



Combate à fraude como incentivo ao investimento na *smart grid* e o papel da regulação

por

João Fernando Gonzalez Ribeiro

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Economia pela Faculdade
de Economia do Porto

Orientada por:

Professora Doutora Joana Resende

Professora Doutora Paula Sarmento

Setembro, 2015

Nota biográfica

João Fernando Gonzalez Ribeiro nasceu a 3 de Abril de 1991 no Porto.

Em Setembro de 2009 ingressou na Licenciatura em Economia na Universidade Católica Portuguesa-Centro Regional do Porto, que concluiu em Janeiro de 2013.

Em Setembro de 2013 ingressou no Mestrado em Economia da Faculdade de Economia da Universidade do Porto, tendo concluído a componente curricular em Janeiro de 2015.

Agradecimentos

A realização desta dissertação representa o culminar de um percurso que contou com o contributo de muitas pessoas que de diferentes formas contribuíram para a sua concretização e a quem desejo expressar o meu agradecimento.

Em primeiro lugar, às minhas orientadoras, Professora Doutora Joana Resende e Professora Doutora Paula Sarmento por um ano de trabalho, pela partilha de saber, pela orientação científica e pela disponibilidade que sempre demonstraram;

Aos professores da FEP do Mestrado em Economia, por terem contribuído para a minha formação, partilhando conhecimento e experiência;

Aos colegas de mestrado, que me acompanharam nestes dois anos, pelos momentos de convívio e de enriquecimento pessoal e académico;

À minha família pelo seu apoio incondicional.

Resumo

Nos últimos anos a rede elétrica convencional tem vindo a ser transformada numa rede mais “inteligente”, denominada *smart grid*. Esta tendência vai continuar no futuro, quer seja por convicção das empresas envolvidas nas vantagens que daí advêm, quer seja por requisitos impostos legalmente no sentido de promover essa mudança.

O objetivo da dissertação é verificar se o combate à fraude é um incentivo suficiente a que as empresas de eletricidade invistam na *smart grid* e em *smart meters*.

Para o efeito é introduzido um modelo económico, num contexto de mercado livre, em que a realização de um investimento permite a uma empresa distribuidora de eletricidade recuperar as receitas perdidas por comportamentos fraudulentos dos consumidores. Na resolução do modelo verifica-se que o investimento é atrativo para a empresa sob algumas condições, relacionadas com a probabilidade de deteção da fraude, o valor da multa imposta pela empresa aos consumidores fraudulentos ou as características da procura de eletricidade. São ainda analisados os efeitos de alterações nestas variáveis sobre a atratividade do investimento

Tendo em conta que na maioria dos mercados de distribuição de eletricidade existe regulação do preço são apresentadas algumas linhas orientadoras para o desenvolvimento de um modelo com regulação, que poderá ser desenvolvido em trabalhos futuros.

Códigos-JEL: L51, L94

Palavras-chave: Setor elétrico, *Smart grid*, *Smart meter*, Regulação, Fraude

Abstract

In the past few years the conventional electrical grid has been transformed to become a smarter grid, the so-called smart grid. This transformation will continue in the future, either because the companies involved believe in the advantages of the smart grid or because they have to comply with legislation requiring such transformation

This dissertation investigates if the advantages of these technologies in what concerns fraud detection is enough to encourage companies to invest in the smart grid and smart meters.

To this end, we introduce an economic model, set in a free market context, in which an investment allows an electricity distribution company to recover the revenue lost due to fraudulent behavior of customers. In the model resolution we found that the investment is attractive for the firm under certain conditions, involving the probability of fraud detection, the value of the fine imposed by the firm to fraudulent consumers or the features of electricity demand.

Considering that in the majority of electricity distribution markets companies are subject to price regulation we present some guidelines for a new model with price regulation that may be developed in future works.

JEL-codes: L51, L94

Key-words: Electricity sector, *Smart grid*, *Smart meter*, Regulation, Fraud

Índice

Nota biográfica	i
Agradecimentos	ii
Resumo	iii
Abstract.....	iv
Índice	v
Índice de quadros	vii
Índice de figuras.....	viii
Lista de abreviaturas	ix
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Motivação e objetivos da dissertação.....	1
1.3. Organização da dissertação	2
2. <i>Smart Grid</i> e o setor elétrico	3
2.1. Smart Grid: definição	3
2.2. Rede convencional Vs <i>Smart Grid</i>	4
2.3. <i>Smart Meters</i>	7
2.4. Impacto da <i>Smart Grid</i>	10
3. Fraude no sector elétrico e o papel da <i>smart grid</i>	12
3.1. Fraude: definição.....	12
3.2. Fraude no setor elétrico	13
3.3. Efeitos da <i>Smart Grid</i> na redução da fraude	15
4. Regulação Económica	21
4.1. Regulação pela taxa de retorno	21
4.1.1. O Efeito Averch-Johnson.....	22
4.2. Regulação por incentivos	23
4.2.1. Price-Cap.....	23
4.2.2. Efeito <i>ratchet</i>	24
4.3. Regulação pela Taxa de Retorno Versus <i>Price-Cap</i>	24

4.3.1.	Evidência empírica.....	25
4.3.2.	Vantagens e desvantagens relativas de cada mecanismo	25
4.3.3.	Mecanismos adoptados no setor elétrico europeu	27
4.4.	Medidas regulatórias de incentivo ao investimento na <i>Smart Grid</i>	28
4.4.1.	O caso Português.....	28
5.	Combate à fraude como incentivo ao investimento em <i>smart meters</i>	31
5.1.	O mercado de distribuição de eletricidade	31
5.2.	Mercado sem regulação.....	34
4.1.1.	Preços de equilíbrio.....	37
4.1.2.	Efeito do investimento sobre os lucros da empresa	38
4.1.3.	Efeitos dos parâmetros no valor do investimento crítico	40
4.2.	Extensão do modelo para o cenário de um mercado com regulação	47
5.	Conclusão	48
	Referências bibliográficas.....	49

Índice de quadros

Quadro 1 – Quadro resumo.....	27
Quadro 2 – Tipo de regulação por país.....	27
Quadro 3 – Valores dos parâmetros para simulação.....	40

Índice de figuras

Figura 1 – Cadeia de valor do setor elétrico em Portugal.....	4
Figura 2 – Rede convencional	6
Figura 3 – <i>Smart Grid</i>	7
Figura 4 – Smart meter operacional.....	8
Figura 5 – Energy Box.....	9
Figura 6 – Veículo plug-in.....	11
Figura 7 – “Triângulo da Fraude”.....	13
Figura 8 – Perdas na rede de distribuição em Portugal.....	14
Figura 9 – Ligações diretas à rede de distribuição.....	15
Figura 10 – Funcionamento do sistema proposto por Depuru et al. (2011)	16
Figura 11 – Previsão dos efeitos do sistema proposto na Índia por Depuru et al. (2011)	17
Figura 12 – Evolução dos investimento na <i>smart grid</i>	29
Figura 13 – Efeito da variação de $\underline{\alpha}$ sobre k^*	41
Figura 14 – Efeito da variação de $\underline{\delta}$ sobre k^*	42
Figura 15 – Efeito da variação de β sobre k^*	44
Figura 16 – Efeito da variação de θB sobre k^*	45
Figura 17 – Efeito da variação de c sobre k^*	46

Lista de abreviaturas

CEER	Conselho dos Reguladores Europeus de Energia
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
PRE	Produção em regime especial
REN	Redes Energéticas Nacionais
RNT	Rede Nacional de Transporte de Eletricidade

1. Introdução

1.1. Enquadramento

A rede elétrica convencional, que existe desde o final do séc. XIX (Edison Tech Center, 2015), tem vindo a ser transformada, e continuará a sê-lo nos próximos anos, numa rede mais “inteligente”, à qual se dá o nome de *smart grid*.

Esta mudança continuará a ser feita, seja por convicção das empresas envolvidas nas vantagens que daí advêm ou, simplesmente, para cumprir legislação que impõe essa mudança.

Neste contexto, a transformação da rede elétrica não pode ser abordada sem ter em conta o papel dos reguladores e o impacto que estes têm nas decisões de investimento das empresas do setor da eletricidade

1.2. Motivação e objetivos da dissertação

A Comissão Europeia, em relatório de 2015 (Comissão Europeia, 2015), considera que uma das principais causas que levou ao aumento do défice tarifário em Portugal “foi um aumento significativo do consumo fraudulento de eletricidade nos últimos anos” sendo um desafio fundamental a resolver por parte das autoridades portuguesas.

O objetivo da dissertação é responder à questão de investigação “O combate à fraude é um incentivo suficiente a que as empresas de eletricidade invistam na *smart grid* e em *smart meters*?”. Este estudo é relevante pois não existem muitos trabalhos que estudem economicamente, do ponto de vista da empresa, o impacto que o investimento nestas tecnologias pode ter na redução da fraude e consequentemente no aumento de receitas da empresa.

Neste contexto, a dissertação desenvolve um modelo que estuda o impacto que os *smart meters* podem ter na recuperação de receitas de uma empresa distribuidora de eletricidade e em que condições as receitas recuperadas compensam o investimento.

1.3. Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada em seis capítulos principais, sendo o primeiro a presente introdução.

No segundo capítulo é abordada a *smart grid* onde é definido o conceito, é feita uma comparação entre a rede convencional de eletricidade e a rede inteligente de forma a perceber as diferenças e as vantagens de se investir na *smart grid*. É abordado o caso específico dos *smart meters*, como componente essencial da *smart grid*, dando enfoque ao exemplo português. Por fim são analisadas as vantagens da *smart grid* e qual o impacto que alguns países pretendem obter.

O terceiro capítulo estuda a fraude no setor elétrico e o papel que a *smart grid* pode ter na diminuição deste problema. Para o efeito é realizado um levantamento na literatura do conceito de fraude. Em seguida é explicado em que consiste a fraude no setor elétrico. Por fim são apresentados alguns estudos que analisam o impacto que a *smart grid* pode ter no combate à fraude.

No quarto capítulo é realizada uma revisão de literatura sobre regulação económica que se justifica na medida em que as empresas do setor elétrico estão normalmente, como é o caso português, sujeitas a regulação económica. Neste capítulo é essencialmente feito um confronto entre a regulação pela taxa de retorno e a regulação por incentivos. Por fim são analisadas medidas regulatórias que incentivam as empresas a investir na *smart grid*.

No quinto capítulo é desenvolvido um modelo que pretende estudar se o investimento em *smart meters*, como forma de combate à fraude, é um investimento rentável para uma empresa distribuidora de eletricidade.

No sexto e último capítulo são enunciadas as conclusões da dissertação e as possíveis investigações futuras.

2. *Smart Grid* e o setor elétrico

Este capítulo começa por identificar algumas definições de *smart grid* adotadas por instituições relevantes na área da energia. Para compreender em que consiste a *smart grid* é necessário perceber o contexto em que se insere e nesse sentido é feita uma descrição da cadeia de valor do sector elétrico em que se compara a rede convencional de energia com a *smart grid*. Tendo em conta o modelo que vai ser desenvolvido nesta dissertação é dado um enfoque especial aos contadores inteligentes de eletricidade, doravante *smart meters*.

2.1. *Smart Grid*: definição

Nesta seção apresentam-se algumas definições de *smart grid* de forma a perceber o que distingue este novo modelo de rede elétrica face às redes convencionais de eletricidade. Blumsack e Fernandez (2012) definem *smart grid* como sendo a aplicação das infraestruturas modernas de comunicações aos vários segmentos da rede elétrica.

A ERSE adota a definição seguida pelo CEER - Conselho dos Reguladores Europeus de Energia: “Smart grid é uma rede elétrica que pode integrar com custos eficientes, os comportamentos e ações de todos os utilizadores que a ela estejam ligados – produtores, consumidores e aqueles que podem ser ambos – e assegurar a existência de um sistema elétrico sustentável e economicamente eficiente, com baixas perdas, elevados níveis de segurança para pessoas e bens, elevados níveis de qualidade de serviço e de segurança de abastecimento” (ERSE, 2015c).

Também a nível europeu, a *European Technology Platform Smart Grids*¹ define *smart grid* como “rede de energia elétrica que inteligentemente integra as ações de todos os usuários a si conectados – geradores, consumidores, e aqueles que fazem as duas coisas – com o fim de produzir com eficiência fontes de energia sustentáveis, económicas e seguras.”²

¹ Fórum europeu de reflexão e investigação sobre a tecnologia e políticas associadas, financiado pela União Europeia

² Tradução própria de citação em <http://www.smartgrids.eu/ETPSmartGrids> [acedido em 20-01-2015]

Nos EUA, o *U.S Department of Energy* define *smart grid* como “uma classe de tecnologia que as pessoas estão a usar para trazer os sistemas de distribuição de energia elétrica para o século 21, usando controlo remoto e automação baseada em computador.”³

Tendo em conta estas definições pode-se concluir que a *smart grid* constitui uma aplicação do progresso tecnológico na modernização das redes elétricas convencionais, o que permite ganhos em vários domínios, nomeadamente ao nível económico, ambiental, de segurança e de qualidade.

2.2. Rede convencional Vs Smart Grid

De forma a perceber como a *smart grid* afeta o setor elétrico é necessário ter em conta qual a cadeia de valor do setor e a forma como cada interveniente está ligado e quais as diferenças que a *smart grid* introduz face a uma rede convencional.

A tradicional cadeia de valor do sector elétrico inclui a produção, transporte, distribuição e comercialização de energia elétrica. Em Portugal as atividades de transporte e distribuição são totalmente reguladas existindo os seguintes intervenientes.

Figura 1 – Cadeia de valor do setor elétrico em Portugal



Fonte: Adaptado de Galp Energia (2015)

³Tradução própria de citação em <http://energy.gov/oe/services/technology-development/smart-grid>, [acedido em 20-01-2015]

Detalhando o exemplo português, tradicionalmente a produção era de origem, essencialmente, térmica, sendo que mais recentemente aumentou a produção de energia com base em fontes renováveis como a energia eólica, energia solar, centrais mini-hídricas e centrais térmicas que efetuam a combustão de biomassa e biogás. Na área das renováveis a energia eólica e as mini-hídricas são as que têm um maior peso no total da produção de eletricidade. A energia elétrica por cogeração, que consiste na produção combinada de calor e eletricidade, em que o calor produzido na combustão é utilizado para fins industriais e de aquecimento, também tem aumentado (ERSE, 2015e).

A produção de energia através de recursos endógenos, tanto renováveis como não renováveis, e a cogeração são considerados Produção em Regime Especial (PRE) tendo um regime especial de apoio pois apresentam vantagens ambientais, através de uma maior implementação de energias renováveis, e diminuem a dependência externa, uma vez que são utilizados recursos endógenos. Em 2014 a PRE totalizou 45% da energia consumida em Portugal (ERSE, 2015f).

A atividade de transporte de energia elétrica engloba o desenvolvimento, exploração e manutenção da Rede Nacional de Transporte (RNT), das suas interligações com outras redes e a gestão técnica global do sistema. Faz também parte desta atividade assegurar a coordenação das instalações de produção e de distribuição de forma a manter a continuidade e a segurança do abastecimento e um funcionamento integrado e eficiente de todo o sistema. A concessão da atividade de transporte está atribuída à empresa REN (ERSE, 2015g).

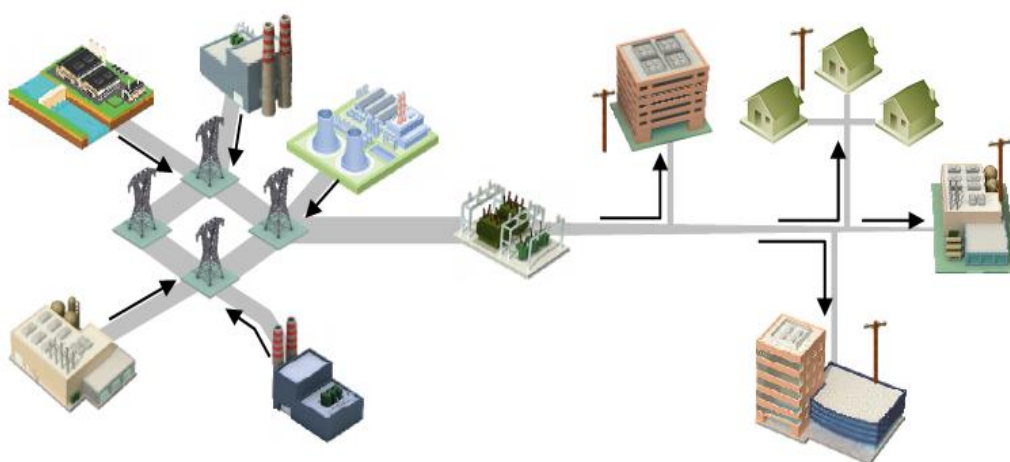
As redes de distribuição servem para fazer o escoamento da energia elétrica da RNT para as instalações consumidoras. Incluem linhas aéreas, cabos subterrâneos, subestações, postos de seccionamento, postos de transformação e equipamentos acessórios ligados à sua exploração (ERSE, 2015c).

Tradicionalmente a comercialização de energia elétrica é atribuída aos distribuidores. Em Portugal a comercialização de energia elétrica foi liberalizada procedendo-se à separação da atividade de distribuição da atividade de comercialização. O objetivo, segundo a ERSE, foi introduzir “concorrência no setor suscetível de aumentar a eficiência das empresas e de gerar benefícios para os consumidores”. Os comercializadores compram e vendem eletricidade de forma livre, tendo acesso às redes de transporte e distribuição por contrapartida do pagamento de uma tarifa definida pelo

regulador. De forma a salvaguardar os consumidores em situação mais frágil foi criada a figura do comercializador de último recurso que serve como garante de fornecimento de eletricidade em condições de qualidade e continuidade de serviço (ERSE, 2015a).

Feita a descrição da cadeia de valor do setor elétrico ilustrada com o exemplo de Portugal pode ser feita a comparação entre a rede convencional e a *smart grid*. A rede convencional, representada na figura 2 abaixo, caracteriza-se pela existência de grandes centrais geradoras de energia, reproduzidas no lado esquerdo da figura, que estão ligadas a redes de transporte, representadas pelas torres na esquerda da figura ao centro, que por sua vez estão ligadas a redes de distribuição local que fornecem energia ao consumidor final: habitações, empresas e indústria, representadas no lado direito da figura. Ou seja, verifica-se que a energia flui num sentido único: geração, transporte, distribuição e consumidor final (Electric Power Research Institute, 2011).

Figura 2 – Rede convencional

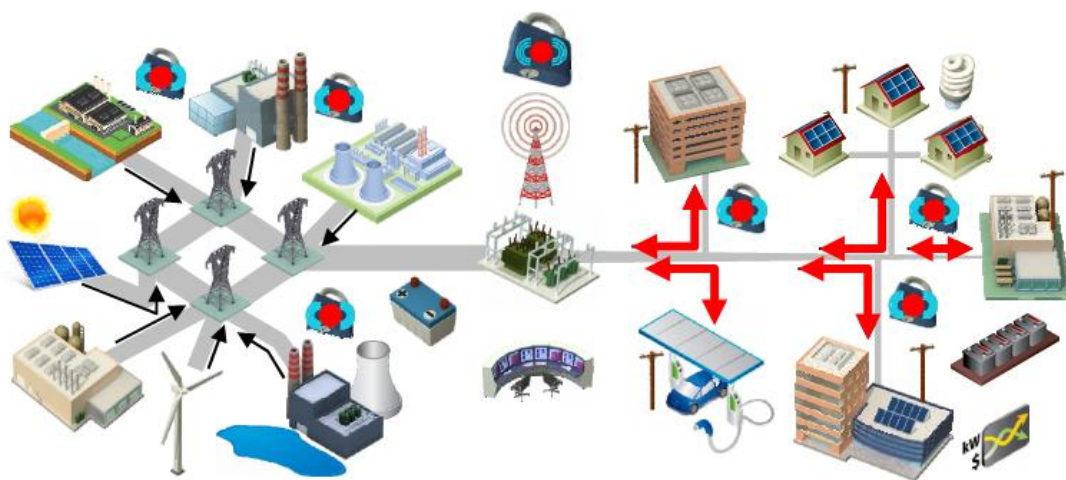


Fonte: Electric Power Research Institute(2011)

Por oposição, a *smart grid* envolve um maior número de estruturas e com uma relação mais complexa como se pode ver na figura 3 abaixo. Esta nova rede continua a depender de grandes centrais geradoras de energia mas já inclui fontes de energia renováveis representadas na figura, por exemplo, por aerogeradores que convertem energia eólica em energia elétrica. Verifica-se também que o consumidor final pode

passar a ser também produtor de energia o que está representado na figura pelas habitações que possuem painéis solares. Nesta medida marca-se uma diferença face à rede convencional uma vez que a energia deixa de fluir em sentido único tal como representam as setas vermelhas (Electric Power Research Institute, 2011).

Figura 3 – *Smart Grid*



Fonte: Electric Power Research Institute (2011).

Para gerir toda esta rede são necessárias tecnologias modernas de comunicação. Nesse sentido os *smart meters* são parte essencial como será explicado de seguida.

2.3. *Smart Meters*

A ERSE considera que a introdução dos *smart meters* é um primeiro passo essencial para a implementação da *smart grid* na medida em que estes possuem uma série de vantagens face aos contadores convencionais: as leituras dos contadores são feitas de forma remota deixando de ser feita uma faturação por estimativa; a informação é mais completa e desagregada, o que favorece a eficiência energética, permite uma oferta de preços mais sofisticada por parte dos comercializadores e uma maior eficiência na operação da rede (ERSE, 2015b).

Também no contexto europeu, na sequência de diretiva⁴ da Comissão Europeia, que determina um quadro comum para políticas de promoção de eficiência energética na União Europeia que tem como objetivo alcançar “20 % em matéria de eficiência energética até 2020, e de preparar caminho para novas melhorias nesse domínio para além dessa data” surge a implementação de *smart meters* como uma das ferramentas para atingir o objetivo proposto e que são definidos na diretiva da seguinte forma: “ “Sistema de contador inteligente», um sistema eletrónico que mede o consumo de energia, fornecendo mais informações do que um contador convencional, e que está preparado para transmitir e receber dados através de comunicações eletrónicas”.

Figura 4 – Smart meter operacional



Fonte: ITProPortal (2015)

Em Portugal foi lançado em 2010 pela EDP o conceito “InovCity”, no concelho de Évora, onde foram instalados cerca de 30.000 *smart meters* para clientes de baixa tensão, ou seja, clientes domésticos, pequeno comércio e indústria (InovCity, 2015).

Os *smart meters* instalados em Évora denominam-se “Energy Box” (Figura 5.), substituem os contadores convencionais, e permitem aos consumidores conhecer informação detalhada sobre o seu consumo, nomeadamente os períodos do dia em que o preço da eletricidade é mais alto e os períodos do dia em que o preço da eletricidade é mais baixo. Isto permite aos consumidores escolherem de forma informada qual o tarifário, a potência e o ciclo mais adequado à sua situação. A tecnologia permite que estas escolhas sejam feitas sem a necessidade da deslocação de técnicos especializados da empresa.

⁴ “DIRETIVA 2012/27/UE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 25 de outubro de 2012 relativa à eficiência energética, que altera as Diretivas 2009/125/CE e 2010/30/UE e revoga as Diretivas 2004/8/CE e 2006/32/CE”

Figura 5 – Energy Box



Fonte: Janz (2015)

A “Energy Box” permite ainda consultar uma análise do padrão de consumo, fazer simulações de ciclos horários e programar avisos automáticos em função de parâmetros definidos pelo próprio consumidor. Os microprodutores conseguem com esta tecnologia identificar os períodos em que são produtores e em que são consumidores. Os comercializadores de energia podem, com os dados fornecidos pela “Energy Box”, oferecer serviços e tarifários personalizados de acordo com os perfis e necessidades de consumo dos seus clientes (“Energy box”, 2015⁵),

Mais tarde a experiência em Évora foi replicada em Viana do Castelo, Aveiro, Cantanhede, Santarém/Coruche e Lisboa, embora a sua aplicação estivesse sujeita a críticas por parte de várias entidades. A “DECO – Associação Portuguesa para a Defesa do Consumidor” divulgou que recebeu “queixas relativas à substituição dos contadores sem pré-aviso e sem possibilidade de o cliente verificar a contagem antes e depois da mudança, dificuldades em retirar as leituras e na leitura dos painéis dos contadores inteligentes”. A EDP Distribuição afirma que foram feitas sessões de esclarecimento, foram dadas explicações pelos técnicos e foram oferecidos manuais a todos os utilizadores. Afirmou também que quando a mudança for generalizada será feita uma campanha de informação nacional. Entretanto, e na sequência de diretiva da Comissão

⁵ “Energy box”, <http://www.inovcity.com/pt/inovcity/casas-inteligentes/energy-box/> [acedido em 26.05.2015]

Europeia referida anteriormente, já está a ser planeada a mudança generalizada, pois até 2020 pelo menos 80% dos contadores instalados em Portugal deverão ser inteligentes, se a análise custo-benefício for positiva. A ERSE está encarregue de realizar o estudo de custo-benefício não o tendo divulgado à data de conclusão desta dissertação (Dinheiro Vivo, 2015).

2.4. Impacto da *Smart Grid*

A *smart grid* tem sensores instalados ao longo da sua extensão que lhe permitem controlar ao instante a situação de toda a rede, gerir as cargas e prevenir avarias. Estes sensores permitem reagir a cada momento às ações dos consumidores, quando estes, por exemplo, pedem um aumento de potência, e às ações dos produtores, por exemplo, quando inserem energia na rede. O denominado “auto-controlo inteligente” permite em caso de avaria rapidamente configurar a rede de forma a que sejam redirecionados os fluxos de energia para a garantir o fornecimento de eletricidade sem interrupções.

As vantagens da *smart grid* atravessam vários domínios: é mais eficiente, uma vez que permite uma melhor gestão da rede, permite diminuir os custos operacionais e um maior controlo sobre todas as fontes de produção de energia; é mais dinâmica, pois permite uma generalização da microprodução e promove uma relação mais próxima entre o microprodutor e o distribuidor; é ambientalmente mais sustentável na medida em que aposta na geração de energia através de fontes renováveis, o que leva a uma diminuição do peso relativo da energia produzida através de combustíveis fósseis e consequentemente a uma redução das emissões de dióxido de carbono; é mais inovadora, ao promover uma renovação tecnológica através da automatização da gestão das redes e permite uma maior flexibilidade e qualidade de fornecimento de energia. Em suma, as vantagens da *smart grid* são transversais desde o consumidor, que pode agora também pode ser produtor, ao comercializador, distribuidor e sociedade no seu todo.⁶

Apesar de as vantagens estarem presentes em vários domínios e serem transversais a toda a sociedade, cada país pretende obter impactos específicos com a implementação da *smart grid*, que vão ao encontro das suas necessidades específicas e que são elencados

⁶ “Redes inteligentes”, <http://www.inovcity.com/pt/rede-inteligente/> [acedido em 26.05.2015].

no trabalho de Clastres (2011): Em França a tecnologia está a ser desenvolvida como forma de fornecer mais informação aos consumidores, controlar a procura, aumentar a qualidade da oferta e da operação do mercado de energia e limitar os custos para os operadores das redes de distribuição; Na Dinamarca e Suécia as *smart grids* são vistas como uma forma de aumentar o uso de veículos *plug-in*⁷; Em Espanha pretende-se aumentar a qualidade da oferta com menos incidentes; Em Portugal pretende-se melhorar a integração das fontes de energia renovável no sistema elétrico; Em Itália espera-se que a *smart grid* possa ajudar a diminuir situações de fraude; Na Holanda pretende-se poupar energia e diminuir as emissões de gases com efeitos de estufa; No Reino Unido pensa-se ser possível aumentar a disponibilidade de soluções de energia dual⁸, o que leva a economias de escala na produção e instalação de contadores.

Figura 6 – Veículo plug-in



Fonte: How Stuff Works (2015)

⁷*Plug-in* são veículos que podem ser carregados através de uma fonte externa de eletricidade, como por exemplo, uma tomada elétrica.

⁸Sistema que usa duas fontes de energia, por exemplo eletricidade e combustível.

3. Fraude no sector elétrico e o papel da *smart grid*

Nesta seção vai ser analisada a fraude no setor elétrico. Este será o problema que se pretende analisar no modelo apresentado nesta dissertação. Para contextualizar o tema da fraude será apresentado em primeiro lugar um conceito universal de fraude. De seguida será tratado o caso particular da fraude no sector elétrico. Por fim é abordado qual o papel que a *smart grid* pode ter no combate à fraude no sector elétrico à luz do atual *state-of-the-art*.

3.1. Fraude: definição

Antes de ser abordada a problemática da fraude no setor elétrico é necessário ter uma noção do conceito de fraude. De acordo com o trabalho de Gonçalves e Pimenta (2014, p. 23), a fraude corresponde ao “ato intencional de pessoas, individuais ou coletivas, perpetrado com logro, e que provoca, efetiva ou potencialmente, dano a cidadãos e instituições, violando as boas práticas ou a lei”. Brytting et al. (2011, p. 5) apresentam a definição do *Institute of International Auditors*⁹ que considera que as fraudes são “praticadas por indivíduos e organizações para obter dinheiro, propriedade ou serviços; para evitar o pagamento ou perda de serviços; ou para assegurar vantagens pessoais ou profissionais.”¹⁰

Este conceito pode também ser explicado através do modelo denominado “Triângulo da Fraude” representado na Figura 6 abaixo (Wells, 2007).

Neste modelo a fraude ocorre quando os três seguintes fatores se conjugam: pressão, oportunidade e justificação. O primeiro fator para a ocorrência de uma fraude é a pressão, por exemplo, uma necessidade urgente de dinheiro; o segundo fator é a existência de uma oportunidade, ou seja, a possibilidade de enganar sem ser apanhado, o que pode ocorrer através da posse de informação privilegiada, pela existência de fracos sistemas de controlo, entre outros; o terceiro fator relaciona-se com a justificação do ato

⁹ Associação profissional de auditores internacional com sede nos E.U.A..

¹⁰ Tradução própria.

em si, isto é, quando é dado um maior peso às explicações favoráveis para a prática da fraude do que às explicações desfavoráveis. Para além destes três fatores, é necessário ter a capacidade técnica para cometer uma fraude.

Figura 7 – “Triângulo da Fraude”



Fonte: Wells (2009)

3.2. Fraude no setor elétrico

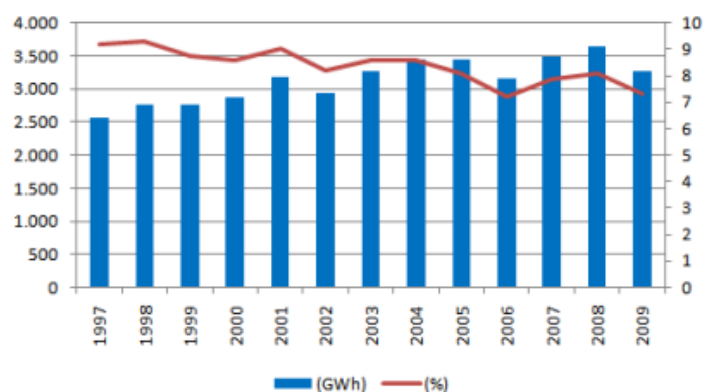
Em todo o ciclo de valor da eletricidade ocorrem muitas perdas operacionais. Se por um lado é possível determinar tecnicamente as perdas na fase de geração, por outro lado é difícil determinar as perdas nas fases de transporte e distribuição. As perdas nestas duas fases são divididas em dois grupos: perdas técnicas, por exemplo a dissipação de energia nas linhas de transmissão, e perdas não técnicas (PNT), causadas por fatores externos ao sistema. Em muitos países em desenvolvimento as PNT podem totalizar entre 10 a 40% da energia produzida (Smith, 2004).

Pode ser observado na figura seguinte o valor das perdas nas redes de distribuição em Portugal entre 1997 e 2009.

Figura 8 – Perdas na rede de distribuição em Portugal

Perdas na rede de distribuição
Distribution grid losses

	Perdas Losses (GWh)	Fornecimentos energia elétrica (exclui MAT) Electricity supply (VHV excluded) (GWh)	Taxa de perdas Losses rate (%)
1997	2 570	28 032	9,2
1998	2 757	29 645	9,3
1999	2 756	31 538	8,7
2000	2 877	33 546	8,6
2001	3 191	35 248	9,1
2002	2 948	36 056	8,2
2003	3 258	37 842	8,6
2004	3 451	40 094	8,6
2005	3 439	42 495	8,1
2006	3 168	44 042	7,2
2007	3 498	44 481	7,9
2008	3 633	44 802	8,1
2009	3 277	44 608	7,3



Fonte - Source: EDP e EDP Distribuição

Fonte: ERSE (2015d)

Verifica-se que entre 1997 e 2009 houve uma redução de perdas de 1,9 pontos percentuais com oscilações ao longo do período.

Uma grande parte das PNT deve-se ao roubo de eletricidade (Depuru et al., 2011). Este pode ser feito através dos seguintes métodos: ligação direta à rede de distribuição, como se pode ver na figura 9 abaixo, manipulação dos contadores e vários métodos físicos que permitem evitar pagar pela utilização de eletricidade (Dick, 1995).

Figura 9 – Ligações diretas à rede de distribuição



Fonte: Jamaica Observer

Para detetar estas perdas não técnicas têm vindo a ser sido realizados vários estudos que utilizam técnicas computacionais para que as inspeções feitas para detetar a existência de fraude sejam mais eficientes, não só encontrando mais casos fraudulentos mas também reduzindo os custos operacionais deste combate (Cabral et al., 2006; Cabral et al., 2009; Depuru et al., 2013).

Em Portugal o número de fraudes tem vindo a aumentar. Enquanto que em 2012 foram detetadas cerca 14 mil fraudes, em 2014 o número ascendeu a 40 mil. Os principais métodos utilizados são as ligações abusivas, viciação de contadores e manipulação da potência contratada. Os prejuízos resultantes destas práticas, segundo a EDP Distribuição, ascendem a 50 milhões de euros por ano e representam também uma perda para o Estado Português que não recebe o IVA da faturação em falta (Diário de Notícias, 2015).

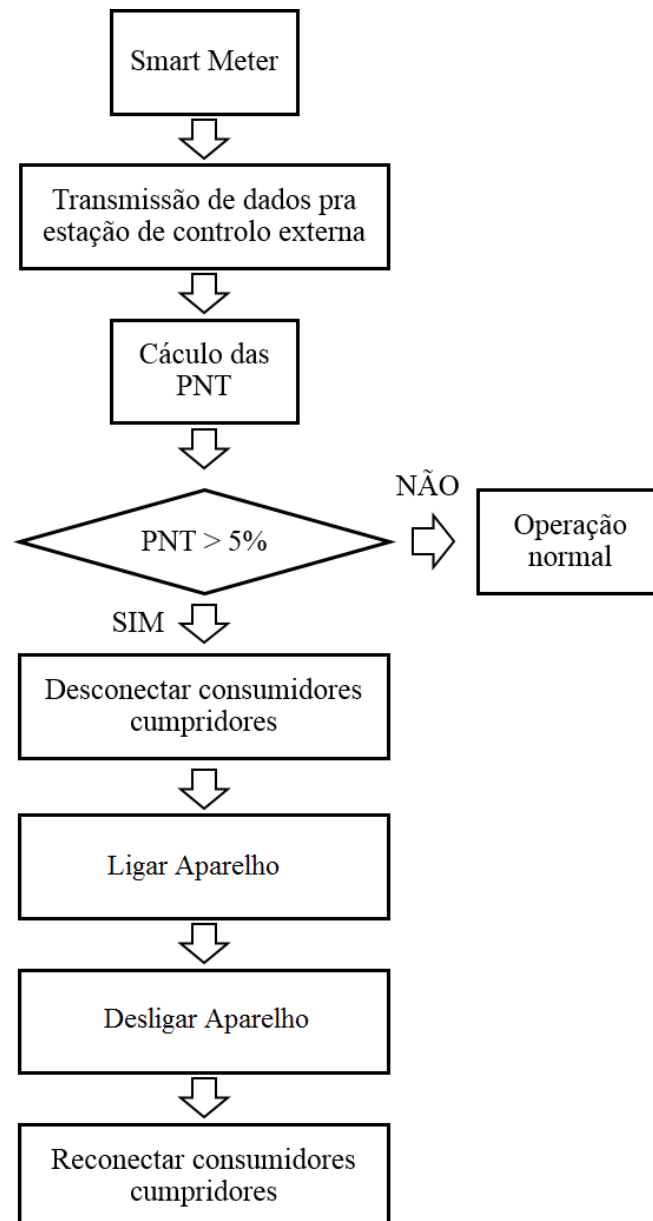
3.3. Efeitos da *Smart Grid* na redução da fraude

Depuru et al. (2011) propõem um sistema assente nos *smart meters*, como forma de combater o roubo de eletricidade. Esta proposta constitui uma mudança de paradigma

face aos métodos convencionais de detecção deste tipo de ilícitos, como, por exemplo, a observação no local.

O fluxograma do funcionamento do sistema proposto por Depuru et al. (2011) pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – Funcionamento do sistema proposto por Depuru et al. (2011)



Fonte: Adaptado de Depuru et. al (2011)

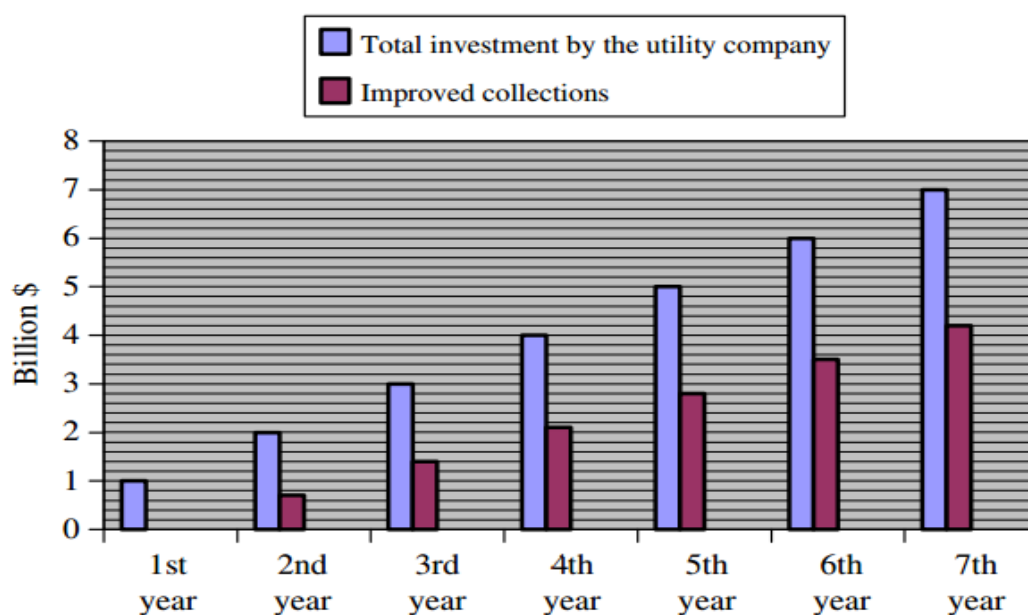
Detalhando o funcionamento do sistema, os *smart meters* instalados em todas as casas transmitem valores instantâneos de consumo de eletricidade para uma estação de

controle externa da empresa de eletricidade. Com os dados que recebe a estação calcula o valor total de PNT. Como se pode ver na Figura 10, se os valores de PNT foram superiores a 5% do total de eletricidade distribuída a estação de controlo manda um sinal para o *smart meter* para desconectar os consumidores cumpridores da rede de eletricidade. Assim, este processo permite identificar quais são os consumidores cumpridores e isolá-los da rede, ficando apenas os consumidores ilegais a consumir energia. De seguida é ligado um aparelho, durante alguns segundos, com o propósito de criar interferências que prejudicam o bom funcionamento dos eletrodomésticos dos consumidores ilegais. Por fim, e a após desligar o aparelho, a estação de controlo envia de novo um sinal para os *smart meters* para voltar a ser ligada a eletricidade dos consumidores cumpridores.

Este sistema tem dois inconvenientes: em primeiro lugar implica que durante um período, ainda que curto, os consumidores cumpridores fiquem sem eletricidade; em segundo lugar implica comprometer a performance dos eletrodomésticos dos consumidores ilegais o que pode ser questionável do ponto de vista ético e até legal.

Depuru et al. (2011) apresentam uma estimativa do impacto que a implementação do sistema proposto pode ter no aumento de receitas resultantes da diminuição do roubo de eletricidade na Índia e que se pode ver na figura seguinte.

Figura 11 – Previsão dos efeitos do sistema proposto na Índia por Depuru et al. (2011)



Fonte: Depuru et al. (2011)

Neste estudo é estimado que o valor total do investimento em *smart meters* será de 6.400 milhões de dólares. É proposto que o investimento vá sendo feito gradualmente pela empresa ao longo de 7 anos, como se pode observar na Figura 11. No final deste período de 7 anos o ganho anual com o investimento, ou seja, a receita anual resultado da redução da fraude, é estimado em 4.000 milhões de euros.

Este tipo de investimento já foi feito em Itália, um país pioneiro na implementação da *smart grid*, e constitui um bom exemplo do efeito que esta pode ter no combate à fraude. A Enel SpA, maior empresa do setor elétrico em Itália, entre 2000 e 2005, instalou mais de 27 milhões de *smart meters*, reportando poupanças anuais na ordem dos 750 milhões de euros, atribuídos em parte à redução da fraude por via desta tecnologia (DNV KEMA, 2009). Dados de Março de 2015 reportam que já foram instalados 32 milhões de *smart meters* em Itália pela Enel SpA (ENEA, 2015). Outros países europeus pretendem seguir o modelo italiano com a instalação em grande escala de *smart meters*: França pretende instalar 35 milhões até 2020, Espanha 13 milhões até 2018 e o Reino Unido 30 milhões até 2020. Estima-se que na Europa serão instalados 110 milhões de aparelhos até 2017 no valor de 15,8 biliões de euros. Esta iniciativa dos países europeus vai também no sentido de cumprir a diretiva da Comissão Europeia, referida na seção 2.3. desta dissertação.¹¹

São agora analisados dois artigos do mesmo grupo de autores que também analisam a problemática do roubo de eletricidade e qual o papel que a *smart grid* pode ter na sua diminuição.

A análise é feita com recurso a modelos de teoria dos jogos, que servem de base ao modelo que será subsequentemente desenvolvido nesta dissertação (Amin *et al.*, 2012; Amin *et al.*, 2015).

No primeiro artigo, de Amin *et al.* (2012), é introduzido um modelo que se foca na possibilidade de deteção de anomalias com alta precisão que é possível de realizar devido às informações constantes enviadas por *smart meters*.

Neste artigo é modelizado um jogo para a problemática do roubo de eletricidade. Por um lado o ladrão tem como objetivo roubar uma quantidade predefinida de eletricidade minimizando a probabilidade de ser detetado. Por outro lado a empresa tem

¹¹ Reuters, “Europe to follow Italy’s lead on smart meters”, <http://www.reuters.com/article/2013/05/30/energy-efficiency-smartmeters-italy-idUSL5N0EA3HL20130530>, [acedido em 20.06.2015]).

como objetivo maximizar a probabilidade de detecção e definir o grau de custos em que vai incorrer para gerir o mecanismo de detecção. É assumido que o ladrão consegue corromper o *smart meter* enviando leituras falsas sobre o seu consumo de eletricidade, sendo que cada leitura é resultado de um processo aleatório impulsionado por uma função de densidade probabilidade. Um consumidor honesto vai ter uma função densidade probabilidade diferente de um ladrão. A empresa tem como teste ótimo de detecção o teste *likelihood-ratio*. Do jogo resulta um equilíbrio de Nash em que o ladrão e a empresa escolhem uma função de densidade probabilidade.

No segundo artigo, Amin et al. (2015), desenvolvem um modelo que considera decisões de preço e de investimento por parte da empresa distribuidora face a um conjunto de consumidores que são cumpridores (“genuínos”) ou não (“fraudulentos”). Os consumidores têm utilidade idêntica pelo uso de eletricidade mas com custos diferentes.

Por um lado, os consumidores genuínos pagam aquilo que lhes é faturado e escolhem o seu nível de consumo tendo em conta as suas preferências e o preço. Por outro lado, os consumidores fraudulentos escolhem duas quantidades: a quantidade que vão pagar e a quantidade que vão roubar, sendo que a última depende da probabilidade de detecção e do valor da multa a pagar se forem apanhados.

A probabilidade com que a fraude é detetada depende de dois fatores: quantidade de eletricidade roubada, sendo que quanto mais eletricidade for roubada, maior será a probabilidade de detecção; Investimento feito pelo distribuidor, sendo que quanto maior o nível de investimento maior a probabilidade de detecção. O distribuidor decide o montante a investir em tecnologia para detetar consumidores fraudulentos e o preço por unidade de eletricidade faturada.

O artigo considera dois casos: monopólio sem regulação e concorrência perfeita. Em ambos os casos o jogo em causa é do tipo sequencial. A empresa distribuidora escolhe em primeiro lugar, tendo em conta uma parcela conhecida de consumidores fraudulentos. Os consumidores escolhem em segundo lugar após conhecerem o preço e o nível de investimento da distribuidora em tecnologia de detecção de fraude.

Os custos operacionais do distribuidor vão ter em conta o investimento em tecnologia de detecção de fraude adicionados aos custos tradicionais de fornecimento de eletricidade procurada pela população. As receitas incluem o total de eletricidade faturada mais o valor esperado das multas pagas pelos consumidores fraudulentos que são

detetados. Assim, o lucro do distribuidor vai depender do preço por unidade e do nível de investimento. As funções melhor resposta dos consumidores são derivadas a partir de uma dado preço e nível de investimento do distribuidor.

Resolvido o modelo são obtidos o preço e o nível de investimento de equilíbrio da empresa através das melhores respostas dos consumidores, expressas em quantidade de eletricidade roubada e paga.

4. Regulação Económica

Tal como referido no capítulo 2 as empresas no setor elétrico podem estar sujeitas a regulação, como é o caso português através da ERSE. Nesse sentido este capítulo aborda a teoria económica na área da regulação.

São descritos os dois principais mecanismos que têm vindo a ser adotados pelos reguladores desde que exercem a sua atividade: regulação pela taxa de retorno e regulação por incentivos. É feito um confronto entre os dois mecanismos analisando as vantagens e desvantagens relativas. O objetivo desta seção é conhecer a teoria subjacente às decisões do regulador que poderá ser um dos intervenientes chave no processo de desenvolvimento da *smart grid* e dos *smart meters*.

4.1. Regulação pela taxa de retorno

A regulação pela taxa de retorno exige a análise de todos os custos da empresa e envolve a multiplicação do valor estimado para o custo de capital por uma taxa de retorno de capital permitida de forma a chegar a um requisito de receita. Esta taxa de retorno terá de ser “razoável” no sentido em que, por um lado, não pode ser demasiado alta pois resultaria em preços mais elevados para os consumidores e, por outro lado, não pode ser demasiado baixa uma vez que, nesse caso, proporcionaria um retorno não suficiente para os acionistas se manterem interessados na empresa. O cálculo da taxa de retorno depende de uma estimativa do custo de capital da empresa (Liston, 1993).

Do ponto de vista formal o requisito de receita é calculado da seguinte forma: $Requisito\ de\ receita = B * r + E + d + T$, em que: B representa a base de custos, que é o valor total do capital e ativos que a empresa utiliza na prestação dos serviços regulados; r é a taxa de retorno de capital permitida; E representa os custos operacionais, também representadas pelo acrónimo OPEX (*Operating Expense*); d representa as perdas com depreciação; T representa os impostos não contabilizados no OPEX e que não são cobrados diretamente aos clientes (Jamison, 2007).

4.1.1. O Efeito Averch-Johnson

Averch e Johnson (1962) desenvolveram um modelo que analisa a regulação pela taxa de retorno. Os autores demonstraram que neste quadro regulatório as empresas utilizam fator capital em excesso face a outros *inputs* quando a taxa de retorno definida pelo regulador é superior ao custo de capital da empresa. Neste caso o *output* é produzido de uma forma ineficiente resultando em preços mais altos para os consumidores. As empresas seguem este caminho pois os proveitos permitidos com esta regulação estão diretamente ligados à taxa de retorno do capital. Assim a empresa tende a substituir outros *inputs* por capital.

Viscusi *et al.* (1992) consideram que este efeito pode ter um benefício, o estímulo à inovação, uma vez que a mudança tecnológica em indústrias reguladas pode ocorrer através da substituição de outros *inputs* por capital.

Existem alguns estudos empíricos que comprovam a existência do efeito de Averch-Johnson no setor elétrico. Por exemplo, Spann (1974) elaborou um estudo empírico com o objetivo de provar a existência do “Efeito Averch-Johnson” em empresas sujeitas a regulação pela taxa de retorno. Foram utilizados dois conjuntos de dados de empresas norte-americanas: o primeiro foi composto por observações do primeiro ano de funcionamento de 35 centrais elétricas construídas por empresas reguladas entre 1959 e 1963; o segundo foi composto por 24 grandes empresas elétricas em 1963. A ocorrência do “Efeito Averch-Johnson” foi confirmada.

Frank (2003) fez uma análise empírica sobre o impacto da regulação económica na mudança tecnológica no setor elétrico no Estado do Texas. Este estudo analisa dados desde 1965 até 1985, sendo que no período de 1965 até 1975 a regulação no setor elétrico era muito reduzida e a partir de 1975 começou a ser imposta pelos legisladores uma regulação pela taxa de retorno. Os resultados obtidos por Frank (2003) indicam que no período anterior à implementação da regulação o progresso tecnológico contribui para uma redução anual dos custos de 1,24%. Após a implementação da regulação pela taxa de retorno os custos passaram a ser crescentes, a uma taxa de 0,72% ao ano. Neste sentido o estudo conclui que a regulação pela taxa de retorno teve impactos significativos nos custos das empresas, a taxa de mudança tecnológica variou significativamente antes e após a implementação da regulação e a existência da regulação pela taxa de retorno levou

a uma redução significativa na taxa de mudança tecnológica. Foi encontrada evidência de que a regulação pela taxa de retorno levou a uma aplicação excessiva do fator capital tal como demonstrado pelo estudo de Averch e Johnson.

Mais recentemente, Carrera-Gómez et al. (2005) estudaram o caso da regulação dos portos em Espanha. Estes são todos detidos pelo Estado e sua taxa de retorno é determinada pela *Ente Público Puertos del Estado*. Neste estudo é estimado que entre 1985 e 1997 existiu um sobreinvestimento nos portos espanhóis, o que vai ao encontro do que é enunciado no “Efeito Averch-Johnson”.

4.2. Regulação por incentivos

4.2.1. Price-Cap

A regulação por Price-Cap surge como alternativa à regulação pela taxa de retorno. Este mecanismo foi introduzido pela primeira vez pelo economista Stephen Littlechild em 1983 no relatório “Regulation of British Telecommunications Profitability” e várias versões têm sido aplicadas na regulação no Reino Unido e em outros países desde então.

Este mecanismo é desenhado de tal forma que as empresas possam aumentar os preços ao mesmo ritmo da taxa de inflação, deduzido de um valor relacionado com a taxa de produtividade esperada (também denominada de fator de eficiência ou X). Desta forma o *Price-Cap* incentiva as empresas a serem eficientes uma vez que qualquer ganho de produtividade acima do fator X determinado pelo regulador será um ganho para as empresas. Uma vez superado o fator X, as empresas podem usufruir desse ganho até ao fim do período regulatório em vigência (Viscusi *et al.*, 1992). Esta melhoria na eficiência pode ser alcançada por diversas vias como sejam a inovação tecnológica, a redução de custos, entre outros. Do ponto de vista formal este modelo traduz-se da seguinte forma:

$$P_t \leq P_{t-1} + IPC - X + Z + f$$

Em que: P_t = Preço no ano t; P_{t-1} = Preço do ano anterior a t; IPC = inflação; X = ganho de produtividade esperado (ganhos de eficiência previstos para o período t); Z =

custos exógenos às empresas autorizados pelo regulador a serem incorporados nos preços; f = correções por erros nas previsões dos anos anteriores.

4.2.2. Efeito *ratchet*

Uma regulação por incentivos, como o Price-Cap, pode levantar preocupações ao regulador devido ao fenómeno descrito na literatura como “Efeito Ratchet”. Na fase inicial do período regulatório, as empresas podem sobreavaliar custos, aproveitando-se de informação assimétrica, e adiar investimentos que a levariam a ser mais eficiente no sentido de levar o regulador a exigir metas de eficiência menos exigentes (Laffont e Tirole, 1993).

Bottasso e Conti (2009) desenvolveram um estudo empírico com o objetivo de estudar a presença do “Efeito Ratchet” na redução de custos em empresas reguladas por Price-Cap. O alvo do estudo foram 10 empresas da indústria de águas e esgotos (saneamento básico) de Inglaterra e do País de Gales. O estudo utiliza dados do período de 1995 a 2004, no qual ocorreram dois períodos regulatórios, com revisão de preços em 1994 e 1999. Os resultados foram consistentes com a teoria uma vez que se verificou que a redução de custos foi tendencialmente mais forte no início do período regulatório e foi-se tornando mais fraca à medida que se aproximou a revisão de preços.

4.3. Regulação pela Taxa de Retorno Versus *Price-Cap*

A regulação pela taxa de retorno e o *Price-cap* têm características comuns: ambos aceitam que é necessário garantir um retorno adequado para os acionistas das empresas para que estes continuem a ter incentivos a financiar o negócio, sem que no entanto sejam concedidos preços demasiado altos a serem pagos pelos consumidores (Beesley e Littlechild, 1989). No entanto, o propósito desta seção é identificar as diferenças entre os mecanismos e as características que constituem as vantagens e desvantagens de cada um.

4.3.1. Evidência empírica

Nesta seção são destacados dois estudos empíricos que comparam os efeitos dos mecanismos de regulação nos preços e na produtividade do trabalho.

Mathios e Rogers (1989) elaboraram um trabalho com dados dos E.U.A. em que fazem uma análise econométrica comparando os preços da empresa de telecomunicações AT&T em Estados que têm uma regulação pela taxa de retorno com Estados com regulação por *Price-Cap*. Os autores concluíram que os preços são significativamente mais baixos nos Estados com regulação por *Price-Cap* face aos Estados com regulação pela taxa de retorno.

Estache e Rossi (2005) estudaram o impacto destes regimes regulatórios na produtividade do trabalho de empresas de distribuição elétrica na América Latina. Os seus resultados demonstraram que os regimes regulatórios por incentivos, como o *Price-Cap*, conduzem a uma produtividade do trabalho mais alta do que a regulação pela taxa de retorno.

Verifica-se que em ambos os estudos o *Price-Cap* revela uma superioridade face à regulação pela taxa de retorno, que se reflete em preços mais baixos no primeiro estudo e numa produtividade do trabalho mais alta no segundo estudo.

4.3.2. Vantagens e desvantagens relativas de cada mecanismo

A principal vantagem da regulação pela taxa de retorno deve-se ao facto de permitir ao regulador limitar os preços de monopólio uma vez que pela própria natureza do modelo estão a ser monitorizados os lucros da empresa, como mostrado na secção 4.1. (Liston, 1993).

A ocorrência do Efeito Averch-Johnson, tal como explicado na secção 4.1.1, constitui uma das desvantagens da regulação pela taxa de retorno mais mencionadas na literatura. O *Price-Cap* está menos vulnerável a este efeito (Beesley e Littlechild, 1989).

O facto de a regulação pela taxa de retorno ser do tipo *cost-plus*, ou seja, ser dado um retorno à empresa acima dos seus custos, retira o incentivo a que a empresa produza de forma eficiente através da minimização de custos (Liston, 1993). Como já foi referido

na secção 4.2.1. o *Price-Cap* incentiva as empresas a terem custos eficientes (Viscusi *et al.*, 1992).

O *Price-Cap* permite reduzir os custos administrativos e de *compliance*¹² decorrentes da regulação face à regulação pela taxa de retorno uma vez que enquanto com o *Price-Cap* a empresa tem liberdade para estabelecer preços, dentro de um limite imposto, com pouca necessidade de supervisão do regulador, na regulação pela taxa de retorno, para aumentar os preços a empresa tem de pedir uma audiência com o regulador e obter autorização, o que demora tempo e é dispendioso (Mathios e Rogers, 1989).

A regulação pela taxa de retorno é um mecanismo atrativo quando a qualidade do serviço ou produto está dependente da quantidade do fator capital utilizado. Isto justifica-se tendo em conta o “Efeito Averch-Johnson” na regulação pela taxa de retorno em que as empresas substituem outros *inputs* por factor capital. Todavia, se a qualidade estiver dependente do fator trabalho, verifica-se o oposto, ou seja, a qualidade diminui (Spence, 1975). O *Price-Cap* pode constituir um incentivo a que as empresas reduzam a qualidade uma vez que o controlo de qualidade é dispendioso e, tendo em conta os incentivos à redução de custos que o modelo proporciona, levará a que as empresas naturalmente reduzam a qualidade dos seus serviços (Currier e Jackson, 2008). No entanto, a qualidade do serviço também pode ser regulada através da aplicação de *standards* de qualidade por parte do regulador (Ter-Martirosyan e Kwoka, 2010).

O *Price-Cap* é mais fácil de operar por parte do regulador e da empresa e é um mecanismo mais transparente, que está focado no parâmetro que mais interessa aos consumidores do bem regulado, o preço (Beesley e Littlechild, 1989).

No que se refere ao incentivo do investimento na *smart grid*, os autores Marques *et al.* (2014) demonstram que uma regulação por incentivos, que permite à empresa manter parte dos ganhos resultantes da redução de custos, é mais eficiente na implementação desta tecnologia.

¹² Gasto de tempo e/ou dinheiro de forma a cumprir normas legislativas e/ou regulatórias

Quadro 1 – Quadro resumo

	Mecanismo mais vantajoso
Efeito Averch-Johnson	Price-Cap
Redução de custos	Price-Cap
Custos de regulação	Price-Cap
Qualidade do serviço\produto	Regulação pela taxa de retorno
Promoção do investimento na <i>smart grid</i>	Price-Cap

Fonte: Elaboração própria.

4.3.3. Mecanismos adoptados no setor elétrico europeu

Tendo em conta a discussão da regulação pela taxa de retorno versus *Price-cap* é relevante analisar quais os mecanismos adotados pelos diferentes países no setor elétrico.

Nesse sentido, o quadro seguinte apresenta o tipo de regulação que é aplicada no setor elétrico europeu nas atividades de transporte e distribuição, tendo sido elaborado com base no relatório “Mapping power and utilities regulation in Europe” publicado pela EY a 29 Maio de 2013 e no documento da ERSE “Parâmetros de regulação para o período 2012 a 2014”.

Quadro 2 – Tipo de regulação por país

Países	Tipo de regulação
Bélgica e Suíça	Regulação pela taxa de retorno
Alemanha, Eslováquia. França, Holanda, República Checa, Roménia, Suécia e Turquia.	Regulação por incentivos
Espanha, Finlândia, Grécia, Itália, Polónia, Portugal e Reino Unido.	Combinação de mecanismos

Fonte: EY (2013)

Da informação presente no quadro é de realçar que apenas dois países utilizam somente a regulação pela taxa de retorno face a uma maioria dos países que utilizam a

regulação por incentivos. Ainda assim a regulação pela taxa de retorno não deixou de ser relevante uma vez que muitos países ainda utilizam este mecanismo em combinação com uma regulação por incentivos.

4.4. Medidas regulatórias de incentivo ao investimento na *Smart Grid*

Nesta secção serão abordados exemplos de medidas regulatórias já aplicadas e que foram desenhadas especificamente pelos reguladores de forma a incentivem as empresas a investir na *smart grid*, sendo dado um especial enfoque ao caso português.

Antes de abordar o caso português podem ser dados exemplos do Reino Unido e de Itália: no primeiro o regulador OFGEM (*Office of Gas and Electricity Markets*) permite que 0,5% das receitas anuais sejam gastas em inovação e criou também o “Low Carbon Network Fund”, em 2010, com 500 milhões de libras (ten Heuvelhof e Weijnen, 2013); no segundo o regulador AEEG (*Autorità per l'energia elettrica il gas e il sistema idrico*) garante um retorno extra de 2%, durante 12 anos, em investimentos na rede de distribuição, incluindo projetos de demonstração de *smart grids* escolhidos em concurso (Lo Schiavo *et al.*, 2013).

4.4.1. O caso Português

Em Portugal foi adotado pela ERSE, para o período de regulação 2012-2014, um esquema de incentivos específico para investimentos na *smart grid*, no âmbito dos parâmetros para a atividade de distribuição de energia elétrica da EDP Distribuição (ERSE, 2011).

A ERSE incentiva especificamente o investimento na *smart grid*, diferenciando-o face a outros investimentos em infraestruturas de distribuição de energia elétrica, na medida em que considera que este investimento pode trazer nos próximos anos muitos benefícios para o operador da rede de distribuição e para os consumidores.

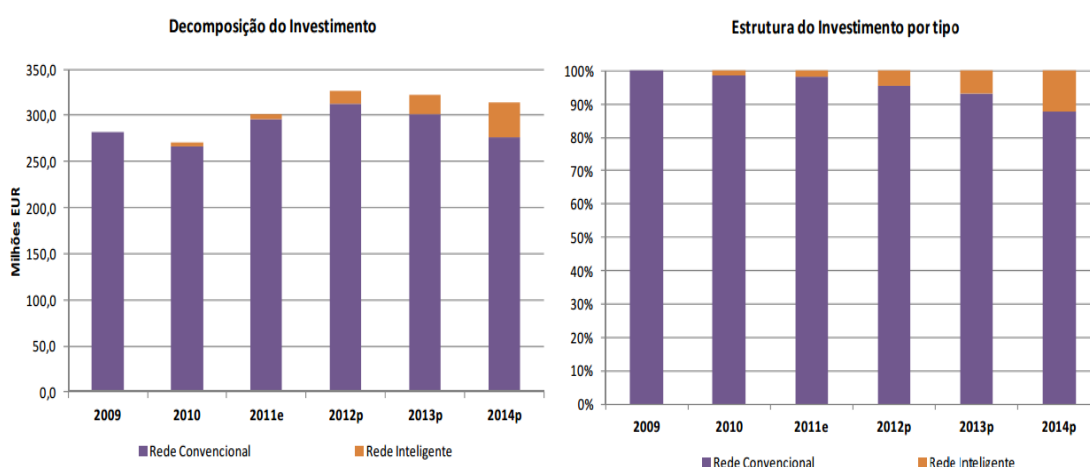
Em concreto, no cálculo dos proveitos permitidos à empresa distribuidora é atribuído um prémio de risco a acrescer à taxa de remuneração dos ativos. O prémio de risco, fixado em 1,5%, tem como propósito compensar a empresa de distribuição pelo

risco tecnológico uma vez que será necessário o abate de equipamentos existentes e respetiva substituição. A ERSE espera que a *smart grid* permita uma maior automatização dos processos, uma melhor afetação de recursos e seja um auxílio à tomada de decisão da empresa para que sejam alcançados ganhos de eficiência. O regulador pretende que estes ganhos de eficiência sejam partilhados com os consumidores e para o efeito introduziu um fator X adicional no cálculo dos custos de exploração aceites. O fator X é nulo em 2012 e é de 0,1% em 2013 e 2014, ou seja, aumenta à medida que vão sendo feitos os investimentos na *smart grid*.

Na figura seguinte pode ver-se que a ERSE espera que este esquema de incentivos leve a aumento do investimento em redes inovadoras em 2012, 2013 e 2014.

Figura 12 – Evolução dos investimento na *smart grid*

Figura 4-22 - Evolução dos investimentos em redes inteligentes



Fonte: EDP

Fonte: ERSE (2014)

No documento para o novo período de regulação, 2015-2017, já são apresentados os resultados destas medidas. A ERSE verificou que os investimentos na *smart grid* não atingiram os níveis que tinham sido previstos pela empresa distribuidora (EDP Distribuição) e que tinham servido de base para calibrar o incentivo (ERSE, 2014).

Devido a esta diferença entre o investimento que tinha sido previsto e o efetivamente realizado e aceite pelo regulador, os ganhos que vão ser obtidos pela empresa devido à taxa de remuneração mais alta para investimentos na *smart grid* vão ser inferiores à redução dos proveitos permitidos que resultam das subidas das metas de eficiência com a implementação da *smart grid* que foram definidas *ex-ante* (o fator X referido anteriormente), com base nas previsões da empresa (ERSE, 2015).

5. Combate à fraude como incentivo ao investimento em *smart meters*

Nesta seção é desenvolvido um modelo económico em que se pretende apurar se o combate à fraude pode ser um incentivo a que uma empresa monopolista distribuidora de eletricidade invista na instalação de *smart meters*. Pretende-se verificar em que medida o investimento em *smart meters*, ao permitir o aumento da probabilidade de deteção de fraude por parte dos consumidores de eletricidade, é compensador para a empresa, isto é, em que circunstâncias os seus lucros com investimento são superiores aos lucros sem realizar o investimento.

O modelo é desenvolvido assumindo que a empresa monopolista atua num mercado livre, isto é sem imposição de qualquer medida de regulação do preço final. Deste modo assume-se que a empresa fixa o preço que maximiza o seu lucro. Atendendo a que na grande maioria dos mercados de distribuição de eletricidade existe regulação do preço seria relevante estender a análise para um cenário com regulação. Por esta razão, na última seção deste capítulo são apresentadas algumas linhas orientadoras desta extensão do modelo, que poderá ser desenvolvida em trabalhos futuros.

5.1. O mercado de distribuição de eletricidade

Nesta secção procede-se à apresentação dos principais pressupostos do modelo quanto à organização do mercado de eletricidade (consumo final). Primeiramente, procede-se à caracterização da procura, seguindo-se a apresentação dos principais pressupostos do modelo quanto às características da empresa monopolista distribuidora da eletricidade.

Caracterização da procura de eletricidade

Tal como em Amin et al. (2015), assume-se que os consumidores da empresa de distribuição dividem-se em dois tipos: genuínos e fraudulentos. Os consumidores genuínos pagam na totalidade a eletricidade que consomem (q_g). Os consumidores fraudulentos dividem o seu consumo total (q_f) em duas parcelas: uma quantidade que é

roubada (q_f^R) e uma quantidade que é faturada pela empresa (q_f^F). Este comportamento traduz-se nas três funções procura de eletricidade seguintes:

$$\text{Função procura dos consumidores genuínos: } q_g = 1 - P \quad (1)$$

$$\text{Funções procura dos consumidores fraudulentos: } q_f^R = \alpha + P - \delta \quad (2)$$

$$q_f^F = (1 - \alpha) - \beta P + \delta \quad (3)$$

em que P representa o preço da eletricidade para os consumidores finais.

Adicionando as expressões (2) e (3) obtém-se a procura total dos consumidores fraudulentos representada pela expressão $q_f = 1 + (1 - \beta)P$. Adicionando as três funções procura obtém-se a procura total de eletricidade dada pela expressão $Q_T = 2 - \beta P$.

O parâmetro β representa a inclinação da função procura total. Assume-se que β tem um valor positivo. Tal implica que um aumento do preço da eletricidade resulta numa redução da quantidade total procurada de eletricidade. Assume-se ainda que β é maior que 1 traduzindo o facto de a procura total dos consumidores fraudulentos, $q_f = 1 + (1 - \beta)P$, também diminuir com o aumento do preço. Note-se que se não fosse assumido este último pressuposto, ou seja, se $\beta < 1$ significaria que a procura total dos consumidores fraudulentos aumentaria com o aumento do preço.

Comparando as funções (2) e (3), verificamos que o parâmetro α representa a repartição da quantidade total procurada pelos consumidores fraudulentos entre quantidade roubada e quantidade faturada., assumindo um valor compreendido entre 0 e 1. Note-se que a procura total de eletricidade não é influenciada pelo parâmetro α , dado que se assume que a procura de eletricidade não depende da possibilidade de roubo. Ou seja, assume-se que a possibilidade de os consumidores roubarem eletricidade não influencia a procura, uma vez que qualquer consumidor não utilizará mais eletricidade do que aquela que necessita tendo em conta a própria natureza do bem em causa.

Nas funções procura dos consumidores fraudulentos o parâmetro δ representa a multa por unidade de eletricidade cobrada pela empresa aos consumidores incumpridores. Assume-se que este parâmetro tem um valor positivo suficientemente elevado face ao

preço de eletricidade (tomando igualmente em conta o valor temporal do dinheiro) de forma a que em caso de detecção (e pagamento da respetiva multa) os consumidores fraudulentos sejam penalizados face aos consumidores que adquiriram eletricidade no mercado, reduzindo desta forma o incentivo ao roubo de eletricidade. Repare-se que se a multa unitária fosse muito reduzida (por exemplo, inferior ao preço atualizado da eletricidade) os consumidores fraudulentos teriam sempre incentivo em não pagar a eletricidade no momento do consumo, uma vez que, no caso de a fraude ser detetada, haveria um adiamento temporal do pagamento e no caso de a fraude não ser detetada o pagamento não chegaria sequer a acontecer. No contexto do nosso modelo estático, assume-se que o valor do parâmetro δ é mais elevado do que o preço de equilíbrio (P^*). Como se verá mais adiante (Proposição 1), tal assunção implica que o domínio de parâmetros economicamente relevante para esta análise verifica a condição $\delta > \frac{2-\alpha+\delta+\theta\delta+c\beta}{2+2\beta}$, i.e. $\alpha > 2 - \delta - 2\beta\delta + \theta\delta + c\beta$.

Caracterização da empresa monopolista

No modelo assume-se que a empresa monopolista distribuidora de eletricidade tem duas fontes de receitas: as receitas provenientes da cobrança da eletricidade vendida e as receitas provenientes das multas cobradas aos consumidores fraudulentos cuja fraude foi detetada. Assume-se ainda que a empresa suporta custos com a aquisição da eletricidade e com a realização de investimentos na implementação de *smart meters*. Desta forma, a função lucro da empresa é expressa pela seguinte função:

$$\pi(P, I) = P(q_g + q_f^F) + \theta(\delta q_f^R) - C(Q_T) - I$$

À luz da função anterior é possível verificar que as receitas da empresa dependem do preço final da eletricidade, dado por P , das quantidades faturadas aos consumidores genuínos e fraudulentos, $(q_g + q_f^F)$ e do montante relativo à recuperação das receitas com fornecimento de eletricidade roubada. Este montante é representado por $\theta(\delta q_f^R)$ em que o parâmetro θ representa a probabilidade de deteção de fraude pela empresa.

Relativamente à deteção da fraude serão analisados dois casos. O primeiro caso corresponde à situação em que a empresa, por realizar um investimento em *smart meters* no montante k ($I = k$), consegue detetar todas as situações de fraude. Neste caso, θ tem o valor de 1 ($\theta_A = 1$). No segundo caso, a empresa não realiza qualquer investimento ($I = 0$), e a probabilidade de deteção da fraude, embora positiva, é inferior a 1 (isto é, $0 \leq \theta_B < 1$). A empresa suporta ainda: (i) custos com a aquisição de eletricidade que se assumem lineares e são representados por $C(Q_T) = cQ_T$, sendo que $Q_T = q_g + q_f^R + q_f^F$ e $0 < c < 1$, e (ii) custos com o investimento em *smart meters*, representado por I que, no modelo proposto, apenas pode assumir dois valores: k ou zero. Ou seja, por razões de simplicidade na análise do modelo, o investimento é representado por uma variável discreta de escolha binária.

Consequentemente, a empresa distribuidora de eletricidade tem de tomar duas decisões: i) decidir se realiza ou não o investimento I em *smart meters* destinado a aumentar a probabilidade de deteção da fraude e ii) decidir o valor do preço final P a cobrar aos consumidores. Na resolução do modelo será caracterizado o preço que maximiza o lucro sob cada uma das decisões possíveis relativas ao investimento (investe ou não investe). Posteriormente os valores dos lucros das duas situações são comparados para se concluir sobre os fatores que influenciam a decisão de investimento.

5.2. Mercado sem regulação

Nesta seção serão analisadas as decisões da empresa quanto ao preço final e o investimento num contexto de mercado livre, isto é, considerando que a empresa decide de forma a maximizar o lucro sem qualquer restrição regulatória.

Substituindo as funções procura (1), (2) e (3) na função lucro obtém-se a seguinte expressão que depende do preço final, do investimento e dos parâmetros do modelo:

4.

$$\pi_m(P, I) = 2P - P^2 - \alpha P - \beta P^2 + \delta P + \theta(\delta\alpha + \delta P - \delta^2) - c(2 - \beta P) - I$$

Da condição de primeira ordem do problema de maximização do lucro em ordem ao preço obtém-se o valor do preço ótimo (para uma dada probabilidade de detecção θ , que é dado por $P^* = \frac{2-\alpha+\delta+\theta\delta+c\beta}{2+2\beta}$).

Proposição 1: Não havendo regulação, o preço que maximiza o lucro da empresa monopolista é dado por: $P^* = \frac{2-\alpha+\delta+\theta\delta+c\beta}{2+2\beta}$.

Prova da Proposição 1: A condição de primeira ordem é dada por $\frac{\partial \pi_m}{\partial P} = 0 \Leftrightarrow 2 - 2P - \alpha - 2\beta P + \delta + \theta\delta + c\beta = 0 \Leftrightarrow P = \frac{2-\alpha+\delta+\theta\delta+c\beta}{2+2\beta}$.

A condição de segunda ordem do problema de maximização de lucro verifica-se uma vez que: $\frac{\partial^2 \pi_m}{\partial P^2} = -2 - 2\beta < 0$. ■

A Proposição 1 mostra claramente que o preço de equilíbrio (P^*) depende dos parâmetros do modelo. É, por isso, importante caracterizar os efeitos de cada um dos cinco parâmetros sobre o preço de equilíbrio, o que será realizado através de um exercício de estática comparada com base no cálculo das derivadas parciais.

Estática comparada

Irá em seguida analisar-se em que medida o preço da eletricidade é afetado pela repartição da quantidade total procurada pelos consumidores fraudulentos entre quantidade roubada e quantidade faturada (efeito de α)

A derivada parcial em ordem a α tem a seguinte expressão:

$$\frac{\partial P^*}{\partial \alpha} = -\frac{1}{2+2\beta}$$

Donde se conclui que quando α aumenta uma unidade o P^* diminui $\frac{1}{2+2\beta}$, *ceteris paribus*. Atendendo às características das funções procura dos consumidores fraudulentos verifica-se que um aumento de α provoca uma diminuição da quantidade faturada aos clientes fraudulentos (q_f^F) o que consequentemente se traduz numa diminuição da procura

total que é faturada ($q_f^F + q_g$). Nesse sentido a uma deslocação da curva da procura de eletricidade faturada para a esquerda corresponde a uma diminuição do preço.

Procede-se agora à análise do efeito de δ (multa unitária). A derivada parcial em ordem a δ assume a seguinte expressão:

$$\frac{\partial P^*}{\partial \delta} = \frac{\theta + 1}{2 + 2\beta}$$

Logo, verifica-se que quando δ aumenta uma unidade o P^* aumenta $\frac{\theta+1}{2+2\beta}$, *ceteris paribus*. Dadas as funções procura dos consumidores fraudulentos sabe-se que um aumento da multa unitária resulta num aumento da quantidade faturada aos clientes fraudulentos (q_f^F) o que consequentemente se traduz num aumento da procura total faturada ($q_f^F + q_g$). Assim, em consequência deste aumento da procura (representado por uma deslocação da curva da procura faturada para a direita) haverá um aumento do preço de equilíbrio. Em termos formais, o aumento de δ materializa-se no aumento do preço de um bem substituto da eletricidade paga.

Considera-se agora o efeito de β (declive da função procura total) sobre o preço de equilíbrio. A derivada parcial em ordem a β assume a seguinte expressão:

$$\frac{\partial P^*}{\partial \beta} = -\frac{1}{2(\beta + 1)^2}(\delta - \alpha - c + \theta\delta + 2)$$

Conclui-se que quando β aumenta uma unidade o preço de equilíbrio diminui $\frac{1}{2(\beta+1)^2}(\delta - \alpha - c + \theta\delta + 2)$, *ceteris paribus*. Repare-se que, dadas as restrições impostas aos valores dos parâmetros em causa, se verifica sempre a condição $\delta - \alpha - c + \theta\delta + 2 > 0$, visto que $\theta\delta + \delta + 2 > 2$ e $\alpha + c < 2$. Conclui-se assim que um aumento do declive da função procura total se traduz numa redução do preço de equilíbrio.

Quanto ao efeito da probabilidade de detecção de fraude no preço de equilíbrio (efeito de θ), temos que a derivada parcial em ordem a θ assume a seguinte expressão:

$$\frac{\partial P^*}{\partial \theta} = \frac{\delta}{2 + 2\beta}$$

Logo, verifica-se que quando θ aumenta uma unidade o preço de equilíbrio aumenta $\frac{\delta}{2+2\beta}$, *ceteris paribus*. Donde, o aumento na probabilidade de deteção de fraude se traduz num acréscimo do preço de equilíbrio (na medida em que um aumento da deteção de fraude leva consumidores fraudulentos a reduzir a magnitude de eletricidade roubada, resultando numa deslocação da procura de eletricidade, no mercado legal, para a direita e, concomitantemente, levando a um aumento do preço de equilíbrio).

Por fim, procede-se a um análise do efeito de c (custo unitário de aquisição da eletricidade pelo distribuidor). Neste caso, a derivada parcial em ordem a c assume a seguinte expressão:

$$\frac{\partial P^*}{\partial c} = \frac{\beta}{2 + 2\beta}$$

Logo, verifica-se que quando c aumenta uma unidade o P^* aumenta $\frac{\beta}{2+2\beta}$, *ceteris paribus*. Este resultado traduz o fato de a empresa refletir o aumento do custo unitário no preço de equilíbrio para o consumidor final (“*pass through*”).

4.1.1. Preços de equilíbrio

Como foi referido anteriormente consideramos que o investimento, I , pode assumir dois valores: $I = k > 0$ ou $I = 0$. Se $I = k$ a probabilidade de deteção de fraude é dada por $\theta = \theta_A = 1$. Se $I = 0$ a probabilidade de deteção de fraude é $\theta = \theta_B$ com $0 \leq \theta_B < 1$. Substituindo o valor de θ para cada situação possível são obtidos dois preços de equilíbrio, um para cada um dos cenários analisados:

Se $I = k \Rightarrow \theta = \theta_A = 1$ temos

$$P^* = P^k = \frac{2-\alpha+2\delta+c\beta}{2+2\beta}$$

Se $I = 0 \Rightarrow \theta = \theta_B$ com $0 \leq \theta_B < 1$ temos

$$P^* = P^0 = \frac{2-\alpha+\delta+\theta_B\delta+c\beta}{2+2\beta}$$

Tendo em conta que θ_A é maior do que θ_B para quaisquer valores admissíveis, o preço de equilíbrio com investimento, P^k , será sempre superior ao preço de equilíbrio sem investimento, P^0 , *ceteris paribus*. Esta relação justifica-se uma vez que a empresa para aumentar a probabilidade de deteção da fraude de θ_B para θ_A tem de realizar um investimento k que se reflete no aumento do preço de equilíbrio.

4.1.2. Efeito do investimento sobre os lucros da empresa

Para se perceber em que condições o investimento em *smart meters* é vantajoso para a empresa, no contexto de um mercado desregulado, é necessário comparar o lucro com a realização do investimento com o lucro sem investimento, por forma a analisar de forma mais rigorosa o *trade-off* enfrentado pela empresa. Por um lado, o investimento em *smart meters* é um custo adicional para empresa. Porém, por outro lado, dado que o investimento aumenta a probabilidade de deteção das fraudes, permite aumentar as receitas através da recuperação dos valores não cobrados aos clientes fraudulentos. Resta saber qual dos dois efeitos, sobre os custos e sobre receitas, é dominante.

Com investimento:

Substituindo o preço de equilíbrio por P^k e o investimento por k na função lucro obtém-se a seguinte expressão do lucro de equilíbrio com investimento k :

$$\pi^K = \frac{1-8c-4\alpha+8\delta+c^2\beta^2-4c\beta+\alpha^2-4\beta\delta^2-2c\alpha\beta+4c\beta\delta+4\alpha\beta\delta+4}{\beta+1} - k$$

Sem investimento:

Da mesma forma, substituindo o preço de equilíbrio por P^0 e o investimento por 0 na função lucro obtém-se a seguinte expressão do lucro de equilíbrio sem investimento:

$$\begin{aligned}\pi^0 &= \frac{1}{4} \frac{\delta^2}{\beta + 1} \theta_B^2 + \frac{1}{2} \delta \frac{\alpha - \delta + c\beta + 2\alpha\beta - 2\beta\delta + 2}{\beta + 1} \theta_B \\ &+ \frac{1}{4} \frac{-8c - 4\alpha + 4\delta + c^2\beta^2 - 4c\beta + \alpha^2 + \delta^2 - 2\alpha\delta - 2c\alpha\beta + 2c\beta\delta + 4}{\beta + 1}\end{aligned}$$

Comparando as duas expressões do lucro conclui-se que o lucro com investimento é superior ao lucro sem investimento desde que o investimento k seja inferior a um valor crítico de investimento representado por k^* :

Proposição 2: Não havendo regulação, o lucro com investimento é superior ao lucro sem investimento ($\pi^K \geq \pi^0$) se $k < k^* = \frac{1}{4} \delta (1 - \theta_B) \frac{2\alpha - \delta + 2c\beta + \theta_B \delta + 4\alpha\beta - 4\beta\delta + 4}{\beta + 1}$.

Prova da Proposição 2: A condição relativa ao parâmetro k resulta da comparação direta das funções π^K e π^0 , anteriormente apresentadas. ■

Uma vez que, por hipótese, $k > 0$ é necessário averiguar se: $\frac{1}{4} \delta (1 - \theta_B) \frac{2\alpha - \delta + 2c\beta + \theta_B \delta + 4\alpha\beta - 4\beta\delta + 4}{\beta + 1} > 0$, para que a condição $k < k^*$ tenha alguma relevância económica (no sentido em que o investimento em *smart meters* é economicamente viável). Tal implica que:

$$c < \frac{-(2\alpha - \delta + \theta_B \delta + 4\alpha\beta - 4\beta\delta + 4)}{2\beta}$$

Conclui-se que, para o investimento ser atrativo em termos de rentabilidade para a empresa, é necessário que o custo do investimento não assuma valores excessivamente elevados. Se a condição anterior não se verificar, o investimento em *smart meters* não será viável no contexto de um mercado desregulado. Nesse caso, o investimento neste tipo de aparelhos requer necessariamente uma intervenção do regulador de modo a tornar

o investimento viável (por exemplo, através de medidas de regulação pela taxa de retorno).

4.1.3. Efeitos dos parâmetros no valor do investimento crítico

Nesta seção será analisada a influência de cada um dos parâmetros do modelo (α , δ , θ_B , β e c) sobre o valor do investimento que torna atrativo para a empresa a realização do investimento em *smart meters* (k^*). Para o efeito proceder-se-á ao cálculo das derivadas parciais. A fim de obter uma maior sensibilidade para a análise serão também atribuídos valores aos parâmetros de forma a verificar qual a influência de cada parâmetro na maior ou menor rentabilidade do investimento em *smart meters*. A tabela seguinte apresenta os valores fixados para cada parâmetro em todas as simulações. Posteriormente, será também realizada uma análise do impacto da variação a cada parâmetro mantendo constantes todos os outros valores.

Quadro 3 – Valores dos parâmetros para simulação

α	β	δ	θ_B	c	θ_A
0,5	1	1	0,25	0,5	1

Efeito de α (repartição da quantidade total procurada pelos consumidores fraudulentos entre quantidade roubada e quantidade faturada)

A derivada parcial em ordem a α assume a seguinte expressão:

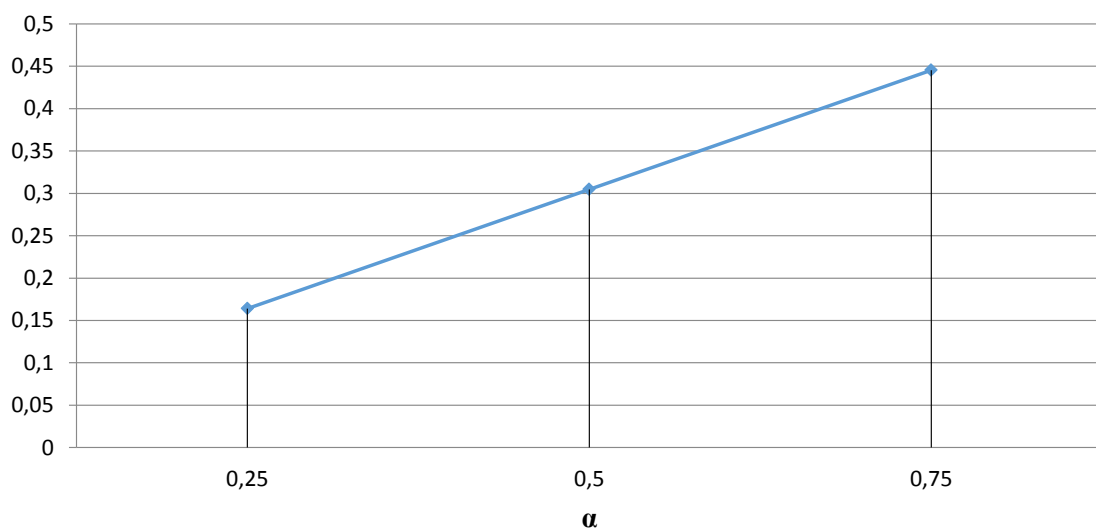
$$\frac{\partial k^*}{\partial \alpha} = -\frac{1}{4}\delta \frac{\theta_B - 1}{\beta + 1} (4\beta + 2)$$

Tendo o θ_B um valor sempre inferior a 1 significa que o numerador ($\theta_B - 1$) é negativo, o que resulta num valor positivo para a derivada. Nesse sentido, k^* aumenta com o aumento de α , *ceteris paribus*. Concluiu-se que o nível de investimento que

compensa a realização do mesmo é crescente com o aumento da proporção de quantidade roubada na quantidade total dos consumidores fraudulentos. Esta conclusão é ilustrada pela figura seguinte que representa os valores de k^* para quatro possíveis valores de α , mantendo-se os restantes parâmetros com os valores indicados na tabela 3.

Figura 13 – Efeito da variação de α sobre k^*

α	<u>0,25</u>	<u>0,5</u>	<u>0,75</u>
k^*	<u>0,16406</u>	<u>0,30469</u>	<u>0,44531</u>



Fonte: elaboração própria.

Esta tendência justifica-se na medida em que um maior número de fraudes reflete-se em menor receita para a empresa, que passa a estar mais dependente da capacidade de deteção de fraude para recuperar a receita perdida. Uma vez que o investimento aumenta a capacidade de deteção para $\theta_A = 1$ é, então, natural que o valor de k aumente para um α crescente.

Ou seja, pode inferir-se que é mais compensador para a empresa o investimento quanto maior for o nível de fraude existente no mercado.

Efeito de δ (multa unitária)

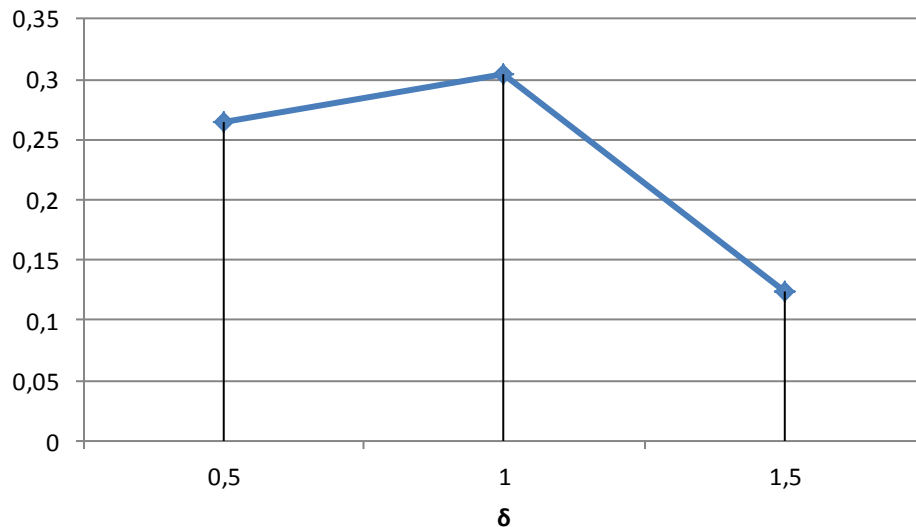
A derivada parcial em ordem a δ assume a seguinte expressão:

$$\frac{\partial k^*}{\partial \delta} = -\frac{1}{2} \frac{\theta_B - 1}{\beta + 1} (\alpha - \delta + c\beta + \theta_B \delta + 2\alpha\beta - 4\beta\delta + 2)$$

A análise da expressão analítica da derivada parcial não permite concluir sobre o sinal do efeito da multa unitária sobre o valor do investimento crítico. Por esta razão a análise será realizada a partir da simulação dos valores de k^* para quatro possíveis valores da multa unitária e todos os restantes parâmetros com os valores indicados no quadro 3. Esta simulação está representada na figura 14.

Figura 14 – Efeito da variação de δ sobre k^*

δ	0,5	1	1,5
k^*	0,2367	0,30469	0,12305



Fonte: elaboração própria

Da informação representada na figura 14 conclui-se que até um determinado valor da multa a relação entre esta e o investimento crítico é positiva, ou seja, à medida que o valor da multa aumenta o incentivo por parte da empresa em investir também aumenta.

No entanto, a partir de determinado valor, a relação inverte-se e um aumento da multa diminui o incentivo ao investimento.

Este comportamento pode ser justificado no sentido em que se o valor da multa for bastante alto tal pode inibir os consumidores fraudulentos de roubarem eletricidade, mesmo tendo em consideração que existe uma determinada probabilidade de deteção que, antes do investimento, não é muito alta. Então, quando a multa é elevada, um aumento da multa resulta numa diminuição dos consumidores fraudulentos e, por isso, o investimento já não é tão rentável o que justifica a tendência descendente do valor de k^* , para valores de δ , que à partida já são elevados. Por outro lado, se a multa for baixa, logo à partida, os consumidores fraudulentos terão incentivo a roubar mais eletricidade (no cenário sem investimento) o que se traduz numa menor receita e maior rentabilidade para o investimento, pois existe um valor superior de receita a recuperar com a realização do investimento.

Efeito de β (declive da função procura total)

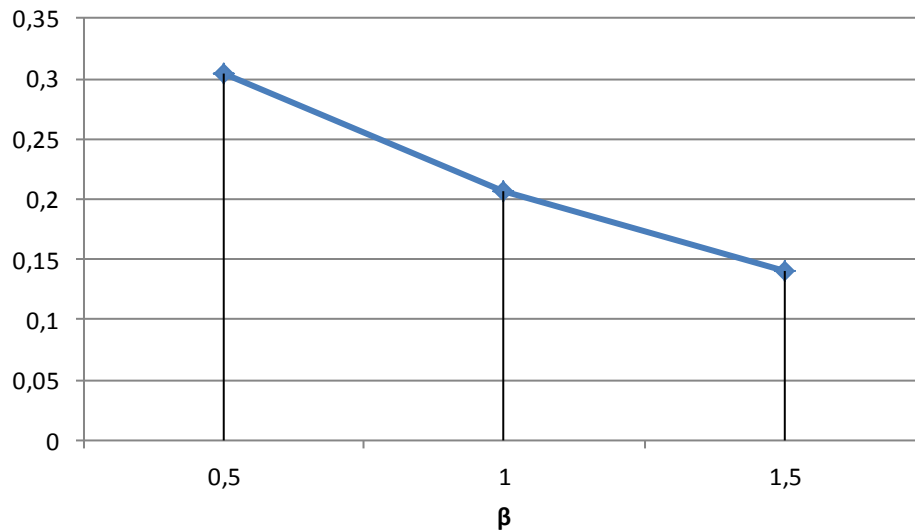
A derivada parcial em ordem a β assume a seguinte expressão:

$$\frac{\partial k^*}{\partial \beta} = \frac{1}{4} \delta \frac{\theta_B - 1}{(\beta + 1)^2} (3\delta - 2\alpha - 2c + \theta_B \delta + 4)$$

Tal como no caso anterior a observação da expressão analítica da derivada não permite concluir sobre o seu sinal. A análise será, por isso, baseada na simulação dos valores de k^* para quatro possíveis valores de β , com tudo o resto constante, representada na figura 15.

Figura 15 – Efeito da variação de β sobre k^*

β	1	1,5	2
k^*	0,30469	0,20625	0,14063



Fonte: elaboração própria

Como foi referido anteriormente na análise das derivadas parciais do preço de equilíbrio (P^*), quando β aumenta o preço de equilíbrio diminui (independentemente da probabilidade de deteção da fraude). A redução do preço de equilíbrio com o aumento de β faz com que o retorno do investimento diminua à medida que o preço de equilíbrio diminui. Fica assim explicada a tendência de diminuição do k^* que se observa nesta simulação.

Efeito de θ_B (probabilidade de deteção da fraude sem investimento)

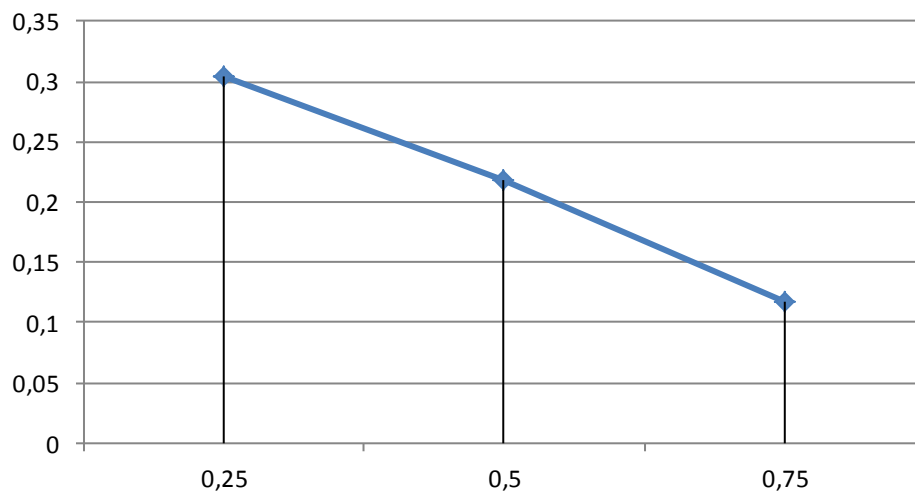
A derivada parcial em ordem a θ_B assume a seguinte expressão:

$$\frac{\partial k^*}{\partial \theta_B} = -\frac{1}{2} \frac{\delta}{\beta + 1} (\alpha - \delta + c\beta + \theta_B \delta + 2\alpha\beta - 2\beta\delta + 2)$$

Mais uma vez a expressão analítica da derivada parcial não permite concluir sobre o seu sinal. Logo, serão analisados alguns valores simulados para o investimento crítico, estando os valores representados na figura 16.

Figura 16 – Efeito da variação de θ_B sobre k^*

θ_B	0,25	0,5	0,75
k^*	0,30469	0,21875	0,11719



Fonte: elaboração própria

Da figura anterior verifica-se que o nível de k para o qual compensa realizar o investimento em *smart meters* é decrescente à medida que aumenta a probabilidade de detecção de fraude sem investimento. Este resultado é lógico pois à medida que θ_B aumenta o ganho obtido em termos de detecção de fraude ao realizar o investimento é menor face ao cenário sem investimento. Ou seja, $\theta_A - \theta_B$ tem tendência decrescente. Nesse sentido os valores para os quais compensa fazer o investimento também vão descendo à medida que θ_B aumenta. No limite, se $\theta_B = 1$, o que está fora do âmbito do modelo em que $0 \leq \theta_B < 1$, o investimento crítico seria igual a zero.

Concluindo, o proveito do investimento em *smart meters* é tanto maior quanto maior for a sua superioridade face aos métodos convencionais de detecção de fraude.

Efeito de c (custo unitário da eletricidade)

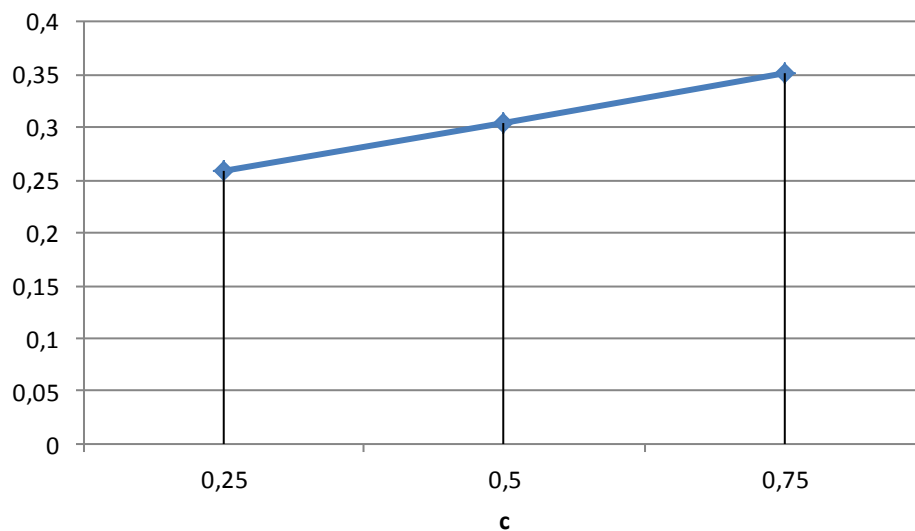
A derivada parcial em ordem a c assume a seguinte expressão:

$$\frac{\partial k^*}{\partial c} = -\frac{1}{2}\beta\delta\frac{\theta_B - 1}{\beta + 1}$$

A derivada tem um valor positivo uma vez que o numerador ($\theta_B - 1$) é negativo. Conclui-se que quando c aumenta uma unidade o k^* aumenta no montante $\frac{1}{2}\beta\delta\frac{1-\theta_B}{\beta+1}$, *ceteris paribus*. Tal como para os casos anteriores é apresentada uma simulação para os valores do investimento crítico que ilustra o resultado anterior.

Figura 17 – Efeito da variação de c sobre k^*

c	0,25	0,5	0,75
k^*	0,25781	0,30469	0,35156



Fonte: elaboração própria

Da informação anterior conclui-se que o nível de investimento crítico aumenta à medida que sobe o custo unitário.

O aumento de c corresponde a uma redução da margem de lucro da empresa, sendo que à medida que esta desce torna-se mais importante para a empresa recuperar receitas com os clientes fraudulentos, o que se verifica nesta simulação com o aumento de k^* a acompanhar o aumento de c .

4.2. Extensão do modelo para o cenário de um mercado com regulação

Considerando um mercado em que há regulação do preço da eletricidade é necessário antes de mais definir a função objetivo do regulador. Uma hipótese possível no âmbito do presente modelo é considerar que o regulador define o preço que a empresa monopolista pode praticar de modo a maximizar o bem-estar social definido pela soma do excedente do produtor com os excedentes dos dois tipos de consumidores presentes no mercado, genuínos e fraudulentos. Preço, sujeito à restrição de o lucro não ser negativo de forma a que a empresa tenha interesse em manter-se em atividade.

A partir desta definição toda a construção do modelo apresentado na seção 5.2 pode ser seguida a fim de avaliar em que medida a realização de um investimento em *smart meters* é atrativa para a empresa distribuidora da eletricidade.

5. Conclusão

Nos próximos anos, e na sequência de diretivas da Comissão Europeia, os investimentos na *smart grid* vão ser avultados para que sejam atingidas as metas definidas. Nesse sentido, o papel dos reguladores vai ser importante para encontrar um equilíbrio entre empresas que vão ter de fazer grandes investimentos e os consumidores que poderão ver refletido na fatura de eletricidade parte do custo do investimento.

Nesta dissertação foi escolhida a redução da fraude no setor elétrico, uma das vantagens da *smart grid* para as empresas, como variável de incentivo ao investimento. No modelo desenvolvido para um mercado sem regulação pode-se concluir que o investimento em *smart meters* como forma de combater a fraude é viável para a empresa distribuidora de eletricidade, tendo em conta as simulações de parâmetros efetuadas e a análise de estática comparada desenvolvida. Note-se que, no modelo apresentado, a decisão de investimento é uma escolha binária. Seria interessante ter um modelo em que a decisão de investimento não fosse binária (investe ou não investe) mas pudesse ser uma decisão sobre o valor a investir. Em investigações futuras poderão ainda ser adicionadas mais variáveis que podem incentivar a empresa a investir na *smart grid*: por exemplo, os ganhos de eficiência energética que são alcançados face a uma rede convencional. Outra linha de investigação futura de grande relevância refere-se ao enquadramento regulatório do investimento nestas tecnologias, nomeadamente importa investigar, do ponto de vista do regulador, que pretende maximizar o bem-estar social, qual pode ser o enquadramento regulatório ótimo não só atendendo à questão da fraude aqui analisada, mas também a outras vantagens dos *smart meters*, como, por exemplo, a maior eficiência energética ou os ganhos ambientais que beneficiam toda a sociedade

Referências bibliográficas

- Amin, S., Cardenas, A. A., Dong, R., Sastry, S. S., e Schwartz, G. (2012). *A Game Theory Model for Electricity Theft Detection and Privacy-Aware Control in AMI Systems*, New York, Ieee.
- Amin, S., Cardenas, A. A., Sastry, S. S., e Schwartz, G. A. (2015). "Game-theoretic models of electricity theft detection in smart utility networks providing new capabilities with advanced metering infrastructure". *Ieee Control Systems Magazine*, 35(1), 66-81.
- Averch, H., e Johnson, L. L. (1962). "Behaviour of the firm under regulatory constraint". *American Economic Review*, 52(5), 1052-1069.
- Beesley, M. E., e Littlechild, S. C. (1989). "The regulation of privatized monopolies in the United Kingdom". *Rand Journal of Economics*, 20(3), 454-472.
- Blumsack, S., e Fernandez, A. (2012). "Ready or not, here comes the smart grid!". *Energy*, 37(1), 61-68.
- Bottasso, A., e Conti, M. (2009). "Price cap regulation and the ratchet effect: a generalized index approach". *Journal of Productivity Analysis*, 32(3), 191-201.
- Brytting, T., Minogue, R., e Morino, V. (2011). *The Anatomy of Fraud and Corruption*, Surrey, Gower.
- Cabral, J. E., Pinto, J. O. P., Linares, K. S. C., e Pinto, A. (2006). *Methodology for fraud detection using Rough Sets*, New York, Ieee.
- Cabral, J. E., Pinto, J. O. P., e Pinto, A. (2009). *Fraud Detection System for High and Low Voltage Electricity Consumers Based on Data Mining*, New York, Ieee.
- Carrera-Gómez, G., Baños-Pino, J., Coto-Millán, P., e López de Sabando, V. I. (2005). "Rate of return regulation: The case of Spanish ports". *International Advances in Economic Research*, 11(2), 191-200.
- Clastres, C. (2011). "Smart grids: Another step towards competition, energy security and climate change objectives". *Energy Policy*, 39(9), 5399-5408.
- Comissão Europeia, "DIRETIVA 2012/27/UE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 25 de outubro de 2012 relativa à eficiência energética, que altera

- as Diretivas 2009/125/CE e 2010/30/UE e revoga as Diretivas 2004/8/CE e 2006/32/CE”, 2012.
- Comissão Europeia (2015) “Relatório relativo a Portugal 2015 que inclui um apreciação aprofundada sobre a prevenção e correção dos desequilíbrios macroeconómicos”, http://ec.europa.eu/europe2020/pdf/csr2015/cr2015_portugal_pt.pdf, [acedido em 25.08.2015].
- Currier, K. M., e Jackson, B. K. (2008). "A pedagogical note on the superiority of price-cap regulation to rate-of-return regulation". *Journal of Economic Education*, 39(3), 261-268.
- Depuru, S., Wang, L. F., e Devabhaktuni, V. (2011). "Electricity theft: Overview, issues, prevention and a smart meter based approach to control theft". *Energy Policy*, 39(2), 1007-1015.
- Depuru, S., Wang, L. F., Devabhaktuni, V., e Green, R. C. (2013). "High performance computing for detection of electricity theft". *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 47, 21-30.
- Diário de Notícias, “Furtos de água e luz custam 82 milhões por ano”, http://www.dn.pt/inicio/economia/interior.aspx?content_id=4768900, [acedido em 10.09.2015].
- Dick, A. J. (1995). "Theft of electricity - How UK electricity companies detect and deter". European Convention On Security and Detection.
- Dinheiro Vivo, “EDP terá que mudar contadores para modelo inteligente”, http://www.dinheirovivo.pt/Empresas/Energia/interior.aspx?content_id=4586788, [acedido em 30.05.2015]
- Edison Tech Center (2015), “The History of Electrification”, <http://www.edisontechcenter.org/HistElectPowTrans.html>, [acedido em 18.06.2015].
- Electric Power Research Institute (2011), “Estimating the Costs and Benefits of the Smart Grid”.
- “Energy box”, <http://www.inovcity.com/pt/inovcity/casas-inteligentes/energy-box/> [acedido em 26.05.2015].
- ERSE (2011), “Parâmetros de regulação para o período 2012 a 2014”, <http://www.erse.pt/pt/electricidade/tarifaseprecos/tarifasreguladasdeanosanterior>

- es/tarifas2012/Documents/P%C3%A2metros%20reg%202012-2014.pdf,
[acedido em 08-11- 14].
- ERSE (2014), “Parâmetros de regulação para o período 2015 a 2017”,
<http://www.erse.pt/pt/electricidade/tarifaseprecos/2015/Documents/PaginaPrincipal/Par%C3%A2metros%202015-2017.pdf>, [acedido em 08-01- 15].
- ERSE (2015a)“Comercialização”,
<http://www.erse.pt/pt/electricidade/actividadesdosector/comercializacao/Paginas/default.aspx>, [acedido em 17.06.2015].
- ERSE (2015b), “Contadores inteligentes de eletricidade e de gás natural”,
http://www.erse.pt/pt/consultaspublicas/consultas/Documents/40_1/Contadores_Inteligentes_eletricidade_gas_CPublica_15052012.pdf, [acedido em 17.06.2015].
- ERSE (2015c), “Distribuição”,
<http://www.erse.pt/pt/electricidade/actividadesdosector/distribuicao/Paginas/default.aspx>, [acedido em 17.06.2015].
- ERSE (2015d), “Perdas na rede de distribuição”,
<http://www.erse.pt/pt/electricidade/actividadesdosector/distribuicao/Paginas/RND-Perdas.aspx>, [acedido em 17.06.2015].
- ERSE (2015e), “Produção”,
<http://www.erse.pt/pt/electricidade/actividadesdosector/producao/Paginas/default.aspx>, [acedido em 17.06.2015].
- ERSE (2015f), “PRE – Produção em Regime Especial”,
<http://www.erse.pt/pt/desempenhoambiental/prodregesp/Paginas/default.aspx>,
[acedido em 17.06.2015].
- ERSE (2015g), “Transporte”,
<http://www.erse.pt/pt/electricidade/actividadesdosector/transporte/Paginas/default.aspx>, [acedido em 17.06.2015].
- Estache, A., e Rossi, M. A. (2005). "Do regulation and ownership drive the efficiency of electricity distribution? Evidence from Latin America". *Economics Letters*, 86(2), 253-257.
- Frank, M. W. (2003). "An empirical analysis of electricity regulation on technical change in Texas". *Review of Industrial Organization*, 22(4), 313-331.

- Galp Energia (2015), “O negócio da eletricidade em Portugal”, <http://www.galpenergia.com/PT/agalpenergia/os-nossos-negocios/Gas-Power/Power/Paginas/Negocio-da-electricidade-em-Portugal.aspx> [acedido em 02.03.2015]
- Gonçalves, N., e Pimenta, C. (2014). *As facetas da fraude. Cinco anos de crónica na Visão*, V.N.Famalicão, OBEGEF & Húmus.
- How Stuff Works, “Charging Plug-in Hybrids on a Smart Grid”, <http://auto.howstuffworks.com/car-models/plug-in-hybrids/charging-plug-in-hybrids-on-a-smart-grid.htm> [acedido em 26.05.2015]).
- InovCity, “EDP lança conceito InovCity em Évora”, <http://www.inovcity.com/pt/media-center/> [acedido em 26.05.2015]).
- ITProPortal, “M2M in the home energy market: A major opportunity for high-quality systems”, <http://www.itproportal.com/2014/08/11/m2m-in-the-home-energy-market-a-major-opportunity-for-high-quality-systems/> [acedido em 26.05.2015]).
- Jamaica Observer, “JPS makes effort to reduce electricity theft in Kingston”, http://www.jamaicaobserver.com/news/JPS-makes-effort-to-reduce-electricity-theft-in-Kingston_16562537 [acedido em 26.05.2015]).
- Jamison, M. A. (2007). Regulation: Rate of Return *Encyclopedia of Energy Engineering and Technology - 3 Volume Set (Print Version)* (pp. 1252-1257): CRC Press.
- Janz, “Janz/Contar Vence Prémio Inovação EDPpartners”, <http://www.janzce.pt/index.php?action=view&id=75&module=newsmodule&src=home1§ion=7> [acedido em 26.05.2015]).
- Laffont, J., e Tirole, J. (1993). *A Theory of Incentives in Procurement and Regulation*, Londres, The MIT Press.
- Liston, C. (1993). "Price-Cap versus Rate-of-Return Regulation". *Journal of Regulatory Economics*, 5(1), 25-48.
- Lo Schiavo, L., Delfanti, M., Fumagalli, E., e Olivieri, V. (2013). "Changing the regulation for regulating the change: Innovation-driven regulatory developments for smart grids, smart metering and e-mobility in Italy". *Energy Policy*, 57(0), 506-517.

- Marques, V., Bento, N., e Costa, P. M. (2014). "The "Smart Paradox": Stimulate the deployment of smart grids with effective regulatory instruments". *Energy*, 69, 96-103.
- Martini, Chiara (2015), "Enel Smart Info: consumption data at hand", 24.04.15.
- Mathios, A. D., e Rogers, R. P. (1989). "The impact of alternative forms of state-regulation of AT&T on direct-dial, long-distance telephone rates". *Rand Journal of Economics*, 20(3), 437-453.
- "Redes inteligentes", <http://www.inovcity.com/pt/rede-inteligente/> [acedido em 26.05.2015]
- Reuters, "Europe to follow Italy's lead on smart meters", <http://www.reuters.com/article/2013/05/30/energy-efficiency-smartmeters-italy-idUSL5N0EA3HL20130530>, [acedido em 20.06.2015])
- Smith, T. B. (2004). "Electricity theft: a comparative analysis". *Energy Policy*, 32(18), 2067-2076.
- Spann, R. M. (1974). "Rate of return regulation and efficiency in production: an empirical test of the Averch-Johnson thesis". *Bell Journal of Economics*, 5(1), 38-52.
- Spence, A. M. (1975). "Monopoly, quality, and regulation". *Bell Journal of Economics*, 6(2), 417-429.
- ten Heuvelhof, E., e Weijnen, M. (2013). "Investing in smart grids within the market paradigm: The case of the Netherlands and its relevance for China". *Policy and Society*, 32(2), 163-174.
- Ter-Martirosyan, A., e Kwoka, J. (2010). "Incentive regulation, service quality, and standards in U.S. electricity distribution". *Journal of Regulatory Economics*, 38(3), 258-273.
- Viscusi, W. K., Vernon, J. M., e Harrington, J. E. (1992). *Economics of regulation and antitrust* (3ª Edição), Londres, Massachusetts Institute of Technology.