida pela Direção Geral de Geologia e Energia [26] apresentados no subcapítulo 2.3 e nos Anexo 1. Tal como referido anteriormente, os consumos programáveis considerados para a modelação foram as máquinas de lavar roupa e loiça, as máquinas de secar roupa e AQS elétrico. Estes quatro grupos de equipamentos representam os equipamentos que foram considerados como cargas cujo funcionamento poderá ser gerido pelos consumidores mais facilmente – sem diminuição da qualidade de vida, nem perturbações significativas. Serão daqui em diante apelidados de consumos NP (não prioritários).

Tanto o consumo como o preço da eletricidade foi adimensionalizados pelo consumo e preço máximos observáveis, respetivamente. As equações (6) e (7) traduzem este processo.

$$\text{Consumo adimensionalizado } (t) = \frac{\text{Consumo } (t)}{\max(\text{Consumo})} \quad (6)$$

$$\text{Preço adimensionalizado } (t) = \frac{\text{Preço } (t)}{\max(\text{Preço})} \quad (7)$$

Inicialmente foram distinguidos e criados 3 períodos de preços baseados nos respetivos preços. Estes períodos de preços foram identificados como “horas de preços altos”, “horas de preços baixos” e “horas de preços intermédios”. Esta definição assumiu que horas de preços altos deveriam ser todas as horas que demonstrassem um preço de eletricidade 20% superior à média do dia. Por outro lado, horas com preços 20% abaixo da média recairiam no período de horas de preços baixos. As restantes horas, por exclusão de partes, foram incluídas no período de horas de preços intermédios.

## **4.2. Considerações procedimentais**

Este capítulo dedicar-se-á a esclarecer e justificar algumas considerações inerentes ao processo de reagendamento do funcionamento dos equipamentos. Posteriormente serão explicadas todas as etapas do processo.

### **4.2.1. Reagendamento de cargas: Blocos de movimentações dos consumos**

Uma vez que este trabalho se propôs a modelar a gestão dos consumos domésticos, foram considerados 3 períodos de preços (já mencionados anteriormente) nos quais se movimentou consumos – entenda-se por movimentação de consumos, o reagendamento do funcionamento dos equipamentos elétricos não prioritários para horas atípicas de consumo.

Atendendo a que os consumidores, em teoria, só alteram os seus hábitos de consumos face a um potencial benefício económico, considerou-se que os consumos se poderiam movimentar em 2 grandes blocos – o bloco de movimentações entre horas do mesmo período de preço e o bloco de movimentações entre horas de diferentes períodos de preços. Sendo que cada um destes blocos alberga 3 fases de movimentações de consumos que serão explicadas mais adiante.

O primeiro bloco de movimentações pretende, em teoria, ser apelativo a consumidores que não querem alterar os seus hábitos de consumo mas que estão recetivos a reagendar os seus equipamentos para funcionarem em horas adjacentes à hora (pertencentes ao mesmo período de horas) em que normalmente colocam o equipamento a funcionar, em troca de um pequeno benefício económico.

Considerando o exemplo da Figura 15 em que se observa o funcionamento típico de uma máquina de secar roupa (MSR) às 10 horas. Por ação de um incentivo económico, o consumidor decide colocar a máquina a funcionar às 12 horas. Este é o exemplo assinalado a amarelo. A Figura 15 esquematiza não só a movimentação de consumo descrita como também outros possíveis reagendamentos deste bloco de movimentações.



Figura 15: Exemplos das movimentações de uma máquina de lavar roupa (MLR), uma máquina de lavar loiça (MLL) e uma máquina de secar roupa (MSR) entre horas pertencentes aos mesmos períodos de preços. As setas representam a movimentação de consumo da hora de origem para a hora destino.

Neste caso existe um reagendamento de funcionamento dentro do mesmo período de preço – significa que os preços neste período estão dentro de um mesmo intervalo médio de preços, contudo cada hora terá o seu preço e, por isso, continuará a haver horas mais apelativas economicamente do que outras, resultando neste caso numa poupança para o consumidor.

Este bloco de movimentações de consumo remete-nos para 3 fases de movimentações (assinaladas numericamente na figura junto às setas):

- 1ª Fase: Movimentações de consumos nas horas de preços altos;
- 2ª Fase: Movimentações de consumos nas horas de preços intermédios;
- 3ª Fase: Movimentações de consumos nas horas de preços baixos.

Estas movimentações foram feitas com o intuito de caracterizar os elementos da diagonal principal da matriz de elasticidades – coeficientes de autoelasticidade. Isto porque o cálculo baseou-se no quanto o consumo diminuía/aumentava conforme o preço aumentava/diminuía numa mesma hora. Para além disso, e como o consumo foi realocado, foram calculados ainda alguns coeficientes de elasticidade cruzada que traduziram o quando o consumo variou na hora de origem do consumo em função do preço da hora de destino do consumo.

Estas movimentações de consumos seguiram um modelo que se regeu exclusivamente pelo benefício económico do consumidor. Ou seja, os consumos, embora tenham sido transitados dentro de um mesmo período de preço, foram sempre movidos para horas de preço menor do que o preço da hora de origem.

O segundo bloco de movimentações pretende, em teoria, ser apelativo a consumidores que não têm qualquer impedimento em transitar o funcionamento dos seus equipamentos para qualquer outro horário diferente do habitual – conseguindo desta forma maximizar as poupanças. Contudo, e se o objetivo primordial para o consumidor é o de poupar, não fará sentido movimentar o funcionamento de uma máquina de lavar loiça das 10h para as 20h (uma vez que as 20 horas pertencem ao bloco de horas mais caras). Tomemos em consideração o exemplo da Figura 16.

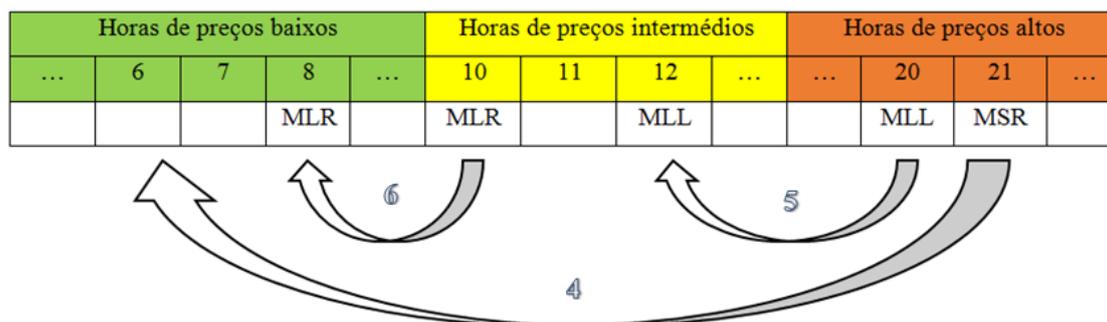


Figura 16: Exemplos das movimentações de uma máquina de lavar roupa (MLR), uma máquina de lavar loiça (MLL) e uma máquina de secar roupa (MSR) entre horas pertencentes a diferentes períodos de preços. As setas representam a movimentação de consumo da hora de origem para a hora destino.

Este bloco de movimentações de consumo remete-nos para mais 3 fases de movimentações (assinaladas numericamente na figura junto às setas):

- 4ª Fase: Movimentação do consumo de horas de preços altos (horas dadoras de consumo) para horas de preços baixos (horas recetoras de consumo);
- 5ª Fase: Movimentação do consumo de horas de preços altos (horas dadoras de consumo) para horas de preços intermédios (horas recetoras de consumo);
- 6ª Fase: Movimentação do consumo de horas de preços intermédios (horas dadoras de consumo) para horas de preços baixos (horas recetoras de consumo);

Estas movimentações de consumos possibilitaram o preenchimento de mais alguns elementos da matriz de elasticidades – coeficientes de elasticidades cruzadas.

A Figura 17 resume as etapas relativas às movimentações de consumos.

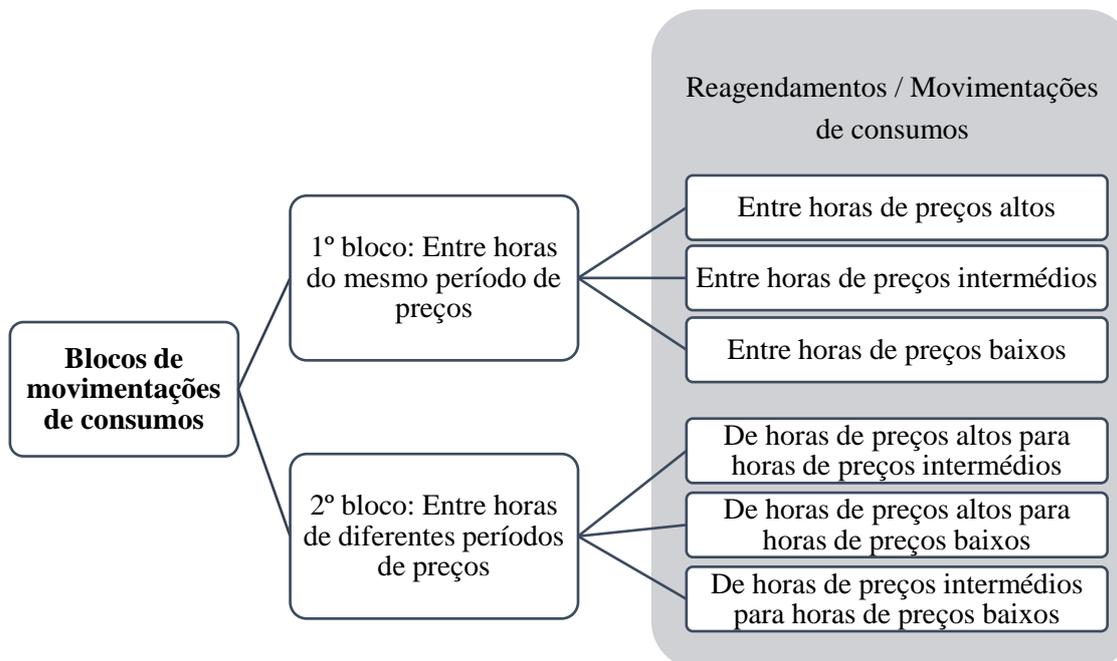


Figura 17: Figura explicativa das movimentações de consumos que ocorreram de acordo com a modelação desenvolvida (blocos de movimentações).

#### 4.2.2. Cenários: Percentagem horária de gestão de consumo

Partindo este trabalho maioritariamente de pressupostos e condicionantes assumidos como verdadeiros, tornou-se necessária a criação de diversos cenários hipotéticos – daqui surgiram 3 cenários.

Os cenários foram criados com o intuito de mostrar uma variedade de resultados e perspetivas para 2020. A cenarização baseou-se na criação de 3 tipologias de consumidores, cada uma delas com uma perspetiva de atuação diferente sobre os seus consumos.

Foram considerados o cenário A (consumidores de curto alcance - CCA), cenário B (consumidores de longo alcance - CLA) e cenário C (consumidores “inteligentes” - CI).

Para os consumidores de curto alcance foi admitido que as movimentações de consumo apenas ocorriam sob as primeiras 3 fases descritas, ou seja, estes consumidores apenas são sensíveis a variações de preços dentro do seu curto espectro de atuação que é restrito a um grupo de horas adjacentes àquela em que se encontram. Por esta razão a percentagem de DR nas primeiras 3 fases serão mais elevadas em comparação às outras três fases. Sendo que a 4ª fase terá uma taxa de gestão de consumo nula uma vez que é a fase de movimentações de consumo em que o espetro temporal é maior.

Por outro lado, os consumidores de longo alcance são aqui caracterizados por apenas adotarem ações de gestão de consumo quando o benefício económico é mais significativo, ou seja, quando as movimentações de consumo se repercutem numa poupança mais significativa relativamente aos consumidores de curto alcance. Por esta razão, esta tipologia de consumidores atua sob as 3 últimas fases de movimentações de consumos com uma maior expressividade comparativamente com as primeiras 3 fases – sendo que na 3ª fase a percentagem de DR é nula dado o diminuto benefício económico espectável destas movimentações de consumo.

Os consumidores “inteligentes” foram definidos com base nas duas tipologias de consumidores definidos anteriormente, traduzindo-se assim num perfil de consumo que pretende beneficiar das pequenas poupanças obtidas das movimentações de 1ª, 2ª e 3ª fases, como também beneficiar das poupanças das últimas 3 fases.

A Tabela 2 explicita as percentagens de adesão ao DR de cada uma das fases de movimentações de consumos para as 3 tipologias de consumidores definidos.

Tabela 2: Percentagens de DR consoante as fases de movimentações de consumos e o cenário considerado (tipologia de consumidor)

|                    | 1ª Fase | 2ª Fase | 3ª Fase | 4ª Fase | 5ª Fase | 6ª Fase |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Cenário A<br>(CCA) | 0,8     | 0,8     | 0,8     | 0       | 0,1     | 0,1     |
| Cenário B<br>(CLC) | 0,1     | 0,1     | 0       | 1       | 0,8     | 0,8     |
| Cenário C<br>(CI)  | 0,8     | 0,8     | 0,8     | 1       | 0,8     | 0,8     |

As movimentações de consumos ( $C'$ ) calcularam-se multiplicando a taxa de adesão pela percentagem de gestão do consumo. Por exemplo, considerando o cenário A e uma movimentação de 3ª fase, o consumo ( $C$ ) a ser transitado da hora 'i' será dado por  $C$ , equação (8):

$$C'_i = C_i \times 80\% = 21\% \quad (8)$$

### 4.2.3. Número de horas recetoras

Como visto no capítulo 2.3 – considerando ainda a parte da informação remetida para anexos (Anexo 1) – os equipamentos considerados na modelação demonstram ciclos de funcionamento não inferiores a 1 hora. Desta forma, antes de dividir as horas em grupos (horas dadoras ou horas recetoras) foram escrutinadas as horas com potencial para serem horas recetoras e eliminaram-se todas as horas isoladas. Isto significa que, por exemplo, se as 7h fosse uma hora com potencial para ser hora recetora de consumo mas a hora 8 não o fosse, então a hora 7 será automaticamente eliminada no grupo de horas recetoras. Isto fez-se com o intuito de evitar que a movimentação de consumo se fizesse para uma hora de preço apelativo mas que parte desse consumo, devido à duração do ciclo de funcionamento, recaísse na hora seguinte (hora com um preço de eletricidade superior).

### 4.2.4. Extrapolação dos consumos a valores de 2020

Para a extrapolação de dados de consumo de 2000 para valores de consumo de 2020 consideraram-se os valores históricos do produto interno bruto (PIB) bem como do consumo doméstico ao longo dos anos.

Começou-se por calcular a taxa de crescimento (TC) do PIB entre 2000 e 2010 bem como a taxa de crescimento do consumo doméstico entre os mesmos anos. O cálculo seguinte exemplifica o procedimento (9).

$$TC(PIB)_{2000 \rightarrow 2010} = \frac{PIB_{2010}}{PIB_{2000}} - 1 \quad (9)$$

O PIB *per capita* [29] de 2000 e de 2010, os consumos domésticos [30] para os mesmos anos e as TC calculadas estão indicados na Tabela 3.

Tabela 3: PIB *per capita* [29] e consumo doméstico em 2000 e 2010 e respetivas taxas de crescimento.

| Ano  | PIB <i>per capita</i> (€) | Consumo (TWh) |
|------|---------------------------|---------------|
| 2000 | 12484,7                   | 10,1          |
| 2010 | 17017,7                   | 14,5          |
| TC   | 36%                       | 44%           |

Com estes primeiros cálculos conclui-se que por cada 1% de aumento do PIB, o consumo aumenta cerca de 1,21% – esta é a relação de proporcionalidade (RP) que foi assumida entre estes indicadores.

De seguida, sabendo uma previsão do PIB de Portugal em 2020 [31], foi calculada a previsível taxa de crescimento do PIB (Tabela 4) entre 2010 e 2020 de igual forma como a descrita anteriormente.

Tabela 4: PIB *per capita* em 2010 e 2020, respetiva TC e consumo doméstico em 2010.

| Ano  | PIB <i>per capita</i> (€) | Consumo (TWh) |
|------|---------------------------|---------------|
| 2010 | 17017,7                   | 14,5          |
| 2020 | 17255,5                   |               |
| TC   | 1,4%                      | ?             |

Uma vez calculada a taxa de crescimento do PIB entre os anos de 2010 e 2020, multiplicou-se o resultado pela relação de proporcionalidade segundo a equação (10), de forma a obter a TC do consumo entre os anos de 2010 e 2020:

$$TC(\text{consumo})_{2010 \rightarrow 2020} = TC(\text{PIB})_{2010 \rightarrow 2020} \times RP \quad (10)$$

Obtendo-se o seguinte resultado:

$$TC(\text{consumo})_{2010 \rightarrow 2020} = 1,4\% \times 1,21\% \Leftrightarrow TC(\text{consumo})_{2010 \rightarrow 2020} \cong 1,7\%$$

O resultado é expresso na Tabela 5.

Tabela 5: PIB *per capita* para os anos de 2010 e 2020, consumos domésticos para 2010 e respetivas TC.

| Ano  | PIB <i>per capita</i> (€) | Consumo (TWh) |
|------|---------------------------|---------------|
| 2010 | 17017,7                   | 14,5          |
| 2020 | 17255,5                   | ?             |
| TC   | 1,4%                      | 1,7%          |

De seguida, e uma vez que é conhecida a taxa de crescimento do consumo entre 2010 e 2020, procedeu-se ao cálculo do consumo estimado em 2020 (11):

$$\begin{aligned} Consumo_{2020} &= [TC(\text{consumo})_{2010 \rightarrow 2020} + 1] \times Consumo_{2010} \\ Consumo_{2020} &= (1,7\% + 1) \times 14,5 \Leftrightarrow Consumo_{2020} \cong 14,7 \text{ TWh} \end{aligned} \quad (11)$$

Finalmente são conhecidos os consumos de eletricidade em 2000 (verificados) e 2020 (estimados) e assim foi possível o cálculo da do consumo previsível até 2020, recorrendo à equação (12).

$$TC(\text{PIB})_{2000 \rightarrow 2020} = \frac{Consumo_{2020}}{Consumo_{2000}} - 1 \quad (12)$$

O resultado vem descrito na Tabela 6.

Tabela 6: Consumo doméstico em 2000 [26], 2010 e 2020 e TC entre 2000 e 2020.

| Ano                    | Consumo (TWh) |
|------------------------|---------------|
| 2000                   | 10,1          |
| 2010                   | 14,5          |
| 2020                   | 14,7          |
| TC (entre 2010 e 2020) | 47%           |

Assim, o cálculo para a taxa de crescimento do consumo entre 2010 e 2020 ficou em 47%. Recorrendo a esta taxa de crescimento estimada foi possível projetarem-se os consumos em 2020, multiplicando os resultados obtidos da modelação por 1,47%. A Figura 18 ilustra esta extrapolação dos consumos de 2000 para consumos de 2020.

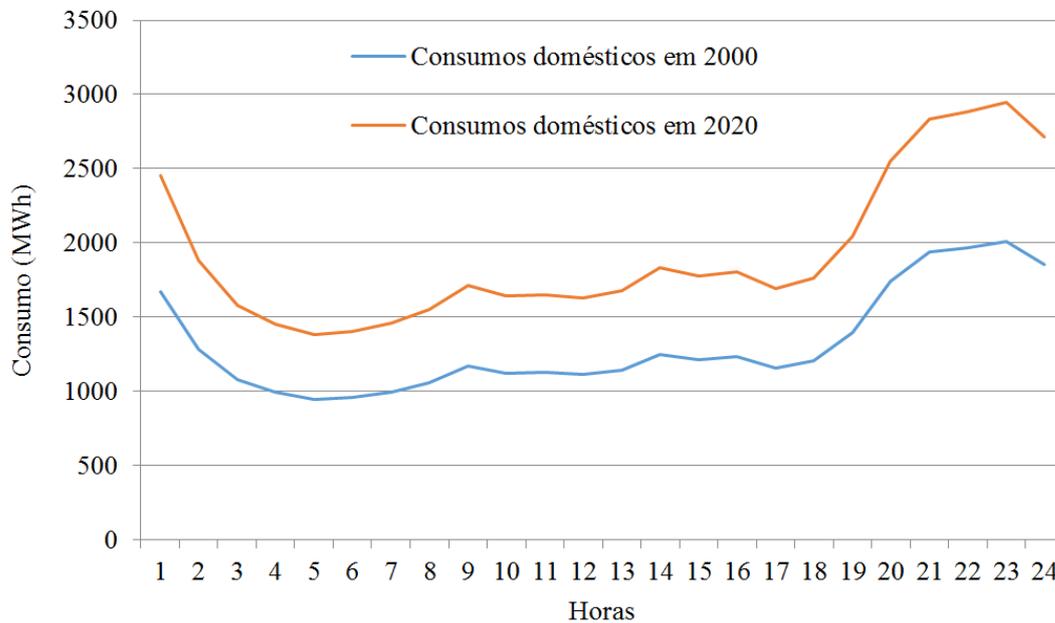


Figura 18: Comparação entre o consumo doméstico do agregado verificado em 2000, adaptado de [26] e o consumo previsto para 2020.

### 4.3. Metodologia

Tendo já descritas as considerações procedimentais mais minuciosas, os seguintes subcapítulos descrevem o procedimento geral da modelação.

#### 4.3.1. Movimentações entre horas do mesmo período de preços

As movimentações entre horas do mesmo período de preços decorreram em 3 fases, tal como já mencionado:

- 1ª Fase - Movimentações de consumos nas horas de preços altos;
- 2ª Fase - Movimentações de consumos nas horas de preços intermédios;
- 3ª Fase - Movimentações de consumos nas horas de preços baixos.

Em qualquer uma das fases, foram distinguidas dois grupos de horas – as horas dadoras de consumo e as horas recetoras de consumo. De entre o período de horas em questão calculou-se a média dos preços. Assumiu-se que, horas com preços abaixo deste valor seriam horas recetoras de consumo e que horas com preços acima da média seriam consideradas horas dadoras.

Seguiu-se uma categorização das horas de cada um dos grupos. Este processo atribuirá um valor a cada hora que irá representar a atratividade (preços menores) – para o caso das horas recetoras – ou não atratividade da hora (preços elevados) – para o caso das horas dadoras – em função do preço.

A categorização será feita entre o algarismo 1 a 3 para as horas dadoras e para as horas recetoras.

Para além disso, o algarismo 1 indicará, dentro das horas recetoras, a hora com o preço mais apelativo para o consumidor (mais barato) e o algarismo 3 traduzirá uma hora com um preço menos atrativo.

De entre as horas dadoras, o algarismo 1 traduzir-se-á por uma hora crítica em termos de preço (preço muito elevado). Horas de categoria 2 e 3 serão horas de preços progressivamente inferiores.

Após esta categorização, realizaram-se as movimentações de consumos entre horas da mesma categoria e pertencentes ao mesmo período de preço. Em todas as movimentações foram guardados registos das horas dadoras, das horas recetoras e quanto do consumo foi transitado entre esse par de horas. Desta forma foi possível calcular-se os coeficientes de autoelasticidade, bem como alguns dos coeficientes de elasticidade cruzada – embora o objetivo fosse o de caracterizar os coeficientes de autoelasticidade, e uma vez que se transitaram consumos entre horas diferentes, acabou-se também por caracterizar alguns coeficientes de elasticidade cruzada.

A transição de consumos deu-se entre horas da mesma categoria numérica. Segue-se um exemplo na Tabela 7:

Tabela 7: Exemplo da categorização de horas dadoras e horas recetoras.

| Horas recetoras | Preços | Categoria | Horas dadoras | Preços | Categoria |
|-----------------|--------|-----------|---------------|--------|-----------|
| 3               | 20,20  | 3         | 6             | 18,25  | 3         |
| 4               | 17,80  | 2         | 7             | 23,99  | 1         |
| 5               | 16,11  | 1         | 8             | 24,91  | 1         |

Segundo o exemplo da tabela, e a categorização feita, uma percentagem do consumo das horas 7 e 8 será transitado para a hora 5 (uma vez que pertencem à mesma categoria). Tendo assim o consumo em horas mais críticas passado para a hora mais barata de todas. Por outro lado, uma percentagem do consumo da 6ª hora será movida para a hora 3.

O cálculo dos coeficientes de autoelasticidade foi feito com base na equação (13):

$$e_{tt} = \frac{\text{Variação do consumo}_t}{\text{preco}_t - \text{preco}_{t-1}} \quad (13)$$

O cálculo dos coeficientes de elasticidade cruzada foi feito recorrendo à equação (14):

$$e_{tt'} = \frac{\text{Variação do consumo}_t}{\text{preco}_{t'} - \text{preco}_t} \quad (14)$$

Segue-se um diagrama que ilustra o procedimento anteriormente descrito Figura 19.

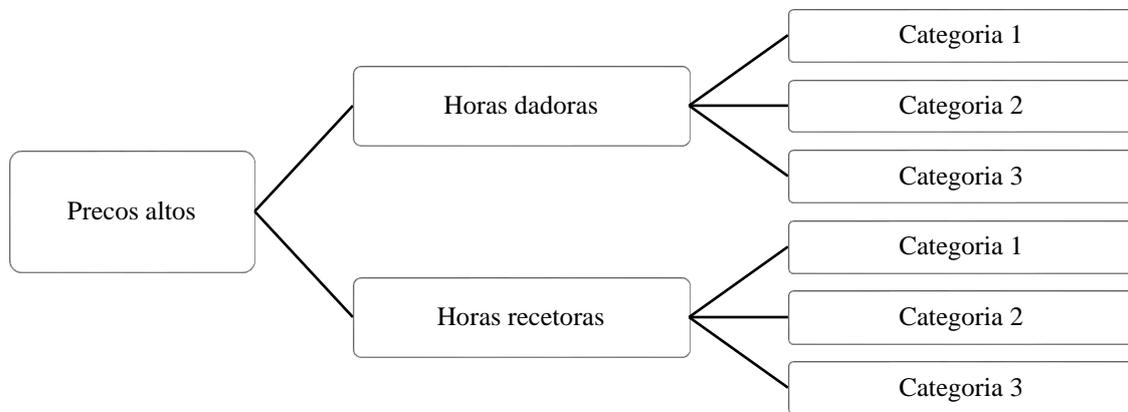


Figura 19: Diagrama que traduz a procedimento adotado para as movimentações entre horas do mesmo período de preços. Neste diagrama é apresentado um exemplo para as horas de preços altos. Contudo, o procedimento é idêntico para todas as outras movimentações de 2ª e 3ª fases.

### 4.3.2 Movimentações entre horas de diferentes períodos

Estas movimentações seguiram um modelo que se regeu por um maior benefício económico – uma vez que as movimentações decorreram sempre de um período de preços mais altos para um período de preços mais baixos.

O procedimento de categorização e movimentação de consumos que se segue é totalmente idêntico ao já descrito na secção de movimentações de consumos de horas do mesmo período de preços.

A ressaltar existem dois aspetos comuns, quer às movimentações de consumo entre horas do mesmo período horário, quer nas de diferente período horário:

1º) Após a categorização das horas (categorias 1, 2 e 3) de ambos os grupos (horas dadoras e horas recetoras) foi somado o consumo a transitar de cada categoria de hora dadora e dividido pelo número de horas recetoras de categoria igual. Por exemplo, considerando que as horas 15 e 17 são horas dadoras de categoria 1 e as horas 8, 9 e 11 são horas recetoras também de categoria 1. O que se fez nesta situação foi somar o consumo (a transitar) das horas 15 e 17 e dividi-lo pelas 3 horas recetoras de mesma categoria.

2º) Outra aspeto que merece referência foi o de nem sempre existirem horas recetoras e dadoras da mesma categoria. Segue-se abaixo um exemplo.

Considerando que a hora 10 é uma hora recetora de categoria 1, mas não havendo hora dadora da mesma categoria, o que se fez foi descer uma categoria à hora 10. Isto é, em vez de ser de categoria 1, passou a ser de categoria 2. É posteriormente avaliado se já existem horas dadoras de categoria 2. Se sim, então efetua-se as movimentações de consumo da maneira já descrita. Se ainda não houver horas dadoras de categoria 2, então volta-se a descer a categoria das 10 horas, desta vez de 2 para 3. Poderá dar-se o caso de não haver horas dadoras de nenhuma categoria e, nessa situação, simplesmente não se transitam consumos.

Tendo terminado as movimentações de consumo é possível afinar por uma última vez os CEC formando assim a matriz de elasticidade da procura por eletricidade.

O procedimento de movimentação de consumos entre horas de diferentes períodos horários é explicitado de seguida (Figura 20).

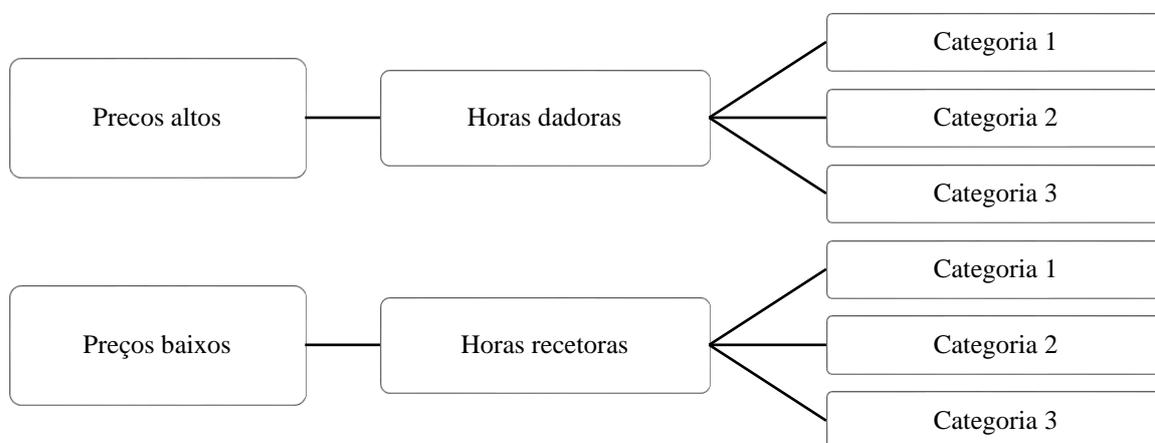


Figura 20: Diagrama que traduz a procedimento adotado para as movimentações entre horas de diferentes períodos de preços. Neste diagrama é apresentado um exemplo para as horas de preços altos e horas de preços baixos. Contudo, o procedimento é idêntico para todas as outras movimentações de 5ª e 6ª fases.

## Capítulo 5 – Resultados

Sendo o objetivo deste trabalho modelar a reorganização dos consumos elétricos, mantendo o consumo energético diário inalterado, apresentam-se neste capítulo os resultados obtidos recorrendo à metodologia anteriormente descrita.

A explicitação dos resultados terá uma abordagem técnica, em que serão apresentados os benefícios técnicos da gestão do consumo – e que, por isso, serão mencionados no âmbito do agregado Português – e numa perspetiva económica, que traduzirá os benefícios económicos médios do DR para um agregado familiar.

Nas secções que se seguem serão apresentados os resultados para cada um dos cenários sugeridos:

- Cenário A: Consumidores de curto alcance;
- Cenário B: Consumidores de longo alcance;
- Cenário C: Consumidores “inteligentes”;

A definição de um limite de 20% acima e 20% abaixo da média dos preços estipulou quais as horas que pertenciam a que períodos horários. A Tabela 8 explicita essa divisão. Estes limites mantiveram-se inalterados em qualquer um dos 3 cenários reportados.

Tabela 8: Horas pertencentes a cada período horário estabelecido.

| Horas de preços baixos | Horas de preços intermédios | Horas de preços altos |
|------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| [2h – 8h]              | 1h, [9h-19h], 24h           | [20h-23h]             |

### 5.1. Cenário A

Neste cenário foi considerado que os consumidores tomariam decisões relativamente à gestão dos seus consumos numa perspetiva de curto alcance temporal e que as movimentações de consumo entre horas se davam segundo as percentagens já indicadas na secção 4.2.2.

As variações de consumo ocorridas em média dentro de cada período de preço, bem como o balanço técnico estão expressas na Tabela 9.

Tabela 9: Variação do consumo de eletricidade do agregado Português por período de preços e para o cenário A, ano 2020.

| Variação dos consumos no período de preços baixos (MWh) | Variação dos consumos no período de preços intermédios (MWh) | Variação dos consumos no período de preços altos (MWh) |
|---|--|--|
| 112,98  | -74,94   | -38,08   |
| Balanço técnico (MWh):                                  |  |  |
| 0   |  |  |

O balanço técnico nulo confirma que não houve diminuição do consumo nas habitações ao fim do dia, mas sim um reajuste temporal desses mesmos consumos.

A Figura 21 compara o consumo inicial com o consumo final obtido da reorganização dos consumos não prioritários (NP), bem como a evolução dos preços em função da hora do dia para o cenário A.

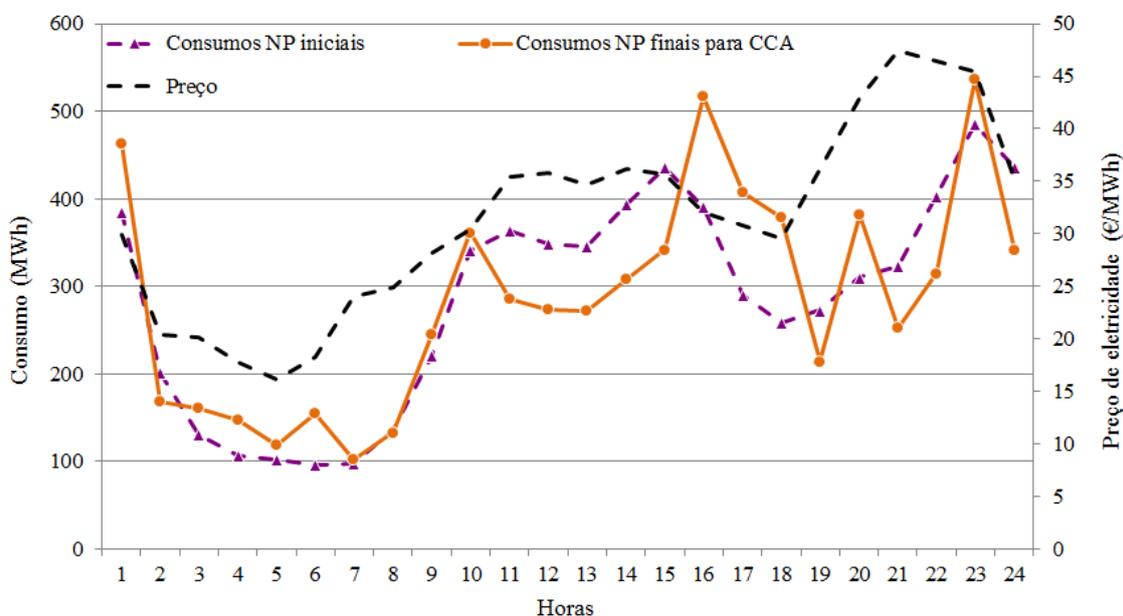


Figura 21: Comparação entre o consumo inicial, consumo final (consumos NP) e variação de preços para o cenário A

Os custos associados aos consumos elétricos ocorridos antes e depois da gestão de consumos, bem como o balanço económico para um agregado familiar estão expressos na Tabela 10.

Tabela 10: Variações dos custos com os consumos de um agregado familiar Português por período de preço, num ano e para o cenário A.

| Balanço económico no período de preços baixos (€) | Balanço económico no período de preços intermédios (€) | Balanço económico no período de preços altos (€) |
|---|--|--|
| 0,87  | -2,24  | -0,94  |
| Balanço económico (€):                            |  |  |
| -2,30   |  |  |

É, de seguida, apresentada a matriz de elasticidades (Figura 22) obtida para este cenário.

|        |       |       |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |       |       |        |       |       |       |       |       |
|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| -0,170 | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0,129 | 0,153 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0      | 0     | 0,003 | 0,003 | 0     | 0,269 |
| 0      | 0     | 0     | 0      | 0     | 0,310 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,018  | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 0      | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0,099 | 0,080 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,018  | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 0      | 0     | 0     | -0,059 | 0     | 0     | 0,061 | 0,053 | 0     | 0     | 0,032 | 0,031 | 0,033 | 0,031 | 0,031 | 0      | 0     | 0     | 0,030  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,032 |
| 0      | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,029 | 0,028 | 0,030 | 0,028 | 0,029 | 0      | 0     | 0     | 0,028  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,029 |
| 0      | 0,310 | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,033 | 0,032 | 0,034 | 0,031 | 0,032 | 0      | 0     | 0     | 0,031  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,033 |
| 0,129  | 0     | 0,099 | 0,061  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,185 | 0,118 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0,113 | 0,139 | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 0,153  | 0     | 0,080 | 0,053  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,238 | 0,137 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0,131 | 0,167 | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 0      | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0,185 | 0,238 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0,054  | 0     | 0,002 | 0,003 | 0     | 0     |
| 0      | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0,118 | 0,137 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0,077  | 0     | 0,003 | 0,003 | 0     | 0     |
| 0      | 0     | 0     | 0,032  | 0,029 | 0,033 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,595  | 0,432 | 0,341 | 0      | 0,003 | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 0      | 0     | 0     | 0,031  | 0,028 | 0,032 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,544  | 0,404 | 0,324 | 0      | 0,003 | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 0      | 0     | 0     | 0,033  | 0,030 | 0,034 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,775  | 0,519 | 0,394 | 0      | 0,003 | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 0      | 0     | 0     | 0,031  | 0,028 | 0,031 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,493  | 0,375 | 0,305 | 0      | 0,003 | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 0      | 0     | 0     | 0,031  | 0,029 | 0,032 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,557  | 0,411 | 0,329 | 0      | 0,003 | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 0      | 0,018 | 0,018 | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,595 | 0,544 | 0,775 | 0,493 | 0,557 | -0,376 | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0,016 | 0     |
| 0      | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0,113 | 0,131 | 0     | 0     | 0,432 | 0,404 | 0,519 | 0,375 | 0,411 | 0      | 0     | 0     | 0      | 0     | 0,003 | 0,003 | 0     | 0     |
| 0      | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0,139 | 0,167 | 0     | 0     | 0,341 | 0,324 | 0,394 | 0,305 | 0,329 | 0      | 0     | 0     | 0      | 0     | 0,003 | 0,003 | 0     | 0     |
| 0      | 0     | 0     | 0,030  | 0,028 | 0,031 | 0     | 0     | 0,054 | 0,077 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | -0,050 | 0,003 | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 0      | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0      | 0     | 0     | 0,003  | 0     | 0     | 0,370 | 0     | 0,003 |
| 0,003  | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,002 | 0,003 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0,003 | 0,003 | 0      | 0     | 0     | 0     | 0,533 | 0     |
| 0,003  | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,003 | 0,003 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0,003 | 0,003 | 0      | 0,370 | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 0      | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,016  | 0     | 0     | 0      | 0     | 0,533 | 0     | 0     | 0     |
| 0,269  | 0     | 0     | 0,032  | 0,029 | 0,033 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0      | 0,003 | 0     | 0     | 0     | 0     |

Figura 22: Matriz de elasticidades obtida para o cenário A. Cada linha/coluna representa um subintervalo de tempo equivalente a 1 hora.

## 5.2. Cenário B

Neste cenário foi considerado que os consumidores tomariam decisões relativamente à gestão dos seus consumos numa perspetiva de longo alcance temporal e que as movimentações de consumo entre horas se davam segundo as percentagens já indicadas na secção 4.2.2.

As variações de consumo ocorridas dentro de cada período de preço, bem como o balanço técnico para este cenário estão expressas na Tabela 11.

Tabela 11: Variações do consumo de eletricidade do agregado Português por período de preço e para o cenário B.

| Balanço técnico no período de preços baixos (MWh) | Balanço técnico no período de preços intermédios (MWh) | Balanço técnico no período de preços altos (MWh) |
|---|--|--|
| 1 322,24  | -713,61  | -608,63  |
| Balanço técnico (MWh):                            |  |  |
| 0   |  |  |

A Figura 23 relaciona o consumo inicial com o consumo final obtido da reorganização dos consumos, bem como a evolução dos preços em função da hora do dia para o cenário B.

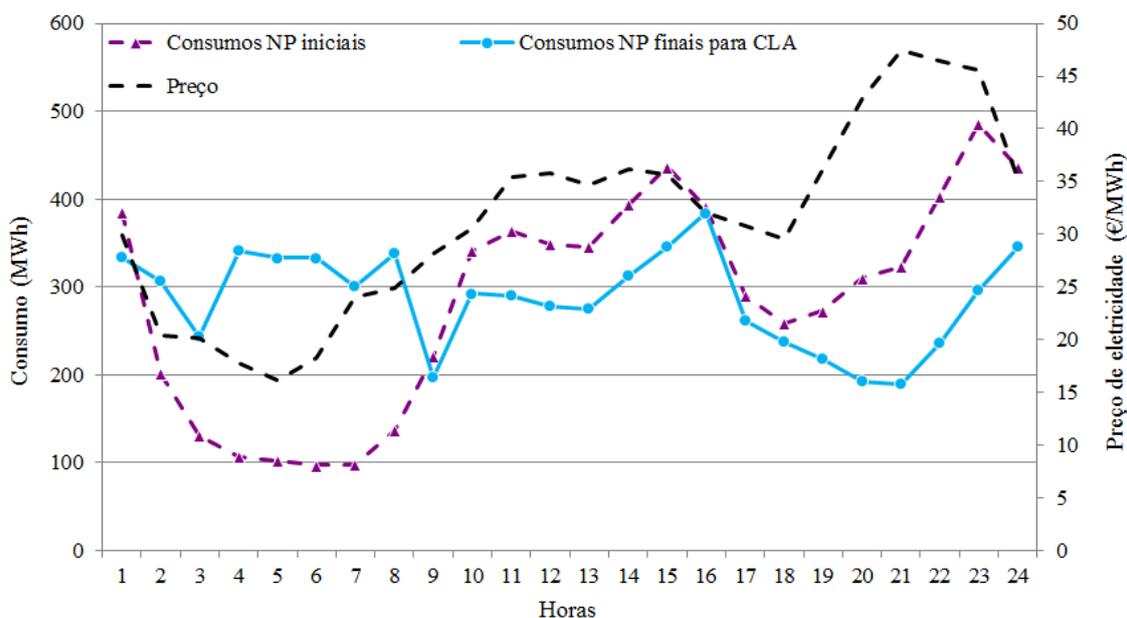


Figura 23: Comparação entre o consumo inicial, consumo final (consumos NP) e variação de preços para o cenário B.

Os custos com o consumo ocorridos em média antes e depois da modelação bem como o balanço económico para um agregado familiar estão expressos na Tabela 12.

Tabela 12: Variações dos gastos com os consumos de um agregado Português por período de preço, por dia e para o cenário B.

| Balanço económico no período de preços baixos (€) | Balanço económico no período de preços intermédios (€) | Balanço económico no período de preços altos (€) |
|---|--|--|
| -11,59  | -10,67   | -12,18   |
| Balanço económico (€):                            |  |  |
| -11,25  |  |  |

Segue-se a matriz obtida para este cenário (Figura 24).

|        |       |        |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |        |       |       |       |        |       |
|--------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|
| -0,021 | 0     | 0      | 0      | 0     | 0     | 0,895 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0,019 | 0,021 | 0      | 0,034 |
| 0      | 0     | 0      | 0      | 0     | 0,039 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,132  | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0     | 0,079  | 0     |
| 0      | 0     | -0,138 | 0      | 0     | 0     | 0,012 | 0,010 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,131  | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0     | 0,078  | 0     |
| 0      | 0     | 0      | -0,007 | 0     | 0     | 0,008 | 0,007 | 0     | 0     | 0,314 | 0,308 | 0,329 | 0,302 | 0,310 | 0      | 0      | 0      | 0,301  | 0     | 0,064 | 0,066 | 0      | 0,320 |
| 0      | 0     | 0      | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,286 | 0,282 | 0,299 | 0,276 | 0,283 | 0      | 0      | 0      | 0,276  | 0     | 0,061 | 0,063 | 0      | 0,291 |
| 0      | 0,039 | 0      | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,322 | 0,316 | 0,338 | 0,310 | 0,318 | 0      | 0      | 0      | 0,309  | 0     | 0,065 | 0,067 | 0      | 0,328 |
| 0,895  | 0     | 0,012  | 0,008  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,818 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0,786  | 0,963  | 0      | 0,068 | 0     | 0     | 0      | 0     |
| 0      | 0     | 0,010  | 0,007  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,953 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0,910  | 0      | 0      | 0,072 | 0     | 0     | 0      | 0     |
| 0      | 0     | 0      | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0      | 0      | 0,007  | 0     | 0,018 | 0,019 | 0      | 0     |
| 0      | 0     | 0      | 0      | 0     | 0     | 0,818 | 0,953 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0      | 0      | 0,010  | 0     | 0,020 | 0,021 | 0      | 0     |
| 0      | 0     | 0      | 0,314  | 0,286 | 0,322 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,074  | 0,054  | 0,043  | 0      | 0,015 | 0     | 0     | 0      | 0     |
| 0      | 0     | 0      | 0,308  | 0,282 | 0,316 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,068  | 0,051  | 0,041  | 0      | 0,015 | 0     | 0     | 0      | 0     |
| 0      | 0     | 0      | 0,329  | 0,299 | 0,338 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,097  | 0,065  | 0,049  | 0      | 0,013 | 0     | 0     | 0      | 0     |
| 0      | 0     | 0      | 0,302  | 0,276 | 0,310 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,062  | 0,047  | 0,038  | 0      | 0,016 | 0     | 0     | 0      | 0     |
| 0      | 0     | 0      | 0,310  | 0,283 | 0,318 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,070  | 0,051  | 0,041  | 0      | 0,015 | 0     | 0     | 0      | 0     |
| 0      | 0,132 | 0,131  | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,074 | 0,068 | 0,097 | 0,062 | 0,070 | -0,047 | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0     | 0,088  | 0     |
| 0      | 0     | 0      | 0      | 0     | 0     | 0,786 | 0,910 | 0     | 0     | 0,054 | 0,051 | 0,065 | 0,047 | 0,051 | 0      | -0,127 | 0      | 0      | 0     | 0,020 | 0,022 | 0      | 0     |
| 0      | 0     | 0      | 0      | 0     | 0     | 0,963 | 0     | 0     | 0     | 0,043 | 0,041 | 0,049 | 0,038 | 0,041 | 0      | 0      | -0,127 | 0      | 0     | 0,019 | 0,020 | 0      | 0     |
| 0      | 0     | 0      | 0,301  | 0,276 | 0,309 | 0     | 0     | 0,007 | 0,010 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0      | 0      | -0,006 | 0,016 | 0     | 0     | 0      | 0     |
| 0      | 0     | 0      | 0      | 0     | 0     | 0,068 | 0,072 | 0     | 0     | 0,015 | 0,015 | 0,013 | 0,016 | 0,015 | 0      | 0      | 0      | 0,016  | 0     | 0     | 0,046 | 0      | 0,014 |
| 0,019  | 0     | 0      | 0,064  | 0,061 | 0,065 | 0     | 0     | 0,018 | 0,020 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0,020  | 0,019  | 0      | 0     | 0     | 0     | 0,067  | 0     |
| 0,021  | 0     | 0      | 0,066  | 0,063 | 0,067 | 0     | 0     | 0,019 | 0,021 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0,022  | 0,020  | 0      | 0,046 | 0     | 0     | 0      | 0     |
| 0      | 0,079 | 0,078  | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,088  | 0      | 0      | 0      | 0     | 0,067 | 0     | -0,137 | 0     |
| 0,034  | 0     | 0      | 0,320  | 0,291 | 0,328 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0,014 | 0     | 0     | 0      | 0     |

Figura 24: Matriz de elasticidades obtida para o cenário B. Cada linha/coluna representa um subintervalo de tempo equivalente a 1 hora.

### 5.3. Cenário C

Neste cenário foi considerado que os consumidores tomariam decisões relativamente à gestão dos seus consumos numa perspetiva de curto e longo alcance temporal – tomando partido dos benefícios de cada uma dos perfis de ação – e que as movimentações de consumo entre horas se davam segundo as percentagens já indicadas na secção 4.2.2.

As variações de consumo ocorridas em média dentro de cada período de preço, bem como o balanço técnico estão expressas na Tabela 13.

Tabela 13: Variações do consumo de eletricidade do agregado Português por período de preço e para o cenário C.

| Balanço técnico no período de preços baixos (MWh) | Balanço técnico no período de preços intermédios (MWh) | Balanço técnico no período de preços altos (MWh) |
|---|--|--|
| 1 322,24  | -713,61  | -608,63  |
| Balanço técnico (MW):                             |  |  |
| 0   |  |  |

A Figura 25 relaciona o consumo inicial com o consumo final obtido da reorganização dos consumos, bem como a evolução dos preços em função da hora do dia para o cenário C.

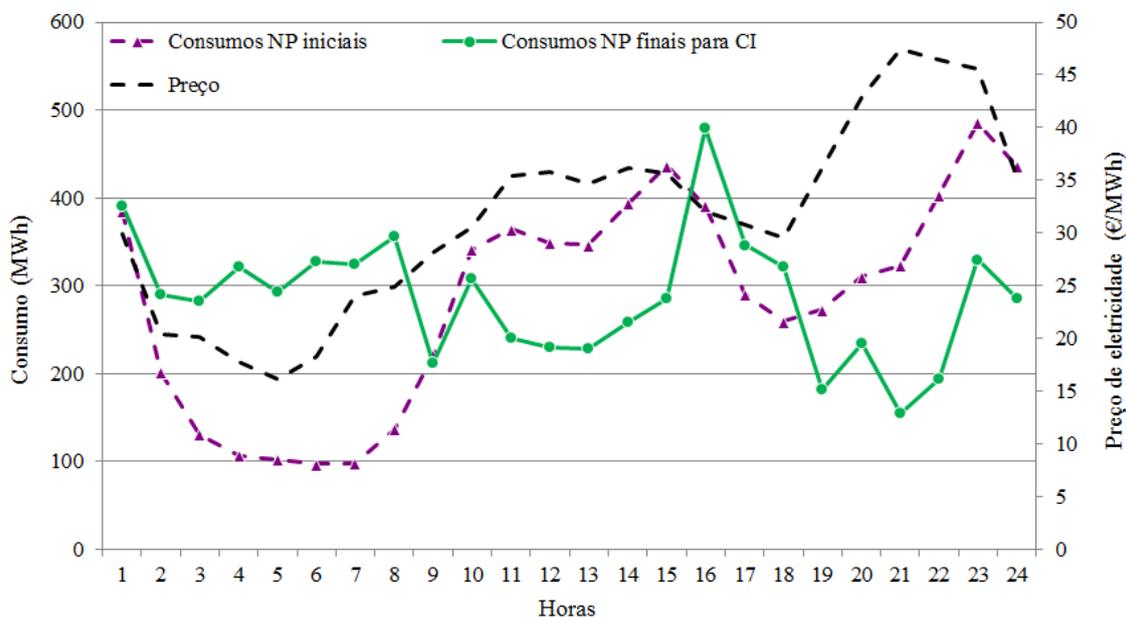


Figura 25: Comparação entre o consumo inicial, consumo final (consumos NP) e variação de preços para o cenário C.

Os gastos com o consumo ocorridos em médias antes e depois da modelação bem como o balanço económico para o agregado estão expressos na Tabela 14.

Tabela 14: Variações dos gastos com os consumos de um agregado Português por período de preço, por dia e para o cenário C.

| Balanço económico no período de preços baixos (€) | Balanço económico no período de preços intermédios (€) | Balanço económico no período de preços altos (€) |
|---|--|--|
| 11,77   | -11,45   | -12,27   |
| Balanço económico (€):                            |  |  |
| -11,95  |  |  |

Segue-se a matriz obtida para este cenário (Figura 26).

|        |       |       |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |       |       |        |       |        |        |        |       |
|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|
| -0,170 | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0      | 0     | 0,016  | 0,017  | 0      | 0,269 |
| 0      | 0     | 0     | 0      | 0     | 0,310 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,165  | 0     | 0     | 0      | 0     | 0      | 0      | 0,088  | 0     |
| 0      | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0,099 | 0,080 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,163  | 0     | 0     | 0      | 0     | 0      | 0      | 0,0874 | 0     |
| 0      | 0     | 0     | -0,059 | 0     | 0     | 0,061 | 0,053 | 0     | 0     | 0,260 | 0,255 | 0,272 | 0,250 | 0,257 | 0      | 0     | 0     | 0,249  | 0     | 0,053  | 0,054  | 0      | 0,265 |
| 0      | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,237 | 0,233 | 0,247 | 0,229 | 0,234 | 0      | 0     | 0     | 0,228  | 0     | 0,050  | 0,051  | 0      | 0,241 |
| 0      | 0,310 | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,267 | 0,262 | 0,280 | 0,256 | 0,263 | 0      | 0     | 0     | 0,256  | 0     | 0,053  | 0,055  | 0      | 0,272 |
| 0      | 0     | 0,099 | 0,061  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,980 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0,941 | 0     | 0      | 0,083 | 0      | 0      | 0      | 0     |
| 0      | 0     | 0,080 | 0,053  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0      | 0,087 | 0      | 0      | 0      | 0     |
| 0      | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0,054  | 0     | 0,015  | 0,015  | 0      | 0     |
| 0      | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0,980 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0,077  | 0     | 0,017  | 0,018  | 0      | 0     |
| 0      | 0     | 0     | 0,260  | 0,237 | 0,267 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0,595 | 0,432 | 0,341  | 0     | 0,018  | 0      | 0      | 0     |
| 0      | 0     | 0     | 0,255  | 0,233 | 0,262 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0,544 | 0,404 | 0,324  | 0     | 0,019  | 0      | 0      | 0     |
| 0      | 0     | 0     | 0,272  | 0,247 | 0,280 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0,775 | 0,519 | 0,394  | 0     | 0,016  | 0      | 0      | 0     |
| 0      | 0     | 0     | 0,250  | 0,229 | 0,256 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0,493 | 0,375 | 0,305  | 0     | 0,020  | 0      | 0      | 0     |
| 0      | 0     | 0     | 0,257  | 0,234 | 0,263 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0,557 | 0,411 | 0,329  | 0     | 0,019  | 0      | 0      | 0     |
| 0      | 0,165 | 0,163 | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,595 | 0,544 | 0,775 | 0,493 | 0,557 | -0,376 | 0     | 0     | 0      | 0     | 0      | 0      | 0,098  | 0     |
| 0      | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0,941 | 0     | 0     | 0     | 0,432 | 0,404 | 0,519 | 0,375 | 0,411 | 0      | 0     | 0     | 0      | 0     | 0,0168 | 0,0179 | 0      | 0     |
| 0      | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,341 | 0,324 | 0,394 | 0,305 | 0,329 | 0      | 0     | 0     | 0      | 0     | 0,016  | 0,017  | 0      | 0     |
| 0      | 0     | 0     | 0,249  | 0,228 | 0,256 | 0     | 0     | 0,054 | 0,077 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | -0,050 | 0,020 | 0      | 0      | 0      | 0     |
| 0      | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0,083 | 0,087 | 0     | 0     | 0,018 | 0,019 | 0,016 | 0,020 | 0,019 | 0      | 0     | 0     | 0,020  | 0     | 0      | 0,370  | 0      | 0,017 |
| 0,016  | 0     | 0     | 0,053  | 0,050 | 0,053 | 0     | 0     | 0,015 | 0,017 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0,017 | 0,016 | 0      | 0     | 0      | 0      | 0,533  | 0     |
| 0,017  | 0     | 0     | 0,054  | 0,051 | 0,055 | 0     | 0     | 0,015 | 0,018 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0,018 | 0,017 | 0      | 0,370 | 0      | 0      | 0      | 0     |
| 0      | 0,088 | 0,087 | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0,098  | 0     | 0     | 0      | 0     | 0,533  | 0      | 0      | 0     |
| 0,269  | 0     | 0     | 0,265  | 0,241 | 0,272 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0      | 0,017 | 0      | 0      | 0      | 0     |

Figura 26: Matriz de elasticidades obtida para o cenário C. Cada linha/coluna representa um subintervalo de tempo equivalente a 1 hora.

## 5.4. Comparação de cenários e análise de resultados

A Figura 27 relaciona todos os cenários considerados para os consumos agregados dos equipamentos não prioritários.

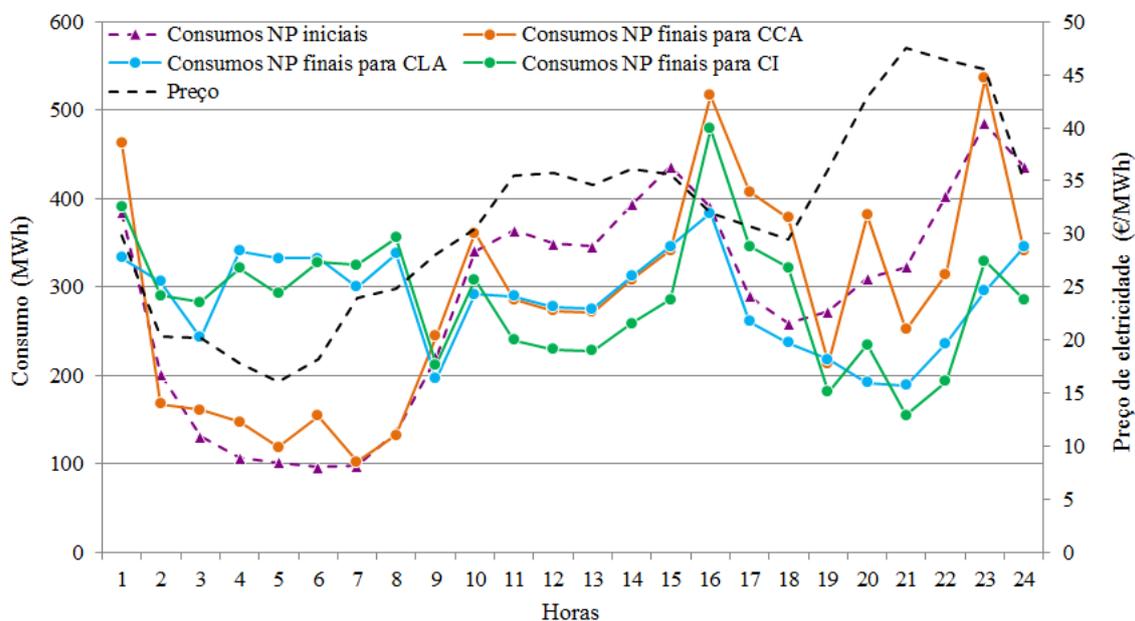


Figura 27: Comparação entre os consumos iniciais e finais (equipamentos não prioritários) dos 3 cenários de consumidores.

Tal como demonstra a figura anterior, são evidentes as significativas melhorias no perfil de consumos para qualquer um dos cenários abordados. Observa-se também que os cenários B e C são os que melhor regularizam os consumos – entenda-se por regularizam que estes cenários são os que se revertem numa curva de consumo menos variável ao longo do dia.

Segue-se a apresentação dos resultados obtidos para os consumos totais do agregado residencial (aos consumos dos equipamentos não prioritários cujos funcionamentos foram manipulados – e os resultados já apresentados –, junta-se agora os consumos residenciais fixos nos quais não foi executada qualquer tipo de ação).

A Figura 28 traduz a previsão da curva de consumo doméstico agregado para 2020 sem DR (consumos totais iniciais) e com DR (3 cenários de consumidores).

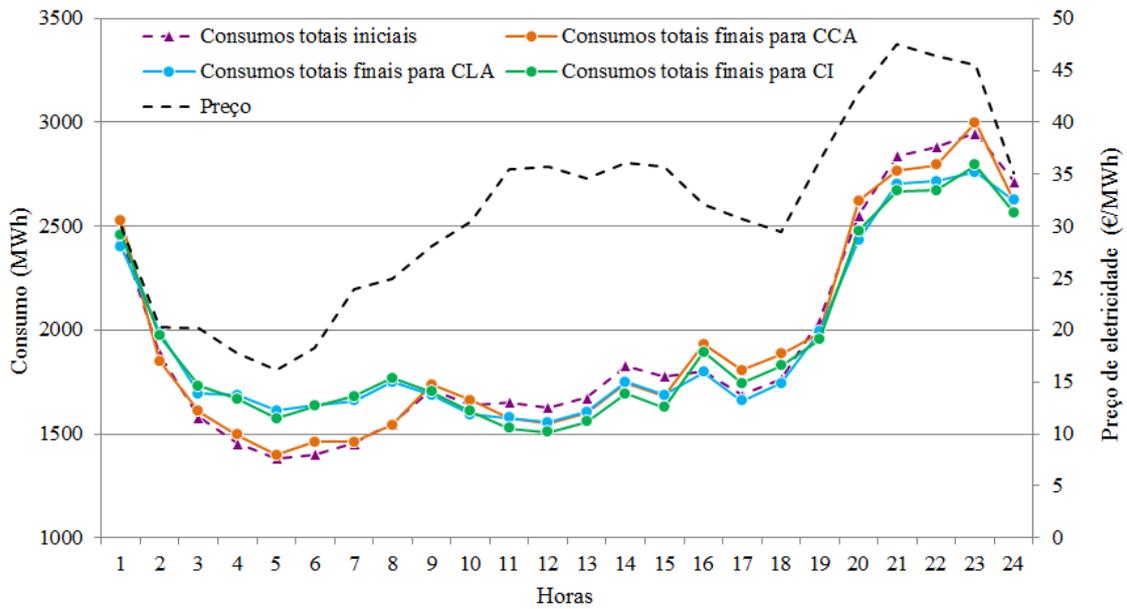


Figura 28: Curvas de consumo doméstico agregado em 2020.

São de seguida apresentadas várias figuras que mostram em detalhe as diferenças entre cada um dos cenários para cada período de preço considerado. Assim, a Figura 29, Figura 30 e Figura 31 mostram a variação dos consumos totais das habitações detalhados por período de preços.

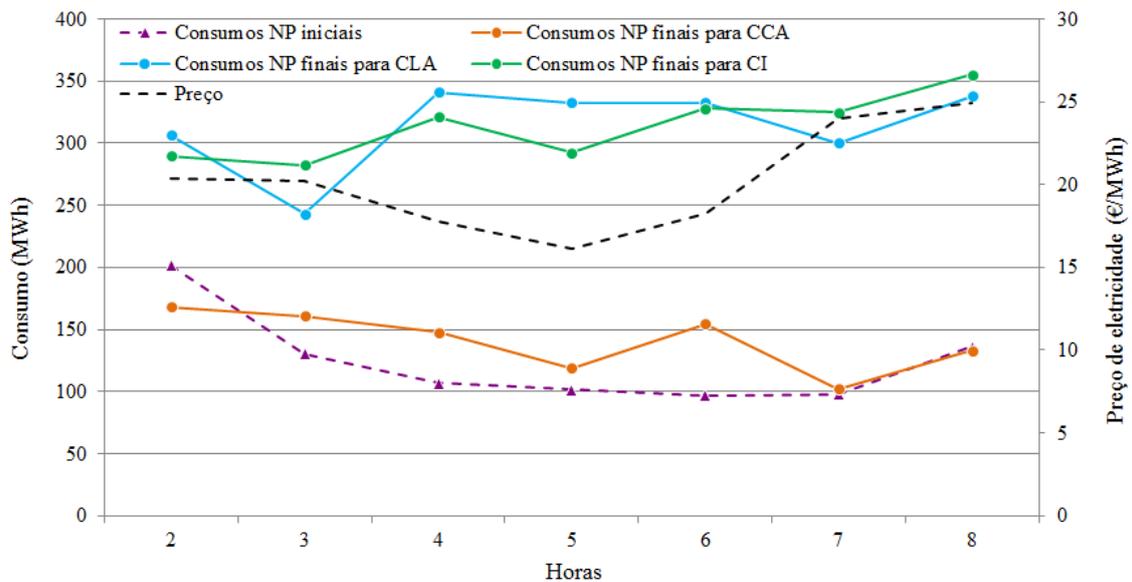


Figura 29: Consumos detalhados nas horas de preços baixos para os diferentes cenários.

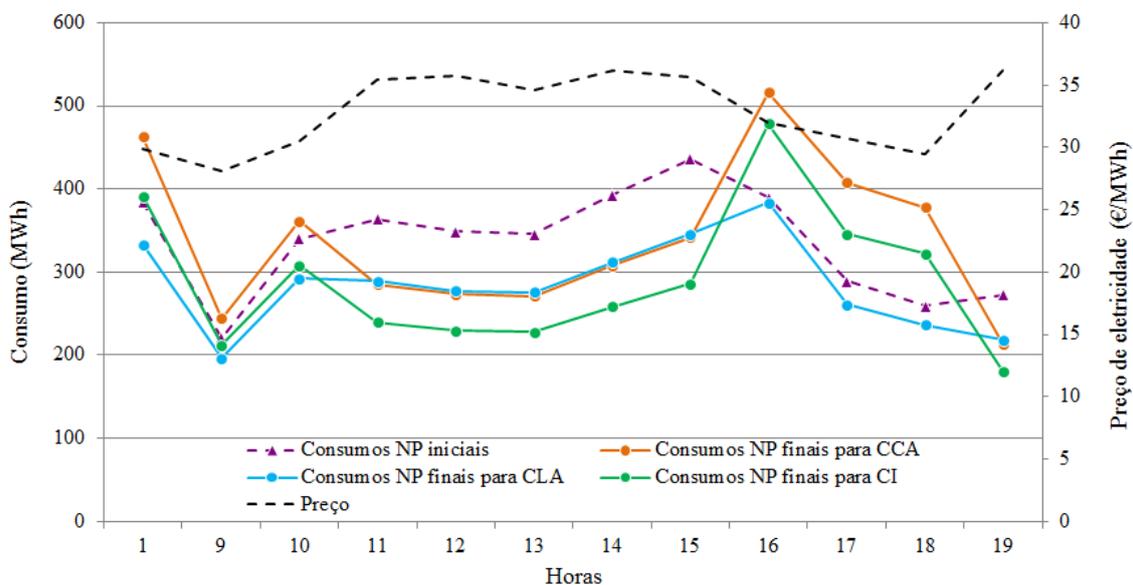


Figura 30: Consumos detalhados nas horas de preços intermédios para os diferentes cenários.

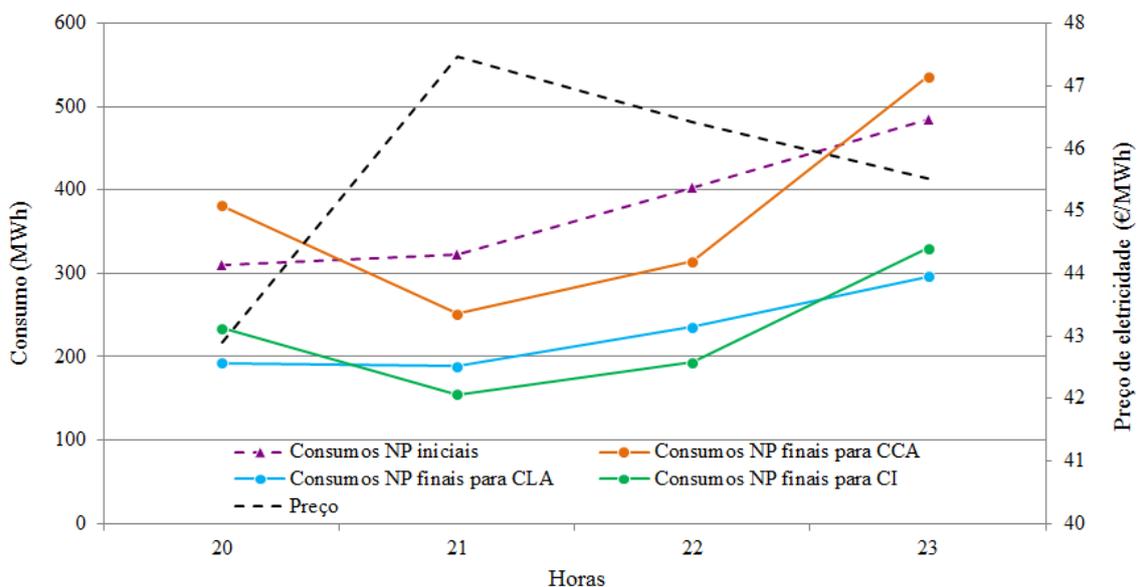


Figura 31: Consumos detalhados nas horas de preços altos para os diferentes cenários.

Pela análise à Figura 29 é observável uma significativa distinção entre a curva de consumo dos consumidores de curto alcance e os restantes consumidores.

Observe-se que estamos a analisar apenas horas de preços muito baixos, nas quais é desejável aumentar o consumo, não só pelos benefícios económicos eminentes para os consumidores, como também pelo nivelamento da curva da procura.

Assim sendo, os consumidores de longo alcance beneficiaram da transição de consumos provenientes de horas mais caras. Este fator provocou o aumento de consumo neste período horário para os consumidores de longo alcance bem como para com os consumidores “inteligentes”.

Pelo contrário, na Figura 30 e Figura 31, observa-se que a curva de consumo mais elevada é a dos consumidores de curto alcance que, por apenas atuarem num espetro temporal reduzido, não conseguiram movimentar consumo suficiente para outros períodos horários – algo que foi alcançado pelos consumidores de longo espectro e pelos consumidores “inteligentes”.

A mesma análise se faz da Figura 31. Note-se ainda nesta figura a elevada sensibilidade do método às variações de preços nas horas mais críticas – entre a hora 20 e a hora 21 observa-se um aumento de preço substancial acompanhado de uma redução de consumo para qualquer um dos grupos de consumidores. A partir das 22h, em que o preço diminui, o consumo volta a aumentar beneficiando desta descida do preço. Outro aspeto interessante é o facto de que uma descida de preço nas horas críticas foi acompanhada de um aumento de consumo mais acentuado para os consumidores de curto alcance e aumentos relevantes para os restantes consumidores. Daqui se conclui um dos benefícios dos consumidores de longo alcance e consumidores “inteligentes” – mesmo tratando-se de uma descida do preço, o consumo não deverá aumentar substancialmente uma vez que estamos na presença de um grupo de horas ainda com preços elevados e que antecede o período mais compensatório para os consumidores – o de preços baixos.

Os equipamentos escolhidos para a modelação de funcionamento foram as máquinas de lavar roupa e loiça, a máquina de secar roupa e os equipamentos de aquecimento de águas. Esta escolha é parcialmente justificada pela perceção que os consumidores têm dos equipamentos mais gastadores nas suas casas, tal como visto no capítulo 2.3, bem como a possibilidade destes equipamentos não necessitarem de estar em constante funcionamento ou dos quais os consumidores não dependam em alturas muito específicas do dia, isto é, são usualmente classificados como cargas não prioritárias e facilmente diferíveis no tempo.

A modelação do comportamento dos consumidores foi feita com vista a produzir 3 cenários de consumo para o ano de 2020. As movimentações entre horas do mesmo período de preços, tal como já referido, foram realizadas com o intuito de caracterizar os coeficientes de autoelasticidade. Por outro lado, as movimentações entre horas de diferente período de preço foram realizadas tentando caracterizar as elasticidades cruzadas. Neste tipo de movimentações não só foram consideradas movimentações de horas de preços altos para preços baixos, mas também se consideraram movimentações entre horas de preços altos e horas de preços intermédios, dadas as evidências encontradas na literatura de que os consumidores ainda são sensíveis a estas variações de preços.

A percentagem horária de gestão de consumo foi definida tentando caracterizar os procedimentos dos consumidores. Uma percentagem de gestão de consumo igual para todas as movimentações definidas não pareceu ser a abordagem mais correta – é intuitivo que diferentes consumidores tenham diferentes preferências por determinados períodos de preços.

Das movimentações entre horas do mesmo período de preços e diferente período de preços resultaram balanços de consumos negativos tanto para as horas de preços intermédios como para as horas de preços altos. Apenas o balanço do consumo nas horas de preços baixos foi positivo traduzindo a intenção desta tese em modelar o aumento do consumo nas horas de vazio e diminuir noutras horas. Estes balanços ficaram explícitos na Tabela 9, Tabela 11 e Tabela 13.

De salientar ainda um outro aspeto que mostra o como a tomada consciente de decisões implica um maior benefício económico. Para os consumidores de longo alcance e para os consumidores “inteligentes”, o balanço técnico é idêntico em iguais períodos de preços. Contudo, o balanço económico é mais favorável – entenda-se por favorável, uma maior poupança – para os consumidores “inteligentes”. Isto é, este tipo de consumidor adotou comportamentos mais

sensíveis às variações de preços, não só em função de diferenças de preços entre períodos de preços diferentes como também dentro de um mesmo período de preços.

Relativamente às matrizes de elasticidades, observa-se que os elementos da diagonal principal – coeficientes de autoelasticidade – de todas as matrizes são negativos ou nulos, tal como se pretendia. O facto de serem negativos indica que os consumidores em resposta a um aumento de preço decidiram não colocar em funcionamento os seus equipamentos ou então o contrário – face à diminuição de preços numa determinada hora, decidiram recolocar os seus consumos nessa mesma hora. Os restantes elementos nulos refletem a indiferença dos consumidores perante as variações de preços dessas horas ou ao inconveniente que o desvio de consumos lhes causaria.

No que diz respeito aos restantes elementos da matriz – coeficientes de elasticidade cruzada – observa-se que os seus valores são todos positivos, tal como se pretendia (traduzindo a decisão de aumentar o consumo “agora” sabendo que o preço da eletricidade irá subir de futuro ou o contrário).

Pela análise mais aprofundada das matrizes de elasticidade é possível comprovar as preferências horárias de cada tipologia de consumidor.

Iniciando a análise pelos consumidores de curto alcance, verifica-se que os maiores valores de elasticidades cruzadas encontram-se pouco dispersos relativamente aos elementos de autoelasticidade, comprovando desta forma o reduzido espectro de atuação destes consumidores, tal como é visível na Figura 32.

|    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16     | 17    | 18    |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| 11 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.595  | 0.432 | 0.341 |
| 12 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.544  | 0.404 | 0.324 |
| 13 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.775  | 0.519 | 0.394 |
| 14 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.493  | 0.375 | 0.305 |
| 15 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.557  | 0.411 | 0.329 |
| 16 | 0.595 | 0.544 | 0.775 | 0.493 | 0.557 | -0.376 | 0     | 0     |
| 17 | 0.432 | 0.404 | 0.519 | 0.375 | 0.411 | 0      | 0     | 0     |
| 18 | 0.341 | 0.324 | 0.394 | 0.305 | 0.329 | 0      | 0     | 0     |

Figura 32: Excerto da matriz de elasticidades dos consumidores de curto alcance para consumos e preços compreendidos entre as 11 e as 18 horas (horas intermédias).

Os consumidores de longo espectro, ao contrário dos consumidores anteriormente mencionados, privilegiam as movimentações de consumos que se traduzem por um maior benefício económico e, como tal, as movimentações de consumos ocorreram entre horas de diferentes períodos de preço.

|    | 7     | 8     | 9 | 10    |
|----|-------|-------|---|-------|
| 7  | 0     | 0     | 0 | 0.818 |
| 8  | 0     | 0     | 0 | 0.953 |
| 9  | 0     | 0     | 0 | 0     |
| 10 | 0.818 | 0.953 | 0 | 0     |
| 11 | 0     | 0     | 0 | 0     |
| 12 | 0     | 0     | 0 | 0     |
| 13 | 0     | 0     | 0 | 0     |
| 14 | 0     | 0     | 0 | 0     |
| 15 | 0     | 0     | 0 | 0     |
| 16 | 0     | 0     | 0 | 0     |
| 17 | 0.786 | 0.910 | 0 | 0     |
| 18 | 0.963 | 0     | 0 | 0     |

Figura 33: Excerto da matriz de elasticidades dos consumidores de longo alcance para consumos compreendidos entre as 7 e as 18 horas e preços compreendidos entre as 7 e as 10 horas.

A Figura 33 mostra claramente a sensibilidade que esta tipologia de consumidor demonstra às variações de preços entre diferentes períodos de preços. Por exemplo, neste excerto de matriz ficam explícitas as elevadas elasticidades obtidas para movimentações de consumo que decorreram entre horas de preços intermédios e horas de preços baixos.

Por último, os consumidores “inteligentes” demonstraram uma maior flexibilidade no que diz respeito aos reagendamentos dos seus consumos. A Figura 34 comprova esta afirmação.

|    | 16     | 17    | 18    | 19     | 20    | 21    | 22    | 23    | 24    |
|----|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1  | 0      | 0     | 0     | 0      | 0     | 0.016 | 0.017 | 0     | 0.269 |
| 2  | 0.165  | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0.088 | 0     |
| 3  | 0.163  | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0.087 | 0     |
| 4  | 0      | 0     | 0     | 0.249  | 0     | 0.053 | 0.054 | 0     | 0.265 |
| 5  | 0      | 0     | 0     | 0.228  | 0     | 0.050 | 0.051 | 0     | 0.241 |
| 6  | 0      | 0     | 0     | 0.256  | 0     | 0.053 | 0.055 | 0     | 0.272 |
| 7  | 0      | 0.941 | 0     | 0      | 0.083 | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 8  | 0      | 0     | 0     | 0      | 0.087 | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 9  | 0      | 0     | 0     | 0.054  | 0     | 0.015 | 0.015 | 0     | 0     |
| 10 | 0      | 0     | 0     | 0.077  | 0     | 0.017 | 0.018 | 0     | 0     |
| 11 | 0.595  | 0.432 | 0.341 | 0      | 0.018 | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 12 | 0.544  | 0.404 | 0.324 | 0      | 0.019 | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 13 | 0.775  | 0.519 | 0.394 | 0      | 0.016 | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 14 | 0.493  | 0.375 | 0.305 | 0      | 0.020 | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 15 | 0.557  | 0.411 | 0.329 | 0      | 0.019 | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 16 | -0.376 | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0.098 | 0     |
| 17 | 0      | 0     | 0     | 0      | 0     | 0.017 | 0.018 | 0     | 0     |
| 18 | 0      | 0     | 0     | 0      | 0     | 0.016 | 0.017 | 0     | 0     |
| 19 | 0      | 0     | 0     | -0.050 | 0.020 | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 20 | 0      | 0     | 0     | 0.020  | 0     | 0     | 0.370 | 0     | 0.017 |
| 21 | 0      | 0.017 | 0.016 | 0      | 0     | 0     | 0     | 0.533 | 0     |
| 22 | 0      | 0.018 | 0.017 | 0      | 0.370 | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 23 | 0.098  | 0     | 0     | 0      | 0     | 0.533 | 0     | 0     | 0     |
| 24 | 0      | 0     | 0     | 0      | 0.017 | 0     | 0     | 0     | 0     |

Figura 34: Excerto da matriz de elasticidades dos consumidores “inteligentes” para os consumos de 1 dia e preços compreendidos entre as 16 e as 24 horas.

As elasticidades para esta tipologia de consumidor tendem a manterem-se elevadas entre consumos adjacentes como também para movimentações de consumos entre horas de diferentes períodos. A comprovar isso mesmo temos o exemplo das seguintes elasticidades:  $e_{7,17}$ ,  $e_{1,24}$ ,  $e_{4,19}$

Os restantes elementos das matrizes resultaram em valores nulos que se traduzem pela não sensibilidade dos consumidores aos preços dessas horas ou por não lhes ser conveniente a mudança de consumo nesses períodos. No capítulo seguinte, é apresentada uma proposta de trabalho futuro de forma a caracterizar estes elementos e alcançar o restante preenchimento da matriz.

Em anexo – anexo 2 – são apresentadas as matrizes de elasticidades com escala de cores de forma a possibilitar uma mais fácil análise dos resultados obtidos (Figura 39, Figura 40 e Figura 41).

## Capítulo 6 – Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

Os pressupostos assumidos e os cálculos realizados conduziram a valores de elasticidades que traduzem a evolução possível do sector de consumos domésticos nos próximos 4 anos e, como tal, são representativas do enorme potencial de atuação nos consumos não prioritários.

Com este trabalho foi possível concluir sobre os inegáveis benefícios da implementação de medidas de gestão do consumo no setor residencial. Foram modelados vários cenários com base em 3 tipologias de consumidores o que reverteu em resultados bastante encorajadores por aplicação da metodologia desenvolvida.

Os benefícios económicos para um agregado familiar podem chegar perto dos 12€ anuais. Por outro lado, os benefícios técnicos para o agregado Português podem repercutir-se numa diminuição de consumo em horas de preços altos a rondar os 600 MWh.

Este modelo poderá vir a ser utilizado para caracterizar os consumos no futuro em diferentes cenários, tais como aqueles que aqui foram apresentados. Uma vez que o modelo recebe como dados de entrada, os preços horários da eletricidade e os valores dos consumos domésticos, poderá vir a ser utilizado para prever o impacto que uma mudança expectável na média dos preços poderá vir a ter na atuação dos consumidores sobre as suas cargas e a sua distribuição horária, contribuindo para uma análise da sensibilidade ao efeito de diferentes incentivos.

Uma limitação do modelo aqui desenvolvido é o facto de se redistribuírem os consumos domésticos por diferentes horas sem que tal afete o preço da eletricidade. Esta é uma limitação óbvia, à qual este modelo não está concebido para dar resposta. Por esta razão, todos os resultados daqui extraídos deverão ser interpretados com reserva e tendo conhecimento deste fator – uma vez que não há como separar e isolar o funcionamento de uma variável (consumo) da outra (preço da eletricidade) mas, existe, de facto uma interação entre ambas não descrita neste modelo. Esta é uma das sugestões de trabalhos futuros – o de incluir a interação entre consumo e preço e em que medida uma variável influencia a outra.

Outra sugestão de desenvolvimento passa pelo aprofundamento do estudo de cada uma das variáveis que interferem com o consumo elétrico. Por exemplo, qual o impacto que o clima e as condições ambientais de um dia e de uma hora específicos afetam as decisões de consumo energético na habitação afetada. Num cenário hipotético em que a temperatura ambiente diminui drasticamente, ou se dá qualquer outra alteração que interfere com o bem-estar do consumidor e simultaneamente o preço da energia aumenta, seria interessante avaliar qual o seu “limite” – isto é, até que preço o consumidor está disposto a pagar pela sua comodidade e a partir de que preço o consumidor simplesmente desliga as suas cargas.

Para colmatar as elasticidades nulas obtidas nas matrizes sugere-se uma abordagem dispersiva dos consumos. Ao transferir-se uma quantidade de consumo de uma hora para outra, poder-se-ia dispersar o consumo total não só para a hora destino como também pequenas parcelas pelas horas adjacentes, desde que estas cumprissem certos critérios definidos previamente.

Finalmente, outro aspecto que poderá ser trabalhado consiste em especificar a sensibilidade dos consumidores para os preços da eletricidade e respetiva tomada de decisão conforme a estação do ano.

## Referências

- [1] S. Luthra, S. Kumar, R. Kharb, M. F. Ansari, and S. L. Shimmi, “Adoption of smart grid technologies: An analysis of interactions among barriers,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 33, pp. 554–565, 2014.
- [2] M. Muratori, B. A. Schuelke-Leech, and G. Rizzoni, “Role of residential demand response in modern electricity markets,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 33, pp. 546–553, 2014.
- [3] L. Carlos and R. Junior, “Integração de fontes renováveis no sistema eléctrico através de Centrais Renováveis Virtuais,” 2011.
- [4] J. Fiksel, “Designing Resilient, Sustainable Systems,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 37, no. 23, pp. 5330–5339, 2003.
- [5] M. Muratori, M. C. Roberts, R. Sioshansi, V. Marano, and G. Rizzoni, “A highly resolved modeling technique to simulate residential power demand,” *Appl. Energy*, vol. 107, pp. 465–473, 2013.
- [6] International Energy Agency, “Technology Roadmap Smart Grids,” 2011.
- [7] Instituto Nacional de Estatística, *Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010*. 2011.
- [8] ADENE, “Guia da eficiência energética,” 2012.
- [9] K. Ravindra and P. P. Iyer, “Decentralized demand-supply matching using community microgrids and consumer demand response: A scenario analysis,” *Energy*, vol. 76, pp. 32–41, 2014.
- [10] T. Holtschneider and I. Erlich, “Modeling demand response of consumers to incentives using fuzzy systems,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–8, 2012.
- [11] H. Svahnstr, “Demand Side Management in Smart Grids.”
- [12] J. Osório and A. Estanqueiro, “Winning End Users Active Support to Demand Side Response,” no. 1, pp. 1–8.
- [13] P. Siano, “Demand response and smart grids - A survey,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 30, pp. 461–478, 2014.
- [14] U.S. Department of Energy, “the SMART GRID,” vol. 99, p. 48, 2010.
- [15] European Commission, “Climate Action,” *2020 climate & energy package*. [Online]. Available: [http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020/index_en.htm). [Accessed: 07-Feb-2016].
- [16] K. Dietrich, J. M. Latorre, L. Olmos, and A. Ramos, “Demand response and its sensitivity to participation rates and elasticities,” *2011 8th Int. Conf. Eur. Energy Mark. EEM 11*, pp. 711–716, 2011.
- [17] S. Feuerriegel and D. Neumann, “Measuring the financial impact of demand response for electricity retailers,” *Energy Policy*, vol. 65, pp. 359–368, 2014.
- [18] N. Venkatesan, J. Solanki, and S. K. Solanki, “Residential Demand Response model and impact on voltage profile and losses of an electric distribution network,” *Appl. Energy*,

- vol. 96, pp. 84–91, 2012.
- [19] S. D. Braithwait and K. Eakin, “The role of demand response in electric power market design,” *Edison Electr. Inst.*, no. October, 2002.
- [20] L. Summit Blue Consulting, “Power Smart Pricing 2008 Annual Report,” 2009.
- [21] D. Violette, B. Provencher, M. Klos, R. Freeman, P. Steele-Mosey, D. Clark, and D. Klos, “Power Smart Pricing 2009 Annual Report Submitted to Ameren Illinois Utilities,” 2010.
- [22] Hydro One, “Time-of-use.” [Online]. Available: <http://www.hydroone.com/TOU/Pages/Default.aspx>. [Accessed: 19-Nov-2015].
- [23] M. G. Lijesen, “The real-time price elasticity of electricity,” *Energy Econ.*, vol. 29, no. 2, pp. 249–258, 2007.
- [24] A. Aigner, D.J., Newman, J., Tishler, “The Response of Small and Medium-Size Business Customers to Time-of-Use (TOU) Electricity Rates in Israel,” *J. Appl. Econom.*, pp. 283–304, 1994.
- [25] A. C. Luísa Schmidt, Pedro Prista, “Estudo qualitativo sobre valores, representações e práticas de consumo e EE (ADENE),” 2011.
- [26] I. Adene, L nec, Ineti, *Eficiência energética em equipamentos e sistemas eléctricos no sector residencial*. 2004.
- [27] Commission of the European Communities, “Project EURECO,” 2002.
- [28] a. K. David and Y. Z. Li, “Consumer rationality assumptions in the real-time pricing of electricity,” *IEE Proc. C Gener. Transm. Distrib.*, vol. 139, no. 4, p. 315, 1992.
- [29] Pordata, “PIB per capita.” [Online]. Available: [http://www.pordata.pt/Portugal/PIB+per+capita+\(base+2011\)-2297](http://www.pordata.pt/Portugal/PIB+per+capita+(base+2011)-2297). [Accessed: 24-Nov-2015].
- [30] Pordata, “Consumo de energia eléctrica: total e por tipo de consumo.” [Online]. Available: <http://www.pordata.pt/Portugal/Consumo+de+energia+el%C3%A9ctrica+total+e+por+tipo+de+consumo-1124>. [Accessed: 24-Nov-2015].
- [31] Trading Economics, “Portugal | Economic Forecasts | 2015-2050 Outlook,” 2015. [Online]. Available: <http://www.tradingeconomics.com/portugal/forecast>. [Accessed: 30-Sep-2015].

## Anexos

### Anexo 1:

As máquinas de secar roupa demonstram um pico de consumo, intuitivo e comprovado pela Figura 35, por volta das 16 horas – após a conclusão da lavagem da roupa. Existe um enorme potencial de deslocação de consumo para o período de preço compreendido entre as 4 e as 7 horas onde o consumo de energia por parte destas máquinas aparenta ser nulo.

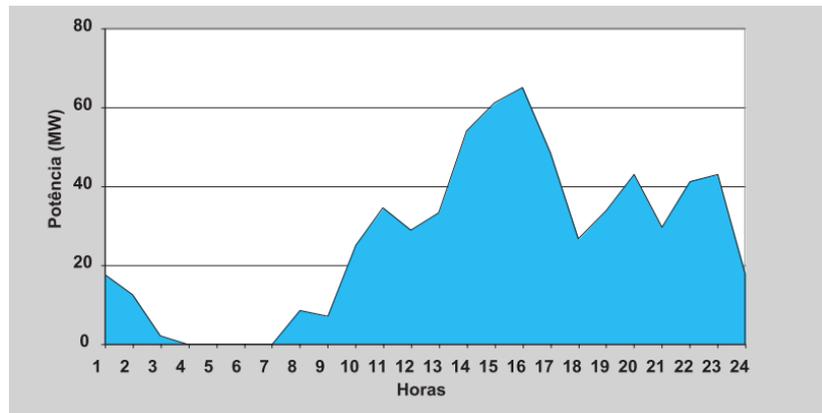


Figura 35: Diagrama de carga das máquinas de secar roupa [26].

O ciclo de funcionamento das máquinas de secar (Figura 36) é completamente diferente do das máquinas de lavar roupa.

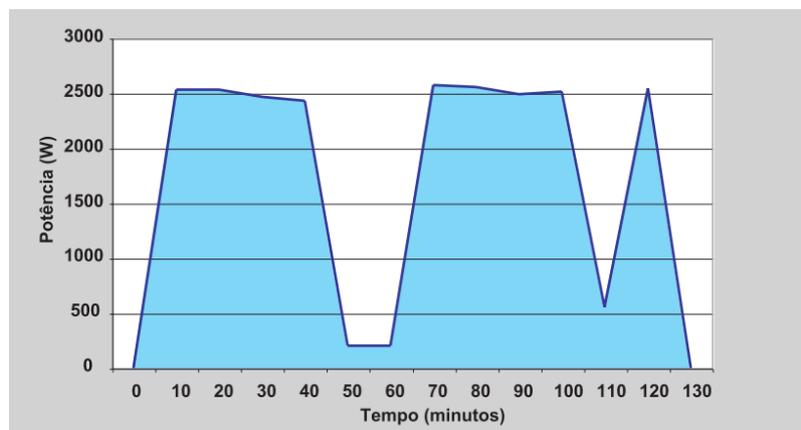


Figura 36: Ciclo típico de funcionamento de uma máquina de secar roupa [26].

Ao contrário do que acontecia com as máquinas de lavar roupa – em que o consumo de ponta era atingido apenas uma única vez durante todo o ciclo e durante um curto espaço de tempo – as máquinas de secar apresentam um ciclo de funcionamento quase sempre a funcionar à potência máxima durante 2 horas.

As máquinas de lavar loiça apresentam uma potência agregada maior depois da hora de jantar, aproximadamente a partir das 21 horas, atingindo o seu pico as 23 horas. No entanto, é ainda visível (Figura 37) o funcionamento distinto e respetivos picos secundários que ocorrem às 11 horas (após o pequeno almoço) e às 15 horas (após o almoço). De novo, observa-se um vazio de funcionamento, desta vez entre as 6 e as 8 horas.

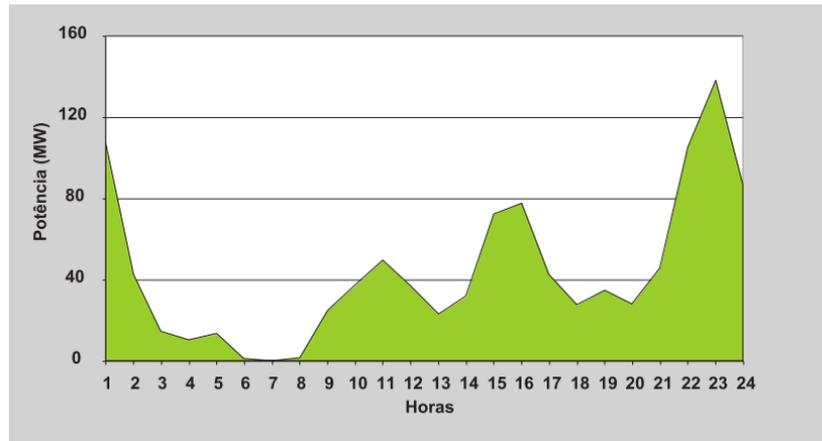


Figura 37: Diagrama de carga das máquinas de lavar loiça [26].

Relativamente ao ciclo típico de funcionamento das máquinas de lavar loiça (Figura 38), observam-se dois picos de potência, associados ao aquecimento da água e à secagem da loiça. Nesta situação, um ciclo típico de lavagem demora menos de 1 hora e meia.

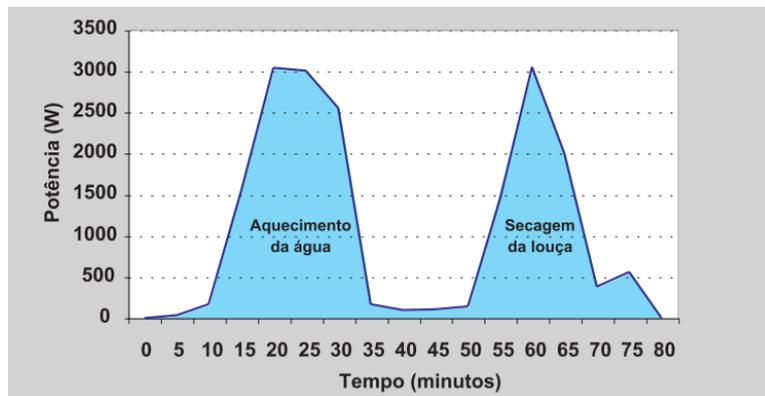


Figura 38: Ciclo típico de funcionamento de uma máquina de lavar loiça [26].

As ideias principais que se retiram desta análise são as de que o funcionamento dos equipamentos nunca demora menos do que 1 hora e meia desde o início ao fim do ciclo de funcionamento, bem como a enorme disponibilidade para aumento da carga entre as 4 e as 8 horas.

Anexo 2:

|         |       |       |        |       |       |       |       |         |         |       |       |       |       |       |        |       |       |       |        |       |       |       |       |
|---------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| -0.170  | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0.129 | 0.153 | 0       | 0       | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.003 | 0.003 | 0     | 0.269 |
| 0       | 0     | 0     | 0      | 0     | 0.310 | 0     | 0     | 0       | 0       | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.018  | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 0       | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0.099 | 0.080 | 0       | 0       | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.018  | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 0       | 0     | 0     | -0.059 | 0     | 0     | 0.061 | 0.053 | 0       | 0       | 0.032 | 0.031 | 0.033 | 0.031 | 0.031 | 0      | 0     | 0     | 0.030 | 0      | 0     | 0     | 0     | 0.032 |
| 0       | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0       | 0       | 0.029 | 0.028 | 0.030 | 0.028 | 0.029 | 0      | 0     | 0     | 0.028 | 0      | 0     | 0     | 0     | 0.029 |
| 0       | 0.310 | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0       | 0       | 0.033 | 0.032 | 0.034 | 0.031 | 0.032 | 0      | 0     | 0     | 0.031 | 0      | 0     | 0     | 0     | 0.033 |
| 0.12905 | 0     | 0.099 | 0.061  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.18517 | 0.11795 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.113 | 0.139 | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 0.15272 | 0     | 0.080 | 0.053  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.23811 | 0.13741 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.131 | 0.167 | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 0       | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0.185 | 0.238 | 0       | 0       | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0.054 | 0      | 0.002 | 0.003 | 0     | 0     |
| 0       | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0.118 | 0.137 | 0       | 0       | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0.077 | 0      | 0.003 | 0.003 | 0     | 0     |
| 0       | 0     | 0     | 0.032  | 0.029 | 0.033 | 0     | 0     | 0       | 0       | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.595 | 0.432 | 0.341 | 0      | 0.003 | 0     | 0     | 0     |
| 0       | 0     | 0     | 0.031  | 0.028 | 0.032 | 0     | 0     | 0       | 0       | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.544 | 0.404 | 0.324 | 0      | 0.003 | 0     | 0     | 0     |
| 0       | 0     | 0     | 0.033  | 0.030 | 0.034 | 0     | 0     | 0       | 0       | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.775 | 0.519 | 0.394 | 0      | 0.003 | 0     | 0     | 0     |
| 0       | 0     | 0     | 0.031  | 0.028 | 0.031 | 0     | 0     | 0       | 0       | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.493 | 0.375 | 0.305 | 0      | 0.003 | 0     | 0     | 0     |
| 0       | 0     | 0     | 0.031  | 0.029 | 0.032 | 0     | 0     | 0       | 0       | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.557 | 0.411 | 0.329 | 0      | 0.003 | 0     | 0     | 0     |
| 0       | 0.018 | 0.018 | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0       | 0       | 0.595 | 0.544 | 0.775 | 0.493 | 0.557 | -0.376 | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0.016 |
| 0       | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0.113 | 0.131 | 0       | 0       | 0.432 | 0.404 | 0.519 | 0.375 | 0.411 | 0      | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.003 | 0.003 | 0     | 0     |
| 0       | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0.139 | 0.167 | 0       | 0       | 0.341 | 0.324 | 0.394 | 0.305 | 0.329 | 0      | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.003 | 0.003 | 0     | 0     |
| 0       | 0     | 0     | 0.030  | 0.028 | 0.031 | 0     | 0     | 0.054   | 0.077   | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | -0.050 | 0.003 | 0     | 0     | 0     |
| 0       | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0       | 0       | 0.003 | 0.003 | 0.003 | 0.003 | 0.003 | 0      | 0     | 0     | 0     | 0.003  | 0     | 0     | 0.370 | 0.003 |
| 0.00267 | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.002   | 0.003   | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.003 | 0.003 | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0.533 |
| 0.00283 | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.003   | 0.003   | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.003 | 0.003 | 0     | 0      | 0.370 | 0     | 0     | 0     |
| 0       | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0       | 0       | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.016 | 0     | 0     | 0      | 0     | 0.533 | 0     | 0     |
| 0.26947 | 0     | 0     | 0.032  | 0.029 | 0.033 | 0     | 0     | 0       | 0       | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.003 | 0     | 0     | 0     |

Figura 39: Matriz de elasticidades para consumidores de curto alcance com escala de cores (Do cinzento ao verde, passando pelo azul, traduz um aumento absoluto das elasticidades).

|        |       |        |          |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |        |          |       |       |       |        |
|--------|-------|--------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|----------|-------|-------|-------|--------|
| -0.021 | 0     | 0      | 0        | 0     | 0     | 0.895 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0      | 0      | 0        | 0.019 | 0.021 | 0     | 0.034  |
| 0      | 0     | 0      | 0        | 0     | 0.039 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.132  | 0      | 0      | 0        | 0     | 0     | 0.079 | 0      |
| 0      | 0     | -0.138 | 0        | 0     | 0     | 0.012 | 0.010 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.131  | 0      | 0      | 0        | 0     | 0     | 0.078 | 0      |
| 0      | 0     | 0      | -0.00739 | 0     | 0     | 0.008 | 0.007 | 0     | 0     | 0.314 | 0.308 | 0.329 | 0.302 | 0.310 | 0      | 0      | 0.301  | 0        | 0.064 | 0.066 | 0     | 0.320  |
| 0      | 0     | 0      | 0        | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.286 | 0.282 | 0.299 | 0.276 | 0.283 | 0      | 0      | 0.276  | 0        | 0.061 | 0.063 | 0     | 0.291  |
| 0      | 0.039 | 0      | 0        | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.322 | 0.316 | 0.338 | 0.310 | 0.318 | 0      | 0      | 0.309  | 0        | 0.065 | 0.067 | 0     | 0.328  |
| 0.895  | 0     | 0.012  | 0.008    | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.818 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.786  | 0.963  | 0        | 0.068 | 0     | 0     | 0      |
| 0      | 0     | 0.010  | 0.007    | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.953 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.910  | 0      | 0        | 0.072 | 0     | 0     | 0      |
| 0      | 0     | 0      | 0        | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0      | 0      | 0.007    | 0     | 0.018 | 0.019 | 0      |
| 0      | 0     | 0      | 0        | 0     | 0     | 0.818 | 0.953 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0      | 0      | 0.010    | 0     | 0.020 | 0.021 | 0      |
| 0      | 0     | 0      | 0.314    | 0.286 | 0.322 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.074  | 0.054  | 0.043  | 0        | 0.015 | 0     | 0     | 0      |
| 0      | 0     | 0      | 0.308    | 0.282 | 0.316 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.068  | 0.051  | 0.041  | 0        | 0.015 | 0     | 0     | 0      |
| 0      | 0     | 0      | 0.329    | 0.299 | 0.338 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.097  | 0.065  | 0.049  | 0        | 0.013 | 0     | 0     | 0      |
| 0      | 0     | 0      | 0.302    | 0.276 | 0.310 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.062  | 0.047  | 0.038  | 0        | 0.016 | 0     | 0     | 0      |
| 0      | 0     | 0      | 0.310    | 0.283 | 0.318 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.070  | 0.051  | 0.041  | 0        | 0.015 | 0     | 0     | 0      |
| 0      | 0.132 | 0.131  | 0        | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.074 | 0.068 | 0.097 | 0.062 | 0.070 | -0.047 | 0      | 0      | 0        | 0     | 0     | 0     | 0.088  |
| 0      | 0     | 0      | 0        | 0     | 0     | 0.786 | 0.910 | 0     | 0     | 0.054 | 0.051 | 0.065 | 0.047 | 0.051 | 0      | -0.127 | 0      | 0        | 0.020 | 0.022 | 0     | 0      |
| 0      | 0     | 0      | 0        | 0     | 0     | 0.963 | 0     | 0     | 0     | 0.043 | 0.041 | 0.049 | 0.038 | 0.041 | 0      | 0      | -0.127 | 0        | 0.019 | 0.020 | 0     | 0      |
| 0      | 0     | 0      | 0.301    | 0.276 | 0.309 | 0     | 0     | 0.007 | 0.010 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0      | 0      | -0.00626 | 0.016 | 0     | 0     | 0      |
| 0      | 0     | 0      | 0        | 0     | 0     | 0.068 | 0.072 | 0     | 0     | 0.015 | 0.015 | 0.013 | 0.016 | 0.015 | 0      | 0      | 0      | 0.016    | 0     | 0.046 | 0     | 0.014  |
| 0.019  | 0     | 0      | 0.064    | 0.061 | 0.065 | 0     | 0     | 0.018 | 0.020 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.020  | 0.019  | 0        | 0     | 0     | 0.067 | 0      |
| 0.021  | 0     | 0      | 0.066    | 0.063 | 0.067 | 0     | 0     | 0.019 | 0.021 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.022  | 0.020  | 0        | 0.046 | 0     | 0     | 0      |
| 0      | 0.079 | 0.078  | 0        | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.088  | 0      | 0      | 0        | 0     | 0.067 | 0     | -0.137 |
| 0.034  | 0     | 0      | 0.320    | 0.291 | 0.328 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0      | 0      | 0        | 0.014 | 0     | 0     | 0      |

Figura 40: Matriz de elasticidades para consumidores de longo alcance com escala de cores (Do cinzento ao verde, passando pelo azul, traduz um aumento absoluto das elasticidades.

|         |       |       |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |       |       |       |        |       |       |       |       |       |
|---------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| -0.1699 | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0.016  | 0.017 | 0     | 0.269 |       |       |
| 0       | 0     | 0     | 0      | 0     | 0.310 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.165  | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0.088 | 0     |       |       |
| 0       | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0.099 | 0.080 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.163  | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0.087 |       |       |
| 0       | 0     | 0     | -0.059 | 0     | 0     | 0.061 | 0.053 | 0     | 0     | 0.260 | 0.255 | 0.272 | 0.250 | 0.257 | 0      | 0     | 0     | 0.249 | 0      | 0.053 | 0.054 | 0     | 0.265 |       |
| 0       | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.237 | 0.233 | 0.247 | 0.229 | 0.234 | 0      | 0     | 0     | 0.228 | 0      | 0.050 | 0.051 | 0     | 0.241 |       |
| 0       | 0.310 | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.267 | 0.262 | 0.280 | 0.256 | 0.263 | 0      | 0     | 0     | 0.256 | 0      | 0.053 | 0.055 | 0     | 0.272 |       |
| 0       | 0     | 0.099 | 0.061  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.980 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.941 | 0     | 0     | 0.083  | 0     | 0     | 0     | 0     |       |
| 0       | 0     | 0.080 | 0.053  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0.087  | 0     | 0     | 0     | 0     |       |
| 0       | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.054 | 0     | 0.015 | 0.015 |       |
| 0       | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0.980 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0.077 | 0      | 0.017 | 0.018 | 0     | 0     |       |
| 0       | 0     | 0     | 0.260  | 0.237 | 0.267 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.595 | 0.432 | 0.341 | 0      | 0.018 | 0     | 0     | 0     |       |
| 0       | 0     | 0     | 0.255  | 0.233 | 0.262 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.544 | 0.404 | 0.324 | 0      | 0.019 | 0     | 0     | 0     |       |
| 0       | 0     | 0     | 0.272  | 0.247 | 0.280 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.775 | 0.519 | 0.394 | 0      | 0.016 | 0     | 0     | 0     |       |
| 0       | 0     | 0     | 0.250  | 0.229 | 0.256 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.493 | 0.375 | 0.305 | 0      | 0.020 | 0     | 0     | 0     |       |
| 0       | 0     | 0     | 0.257  | 0.234 | 0.263 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.557 | 0.411 | 0.329 | 0      | 0.019 | 0     | 0     | 0     |       |
| 0       | 0.165 | 0.163 | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.595 | 0.544 | 0.775 | 0.493 | 0.557 | -0.376 | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0.098 | 0     |       |
| 0       | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0.941 | 0     | 0     | 0     | 0.432 | 0.404 | 0.519 | 0.375 | 0.411 | 0      | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.017 | 0.018 | 0     | 0     |       |
| 0       | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.341 | 0.324 | 0.394 | 0.305 | 0.329 | 0      | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.016 | 0.017 | 0     | 0     |       |
| 0       | 0     | 0     | 0.249  | 0.228 | 0.256 | 0     | 0     | 0.054 | 0.077 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | -0.050 | 0.020 | 0     | 0     | 0     |       |
| 0       | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0.083 | 0.087 | 0     | 0     | 0.018 | 0.019 | 0.016 | 0.020 | 0.019 | 0      | 0     | 0     | 0     | 0.020  | 0     | 0     | 0.370 | 0     | 0.017 |
| 0.01599 | 0     | 0     | 0.053  | 0.050 | 0.053 | 0     | 0     | 0.015 | 0.017 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.017 | 0.016 | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0.533 | 0     |
| 0.017   | 0     | 0     | 0.054  | 0.051 | 0.055 | 0     | 0     | 0.015 | 0.018 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.018 | 0.017 | 0     | 0      | 0.370 | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 0       | 0.088 | 0.087 | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.098  | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0.533 | 0     | 0     |
| 0.26947 | 0     | 0     | 0.265  | 0.241 | 0.272 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0      | 0     | 0     | 0     | 0      | 0.017 | 0     | 0     | 0     | 0     |

Figura 41: Matriz de elasticidades para consumidores “inteligentes” com escala de cores (Do cinzento ao verde, passando pelo azul, traduz um aumento absoluto das elasticidades).