

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS E ENGENHARIA DO AMBIENTE

**Alterações Climáticas e Qualidade do Ar:
integração das partículas $PM_{2,5}$ e PM_{10} no
modelo TIMES_PT e análise de políticas
comuns de redução**

Bárbara Marta Marreiros de Cintra Maurício

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia do Ambiente, perfil Gestão e Sistemas Ambientais

Orientação: Professora Doutora Maria Júlia Fonseca de Seixas

LISBOA

2009

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à Prof. Doutora Júlia Seixas pela orientação excepcional, pela sua disponibilidade constante e observações sempre pertinentes. Agradeço também ao João Cleto por todo o conhecimento que me transmitiu relativamente ao modelo TIMES e pelos longos serões a resolver problemas técnicos com o modelo. Gostaria de agradecer ainda aos meus colegas de gabinete, à Sofia Simões e Patrícia Fortes por todas as orientações com o modelo e interpretação dos resultados e ao Luís Dias e João Pedro Gouveia pela disponibilidade para ajudar sempre que necessário e a todos por tornarem este período de realização da tese tão agradável.

SUMÁRIO

O estudo das interações entre políticas de alterações climáticas e de qualidade do ar é uma área com um grande interesse de investigação actual. Estes dois temas não são independentes, verificando-se efeitos sinérgicos ou antagónicos devido a fontes comuns de poluentes bem como a outros tipos de interações.

Recentemente foi proposta pela Comissão Europeia a revisão da Directiva Tectos de Emissão Nacionais, na qual são apresentados pela primeira vez limites nacionais de emissão para partículas finas ($PM_{2,5}$). Para Portugal é proposta uma redução de 64% das emissões no período entre 2000 e 2020. Na sequência desta proposta procura-se neste trabalho, com recurso ao modelo TIMES_PT, analisar os co-benefícios das políticas de alterações climáticas implementadas em Portugal nas emissões de partículas bem como os co-benefícios da implementação desta proposta nas emissões de gases com efeito de estufa. Analisa-se também o modo mais custo-eficaz de cumprimento desta proposta em Portugal.

A análise dos resultados obtidos indica que as políticas de alterações climáticas implementadas em Portugal não têm co-benefícios nas emissões de partículas. Espera-se, no entanto, uma redução de 28% nas emissões de partículas entre 2000 e 2020 decorrentes de legislação aplicada nos sectores da indústria e transportes e sem qualquer relação com políticas climáticas. De igual modo, as políticas de redução de emissões de partículas não produzem co-benefícios nas emissões de gases com efeito de estufa, uma vez que a redução é conseguida através da aplicação de tecnologias de fim-de-linha, que controlam apenas as emissões de partículas. A solução custo-eficaz encontrada pelo modelo para o cumprimento da restrição em 2020 considera a introdução de tecnologias de controlo nos sectores da produção de electricidade, refinação e indústria, removendo a quase totalidade de emissões nestes sectores e ainda no sector residencial, removendo aproximadamente metade das emissões relativamente ao cenário sem restrição. A análise dos custos marginais de redução de emissões de $PM_{2,5}$ indica ainda que seria mais razoável considerar um limite máximo de 50% de redução para Portugal. Até este valor de redução, os custos não aumentam consideravelmente por unidade adicional removida, conseguindo-se custos marginais inferiores a 2500€ por tonelada reduzida.

ABSTRACT

The linkage between climate change and air quality policies is an area which deserves a great focus nowadays. These issues are not independent, there are synergies and trade-offs due to common sources of pollutants and other kinds of interactions.

Recently, the European Commission has proposed a revision of the National Emission Ceilings Directive, including for the first time targets for fine particulate matter ($PM_{2.5}$). For Portugal it is proposed a 64% reduction of $PM_{2.5}$ emissions in the period 2000-2020. This work relies in the sequence of this proposal and aims to analyse the co-benefits between climate change and air quality policies in Portugal, namely the new restriction for particulate matter, using TIMES_PT model. The cost-efficient solution provided by the model that complies with the restriction for Portugal is also subject of analysis.

The results indicate that climate change policies implemented in Portugal don't have co-benefits on particulate matter emissions. However, a reduction of 28% on particulate matter emissions is expected in the period between 2000 and 2020, although it is not related to climate policies. Likewise, the new proposal for the reduction of particulate matter does not produce co-benefits on greenhouse gases emissions since the reduction is accomplished by the introduction of end-of-pipe technologies which control exclusively particulate matter emissions. The cost-efficient solution provided by the model considers the introduction of control technologies in the electricity generation sector, energy supply and industry, removing most of the particulate matter emissions in these sectors, and also in the residential sector, removing nearly half of the particulate matter emissions. The analysis of the marginal cost curve indicates that a maximum reduction of 50% should be considered. Until this level of reduction the marginal costs don't raise significantly for each additional unit of $PM_{2.5}$ removed and remain inferior to 2500€ per ton reduced.

LISTA DE ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

| | |
|-------------------------|--|
| AIE | Agência Internacional de Energia |
| CAFE | Clean Air for Europe |
| CCS | Carbon Capture and Storage |
| CELE | Comércio Europeu de Licenças de Emissão |
| CHP | Combined Heat and Power |
| CLRTAP | Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution |
| DGEG | Direcção Geral de Energia e Geologia |
| DPP | Departamento de Prospectiva e Planeamento e Relações Internacionais do Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e Desenvolvimento Regional |
| ETSAP | Energy Technology Systems Analysis Programme |
| GAINS | Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies |
| GEE | Gases com Efeito de Estufa |
| GIC | Grandes Instalações de Combustão |
| IIASA | International Institute for Applied Systems Analysis |
| IIR | Informative Inventory Report |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change |
| NEEDS | New Energy Externalities Development for Sustainability |
| NEC | National Emission Ceilings |
| PIB | Produto Interno Bruto |
| PM₁₀ | Partículas em suspensão susceptíveis de passar através de um filtro selectivo com 50% de eficiência para um diâmetro aerodinâmico inferior a 10 µm |
| PM_{2,5} | Partículas em suspensão susceptíveis de passar através de um filtro selectivo com 50% de eficiência para um diâmetro aerodinâmico inferior a 2,5 µm |
| PM_{1,0} | Partículas em suspensão susceptíveis de passar através de um filtro selectivo com 50% de eficiência para um diâmetro aerodinâmico inferior a 1 µm |
| PNAC | Programa Nacional para as Alterações Climáticas |
| PNAEE | Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética |
| PNBEPH | Plano Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroeléctrico |
| PNRE | Plano Nacional de Redução das Emissões |
| PST | Partículas Suspensas Totais |

| | |
|---------------|---|
| RAINS | Regional Air Pollution Information and Simulation |
| TIMES | The Integrated MARKAL-EFOM System |
| UE | União Europeia |
| UE-15 | Conjunto dos Estados Membros: Bélgica, Holanda, Luxemburgo, Alemanha, França, Itália, Dinamarca, Irlanda, Reino Unido, Grécia, Espanha, Portugal, Áustria, Finlândia e Suécia |
| UE-27 | Conjunto dos Estados Membros: Bélgica, Holanda, Luxemburgo, Alemanha, França, Itália, Dinamarca, Irlanda, Reino Unido, Grécia, Espanha, Portugal, Áustria, Finlândia e Suécia, Chipre, Eslováquia, Eslovénia, Estónia, Hungria, Letónia, Lituânia, Malta Polónia, República Checa, Bulgária e Roménia |
| UNFCCC | United Nations Framework Convention on Climate Change |
| VAB | Valor Acrescentado Bruto |

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. Alterações Climáticas e Qualidade do Ar: benefícios de políticas comuns | 1 |
| 1.2. Matéria particulada..... | 4 |
| 1.2.1. Características | 4 |
| 1.2.2. Efeitos na saúde humana..... | 6 |
| 1.2.3. Concentrações ambiente actuais na Europa..... | 8 |
| 1.2.4. Evolução das emissões de partículas | 9 |
| 1.2.5. Legislação Europeia e Nacional..... | 10 |
| 1.3. Objectivos e Estrutura da Dissertação | 11 |
| 2. METODOLOGIA | 13 |
| 2.1. O modelo TIMES..... | 13 |
| 2.2. O modelo TIMES_PT | 16 |
| 2.3. Introdução de Partículas PM _{2,5} e PM ₁₀ no modelo TIMES_PT | 19 |
| 2.3.1. Calibração e Validação..... | 19 |
| 2.3.2. Tecnologias de remoção de partículas..... | 21 |
| 2.3.3. Factores de emissão para as novas tecnologias e directiva GIC | 24 |
| 2.4. Cenários analisados..... | 25 |
| 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 27 |
| 3.1. Cenário QUIT: emissões de partículas..... | 27 |
| 3.1.1. Emissões totais e sectoriais de PM _{2,5} | 28 |
| 3.1.2. Emissões totais e sectoriais de PM ₁₀ | 30 |
| 3.1.3. Consumo de energia primária | 30 |
| 3.1.4. Consumo de energia final..... | 32 |
| 3.2. Cenário NEC6: tecto de emissões de partículas proposto pela Comissão Europeia | 34 |
| 3.2.1. Emissões totais e sectoriais de PM _{2,5} | 35 |
| 3.2.2. Emissões totais e sectoriais de PM ₁₀ | 38 |
| 3.2.3. Consumo de energia primária | 39 |
| 3.2.4. Consumo de energia final..... | 39 |
| 3.3. Cenário NEC6: impacto do tecto de partículas nas emissões de GEE | 40 |
| 3.3.1. Emissões totais e sectoriais de GEE..... | 40 |
| 3.3.2. Análise do cumprimento do pacote Energia-Clima..... | 41 |
| 3.4. Análise do custo da restrição proposta na revisão da directiva NEC | 42 |
| 4. CONCLUSÕES..... | 44 |
| REFERÊNCIAS | 47 |
| Anexo I..... | 51 |
| Anexo II..... | 55 |
| Anexo III..... | 57 |
| Anexo IV | 61 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 – Emissões primárias de partículas na EU-27 no período 2000-2006 | 9 |
| Figura 2.1 – Estrutura do modelo TIMES_PT | 16 |
| Figura 2.2 – Calibração para 2000 e validação para 2005 das emissões de PM _{2,5} e PM ₁₀ | 20 |
| Figura 3.1 – Emissões totais e sectoriais de PM _{2,5} nos cenários BAU e QUIT, no período 2000-2020. | 28 |
| Figura 3.2 – Diferença absoluta e percentual de emissões de PM _{2,5} , no cenário QUIT relativamente ao cenário BAU, por sector, em 2020 | 29 |
| Figura 3.3 – Emissões totais e sectoriais de PM ₁₀ nos cenários BAU e QUIT, no período 2000-2020 | 30 |
| Figura 3.4 – Evolução do consumo de energia primária no período 2000-2020, para os cenários BAU e QUIT | 31 |
| Figura 3.5 – Capacidade instalada por tipo de combustível nos cenários BAU e QUIT, em 2020 | 32 |
| Figura 3.6 – Evolução do consumo de energia final por forma de energia no período 2000-2020, para os cenários BAU e QUIT | 33 |
| Figura 3.7 – Evolução do consumo de energia final por sector no período 2000-2020, para os cenários BAU e QUIT | 34 |
| Figura 3.8 – Emissões totais e sectoriais de PM _{2,5} em 2020, nos cenários QUIT e NEC6 | 36 |
| Figura 3.9 – Redução absoluta e percentual de emissões de PM _{2,5} , no cenário NEC6 relativamente ao cenário QUIT, por sector, em 2020..... | 36 |
| Figura 3.10 – Tecnologias de remoção aplicadas em 2020 no cenário NEC6 e contribuição percentual de cada tecnologia para a redução no sector, relativamente ao cenário de referência | 37 |
| Figura 3.11 – Emissões totais e sectoriais de PM ₁₀ em 2020, nos cenários QUIT e NEC6..... | 39 |
| Figura 3.12 – Diferença percentual de emissões de GEE, por sector, nos cenários QUIT e NEC6, no período 2000-2020..... | 41 |
| Figura 3.13 – Curva de custos marginais de redução de PM _{2,5} no sistema energético nacional para diferentes valores de redução percentual face a 2000 | 43 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1 – Potenciais endógenos de energia primária considerados no TIMES_PT | 17 |
| Tabela 2.2 – Tecnologias de remoção de PM _{2,5} e PM ₁₀ inseridas no modelo TIMES_PT | 21 |
| Tabela 3.1 – Distribuição custo-eficaz da redução proposta para PM _{2,5} pelos vários sectores do sistema energético, no cenário NEC6 | 35 |

1. INTRODUÇÃO

1.1. Alterações Climáticas e Qualidade do Ar: benefícios de políticas comuns

A interacção entre políticas de alterações climáticas e de qualidade do ar é uma área em que se verifica actualmente um grande interesse de investigação. Estes dois problemas ambientais não são independentes, existindo uma série de interacções a vários níveis: (i) existência de poluentes atmosféricos que exercem forçamento radiativo; (ii) alteração dos padrões de transporte e dispersão de poluentes atmosféricos e da sensibilidade das populações e ecossistemas à poluição atmosférica devido às alterações climáticas e (iii) as fontes de gases com efeito de estufa (GEE) e poluentes atmosféricos são em grande parte comuns.

Os dois primeiros tipos de interacções são conhecidos mas difíceis de quantificar. As partículas podem exercer um efeito sinérgico ou antagónico com os GEE no efeito de estufa. Dependendo da sua composição química, exercem um determinado forçamento radiativo, contribuindo para o aquecimento (carbono negro) ou para o arrefecimento (sulfatos, nitratos e compostos orgânicos) da superfície terrestre. Este efeito pode ainda ser indirecto, uma vez que as partículas constituem núcleos de condensação para a formação de nuvens, que influenciam a radiação que atinge a superfície terrestre. O Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (IPCC), painel científico internacional constituído para o estudo das alterações climáticas, estima o forçamento radiativo directo exercido pelas partículas em $-0,5 \text{ Wm}^{-2}$ (IPCC, 2007). Um estudo mais recente, que combina dados de satélite e resultados de modelação estima este efeito em $-0,3 \text{ Wm}^{-2}$ (Myhre, 2009). O forçamento radiativo indirecto é estimado em $-0,2 \pm 0,1 \text{ Wm}^{-2}$ (Quaas et al., 2008).

As alterações climáticas, por sua vez, também alteram os efeitos das partículas e de outros poluentes atmosféricos. Na Europa, os períodos de maior frio e vento fraco, em que se verifica uma concentração de partículas na troposfera mais elevada, serão menos frequentes com o aumento da temperatura média anual (Kovats *et al.*, 1999). Nos Estados Unidos, estima-se uma redução de 23% das concentrações de $\text{PM}_{2,5}$ em 2050 devido ao aquecimento global (Tagaris *et al.*, 2009).

A interacção entre os dois tipos de poluentes a nível das fontes e tecnologias de controlo de emissões é a mais importante de analisar. Alterações na actividade de uma fonte comum a poluentes atmosféricos e a GEE devido a legislação aplicada sobre um tipo de emissões afecta simultaneamente as emissões de ambos os tipos. Este efeito pode ser sinérgico ou antagónico. Como exemplo, no sector da produção de energia, medidas que promovem a substituição de

combustíveis de carvão e fuelóleo para gás natural ou o aumento da eficiência energética têm um efeito sinérgico, reduzindo as emissões de vários poluentes simultaneamente (EEA, 2004a). Como exemplo de efeito antagónico, o aumento da utilização da biomassa no sector doméstico que tem ocorrido recentemente em alguns países da União Europeia, contribui para a redução de emissões de CO₂ mas, em contrapartida, aumenta as emissões de partículas assim como de compostos orgânicos voláteis (COVs) e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs) (EEA, 2004a). No sector dos transportes, o aumento relativo da frota de veículos a gásóleo, comparativamente a veículos a gasolina, contribui para uma diminuição das emissões de CO₂ mas simultaneamente para um aumento de emissões de partículas (Amann, 2004).

Estes efeitos sinérgicos e antagónicos têm reflexo nas interacções entre políticas de alterações climáticas e de qualidade do ar. Deste modo, identificam-se trade-offs mas também co-benefícios entre políticas. A redução das emissões de partículas, de acordo com as exigências das directivas da União Europeia, contribui provavelmente para o aquecimento da superfície terrestre, contrariando o efeito das políticas climáticas (EEA, 2004a). No entanto, o efeito directo das partículas e particularmente o indirecto constitui um dos factores de maior incerteza no forçamento radiativo de origem antropogénica (IPCC, 2007), pelo que é incerto o efeito líquido da redução das partículas. Por outro lado, a implementação de políticas climáticas, de modo a atingir os objectivos do Protocolo de Quioto, pode reduzir significativamente os custos de atingir as metas de qualidade do ar. Do mesmo modo, para atingir metas exigentes de qualidade do ar muitas vezes medidas de fim-de-linha não são suficientes, o que requer medidas mais estruturantes, no sistema energético, consistentes com os objectivos climáticos.

O pacote Energia-Clima, proposto pela Comissão Europeia com objectivo de mitigação das alterações climáticas apresenta um conjunto de metas para a União Europeia até 2020, relativamente ao ano base (2000): reduzir as emissões de GEE em pelo menos 20%; aumentar a proporção de energias renováveis no consumo de energia final para 20% e aumentar a eficiência energética em 20%. Os objectivos desta proposta pressupõem uma diminuição da utilização de combustíveis fósseis, que é igualmente uma fonte importante de poluentes atmosféricos. Deste modo, estes esforços de mitigação terão como benefício adicional a redução das emissões de outros poluentes atmosféricos. Foi estimado que o pacote Energia-Clima irá reduzir o custo de cumprimento das metas de qualidade do ar em 10 biliões de euros por ano (EEA, 2006) e os custos de cuidados de saúde relacionados com a poluição atmosférica em 16 a 46 biliões de euros por ano. Relativamente aos poluentes atmosféricos, esperam-se reduções mais significativas para óxidos de azoto (10%), dióxido de enxofre (8-10%) e partículas (8-10%), em 2030. São estimadas também reduções de custos relativos à aplicação de tecnologias de controlo para os mesmos poluentes, respectivamente 35%, 25% e 25%, em 2030.

A identificação e quantificação destas interacções permitem a elaboração de políticas mais custo-eficazes, dirigidas simultaneamente aos dois problemas. A integração em políticas comuns permite identificar sinergias e encontrar soluções para os dois problemas simultaneamente, que são naturalmente mais custo-eficazes do que soluções dirigidas para a resolução de cada problema independentemente. Além disso, políticas que podem não ser consideradas custo-eficazes quando apenas considerado um poluente, podem sê-lo quando considerados ambos os poluentes, permitindo encontrar uma solução óptima do ponto de vista económico e ambiental (EEA, 2004a). A integração permite igualmente identificar e evitar os trade-offs, não considerados na análise custo-eficácia de cada problema independentemente (EEA, 2004a).

Estas interacções devem ser consideradas não só numa análise de custo-eficácia, isto é, na identificação do custo mínimo para atingir a meta ambiental, como também numa análise de custo-benefício, ou seja, na identificação do nível óptimo de redução de emissões tendo em consideração o custo marginal de redução (EEA, 2004a).

Todas as complexas interacções entre poluentes atmosféricos e gases com efeito de estufa não são suficientemente compreendidas de modo a permitir uma análise quantitativa rigorosa dos efeitos de políticas de alterações climáticas sobre a qualidade do ar e vice-versa. No entanto, a nível das fontes de emissões e tecnologias de controlo, existe conhecimento suficiente para se incluir quantitativamente muitas das interacções entre poluentes, através de modelação integrada. Os restantes tipos de interacções, tal como o forçamento radiativo exercido pelas partículas, deverão ainda ser considerados, embora de modo qualitativo (EEA, 2004a).

As grandes directrizes relativas às alterações climáticas e à poluição atmosférica são ainda elaboradas de forma independente. Estas incluem as negociações da Convenção Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas (UNFCCC), que tem por objectivo estabelecer planos de mitigação das alterações climáticas a nível internacional, o programa Clean Air for Europe (CAFE) da União Europeia, responsável pela elaboração das directivas europeias relativas à qualidade do ar e a Convenção sobre a Poluição Atmosférica Transfronteiriça a Longa Distância (CLRTAP) das Nações Unidas, que pretende prevenir a poluição atmosférica transfronteiriça. A elaboração destas directrizes não considera ainda as interacções entre GEE e poluentes atmosféricos.

Embora não sejam enquadradas ainda a nível legislativo, estas oportunidades estão já a ser identificadas a nível técnico. Foram já desenvolvidas ferramentas que permitem fazer modelação integrada, adicionando as emissões de GEE nos modelos de poluição do ar (RAINS) e poluentes atmosféricos nos modelos climáticos (IMAGE) (EEA, 2004a). O modelo RAINS (Regional Air Pollution Information and Simulation), foi desenvolvido pelo IIASA

(International Institute for Applied Systems Analysis) para estudar as interações entre poluentes atmosféricos. Consiste num modelo de optimização da distribuição de emissões de poluentes atmosféricos por países e sectores económicos, de modo a minimizar os custos totais cumprindo restrições às emissões de poluentes atmosféricos (Wagner & Schöpp, 2007). Em 2003, este modelo foi complementado com a integração de emissões de GEE, de modo a possibilitar a análise das suas interações com poluentes atmosféricos. Este é o modelo utilizado como suporte ao programa CAFE, da Comissão Europeia.

A importância de se considerar sinergias entre poluentes é ilustrada na evolução da legislação relativa à qualidade do ar. Os protocolos da CLRTAP consideravam inicialmente cada poluente isoladamente, adoptando-se finalmente uma perspectiva de integração dos vários poluentes atmosféricos no protocolo de Gotemburgo, dirigido simultaneamente ao controlo da acidificação, eutrofização e ozono troposférico (EEA, 2004a). Do mesmo modo, a integração de poluentes atmosféricos e GEE é o próximo passo na elaboração de políticas comuns.

1.2. Matéria particulada

A matéria particulada é um dos poluentes mais preocupantes em termos de saúde humana, associada a morbilidade e mortalidade por doenças cardio-respiratórias e cancro pulmonares. Apesar dos esforços de redução das emissões, continuam a registar-se actualmente concentrações elevadas deste poluente e o incumprimento da legislação em muitas cidades europeias. Estima-se que actualmente a exposição à matéria particulada reduza a esperança média de vida da população europeia em 8 meses (EC, 2005).

1.2.1. Características

A matéria particulada consiste numa suspensão sólida, líquida ou constituída pelas duas fases de partículas na atmosfera. Por esta razão as partículas são também designadas por aerossóis atmosféricos. As partículas podem ser classificadas quanto à sua origem ou fonte, modo de formação na atmosfera, tamanho e composição química.

As partículas são classificadas na legislação quanto ao tamanho, ou diâmetro aerodinâmico, uma vez que esta característica está associada com o local de deposição nas vias respiratórias e consequentes efeitos na saúde (WHO, 2003). Classificam-se em PM_{10} , $PM_{2,5}$ e $PM_{1,0}$, respectivamente partículas de diâmetro aerodinâmico inferior a 10 μm , 2,5 μm ou 1 μm , ou ainda em fracção grosseira, fina ou ultrafina, sendo que a correspondência com o diâmetro

aerodinâmico não é directa. A fracção grosseira é constituída pelas partículas com um diâmetro aerodinâmico superior a 2,5 µm (o que inclui a fracção das PM₁₀ entre 10 µm e 2,5 µm). A fracção fina tem correspondência directa com as PM_{2,5} e a fracção ultrafina é constituída pelo conjunto das partículas com diâmetro aerodinâmico inferior a 0,1 µm (100 nm). O conjunto total das partículas é denominado pelo acrónimo PST, Partículas Suspensas Totais.

A sua origem pode ser natural ou antropogénica. As fontes naturais incluem as poeiras transportadas pelo vento, o *spray* marinho e os compostos orgânicos voláteis biogénicos (resíduos vegetais, pólen, esporos e micro-organismos). As fontes antropogénicas incluem a queima de combustíveis fósseis nas instalações de combustão, a combustão interna nos transportes rodoviários, a combustão de biomassa no sector residencial, a queima de resíduos agrícolas, os processos industriais, e as actividades de construção civil.

As partículas atmosféricas podem ainda ser classificadas como primárias ou secundárias, dependendo do seu mecanismo de formação. As partículas primárias são emitidas directamente para a atmosfera a partir de fontes naturais ou antropogénicas. As secundárias formam-se na atmosfera através de reacções químicas entre os seus gases precursores, dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de azoto (NO_x) e amónia (NH₃), originando sulfatos e nitratos. Estas partículas podem também ser formadas através da oxidação fotoquímica de compostos orgânicos voláteis não metânicos (COVNM), originando aerossóis orgânicos (EU, 2004). As emissões de partículas primárias têm uma contribuição reduzida para o total de concentração ambiente de partículas (13% na Europa em 2006, dados de PM₁₀), sendo que a maioria da matéria particulada é secundária (EEA, 2004b).

O processo de emissão determina o tamanho e a composição química das partículas. A fracção fina provém geralmente de emissões de combustão ou de processos de nucleação e a fracção grosseira de emissões de processo, como as actividades construtivas, ou de fontes naturais. As PM_{2,5} têm geralmente origem em processos de combustão ou processos de formação por nucleação na atmosfera e são constituídas por compostos inorgânicos (sulfatos, nitratos e carbono elementar) e compostos orgânicos semi-voláteis, contendo hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs) quando a combustão é incompleta. As partículas de maiores dimensões têm origem não só nos processos de combustão como também nos processos de erosão, corrosão e abrasão e podem transportar elementos do solo e *spray* marinho. As emissões de processo contêm geralmente uma fracção substancial de partículas com dimensão superior a 10 µm mas a grande quantidade de partículas emitidas permite que a fracção inferior a 10 µm seja elevada.

1.2.2. Efeitos na saúde humana

A matéria particulada e o ozono são os dois poluentes mais preocupantes relativamente a efeitos na saúde humana (EC, 2005). A exposição à concentração ambiente de partículas está associada a um aumento na morbilidade e mortalidade e, conseqüentemente, a uma redução na esperança média de vida da população. As partículas actuam ao nível do sistema respiratório e cardiovascular mas os seus mecanismos de acção biológicos são ainda pouco conhecidos.

Efeitos relacionados com a exposição a curto-prazo, devido a picos de concentração, incluem reacções inflamatórias das vias respiratórias, sintomas respiratórios, efeitos adversos no sistema cardiovascular, aumento de admissões hospitalares e aumento da mortalidade. A exposição a longo prazo a concentrações ambiente de partículas está associada a uma redução na capacidade respiratória, aumento de doenças pulmonares obstrutivas crónicas e redução na esperança média de vida devido a mortalidade cardio-respiratória e provavelmente cancro do pulmão (WHO, 2004a).

Os efeitos na saúde estão relacionados com o tamanho das partículas. Quanto menor o seu tamanho, maior a profundidade a que penetram nas vias respiratórias. As partículas de dimensão superior existentes na fracção PM_{10} , atingem apenas as vias respiratórias superiores enquanto as partículas de dimensão inferior, as $PM_{2,5}$ e $PM_{1,0}$, penetram em maior profundidade atingindo a região alveolar.

Está demonstrada a maior importância da fracção fina nos efeitos na saúde. Um estudo epidemiológico, baseado em dados da American Cancer Society, que estudou um conjunto de indivíduos ao longo de 16 anos, indicou uma correlação entre a exposição à fracção $PM_{2,5}$ e o aumento da mortalidade devida a cancros pulmonares e a doenças cardio-pulmonares (Pope *et al.*, 2002). Várias outras variáveis foram estudadas, como a idade, género, dieta, exposição ocupacional, mas a exposição às $PM_{2,5}$ foi o único factor para o qual se obteve uma correlação significativa. Neste estudo não foi identificada uma correlação estatisticamente significativa entre a exposição à fracção grosseira e a mortalidade. Outros estudos (Dockery *et al.*, 1993, Krewski *et al.*, 2000) demonstram a maior importância da fracção fina na morbilidade e mortalidade.

As PM_{10} estão associadas a respostas respiratórias enquanto que as $PM_{2,5}$ estão associadas a doenças cardiovasculares (Wyzga, 2002). Foi experimentalmente demonstrado que as partículas ultrafinas inaladas têm a capacidade de entrar na corrente sanguínea e provocar aterosclerose, constituindo assim um factor de risco para o processo de trombose (Nemmar *et al.*, 2002).

Foi também demonstrado um efeito independente da fracção grosseira na morbidade, medida em termos de admissões hospitalares, através de vários estudos epidemiológicos que dissociam o efeito da fracção fina e grosseira. A fracção grosseira tem igual ou maior correlação que a fracção fina com doenças pulmonares obstrutivas crónicas, asma e admissões hospitalares por doenças respiratórias (Brunekreef & Forsberg, 2005). Existe uma relação entre a fracção grosseira e o potencial para provocar broncoconstrição, sintoma em doentes asmáticos, uma vez que os brônquios são o local de deposição de partículas com este diâmetro (WHO, 2004b). Estudos toxicológicos mostram ainda um maior potencial da fracção grosseira para induzir resposta inflamatória relativamente à fracção fina e à fracção ultrafina, o que se deve provavelmente à presença de paredes celulares bacterianas, que contêm endotoxinas, na fracção grosseira (Becker *et al.*, 2003).

A exposição a longo-prazo às concentrações ambiente de partículas na atmosfera está associada a uma redução na esperança média de vida, como consequência do aumento da mortalidade devida a doenças cardio-respiratórias e a cancro do pulmão (WHO, 2003). A mortalidade anual na Europa atribuída a este poluente é superior à devida a acidentes rodoviários (EEA, 2009a). Estima-se que a concentração ambiente verificada em 2000 nas cidades europeias foi responsável por cerca de 348 mil mortes prematuras, o que corresponde a uma redução na esperança média de vida na União Europeia de mais de 8 meses (EC, 2005).

Várias características físicas, químicas e biológicas das partículas contribuem para a sua toxicidade. As características associadas à indução de respostas respiratórias e cardiovasculares são o conteúdo em metais de transição, a presença de HAPs, e outros compostos orgânicos, a presença de endotoxinas e, como já foi referido, a dimensão reduzida das partículas (WHO, 2003).

As emissões de partículas associadas à queima de combustíveis fósseis são as que têm maior relação com efeitos adversos na saúde (Laden *et al.*, 2000). Em concordância, estudos toxicológicos demonstram o maior potencial inflamatório das partículas emitidas pelos motores de combustão interna e ainda da combustão de carvão, biomassa e óleo residual (WHO, 2003).

A quantidade e o tamanho das partículas emitidas por processos de combustão dependem do tipo de combustível utilizado. As emissões provenientes de combustíveis sólidos contêm geralmente uma fracção grosseira maior do que as provenientes de combustíveis líquidos e os combustíveis gasosos são constituídos unicamente por partículas finas (EU, 2004). Para além disto, os combustíveis sólidos emitem mais partículas do que os líquidos e estes do que os gasosos.

As emissões de combustão no sector dos transportes, associadas a combustíveis líquidos, são quase unicamente constituídas por partículas finas, sendo a maior parte constituída por partículas de diâmetro inferior a 0,5 µm (EU, 2004). Uma vez que esta fracção está associada a maiores efeitos adversos na saúde, compreende-se o efeito significativo deste sector na morbidade e mortalidade. Existe uma forte correlação entre a proximidade a fontes de tráfego automóvel e efeitos na saúde, por exemplo, estudos epidemiológicos na Holanda, mostram uma maior incidência de doenças respiratórias e cardíacas em populações que habitam próximo de vias rodoviárias (Hoek *et al.*, 2002). Estudos mais recentes indicam que os veículos são uma fonte importante de emissões de PM_{2,5} relacionada com a mortalidade e morbidade (Brunekreef *et al.*, 2009).

1.2.3. Concentrações ambiente actuais na Europa

Na Europa, uma percentagem significativa da população vive em cidades onde os limites de concentração ambiente de partículas, estabelecidos para protecção de saúde humana, são frequentemente excedidos. Entre 1997 a 2006, a percentagem de população urbana europeia exposta a concentrações de PM₁₀ superiores ao limite diário de 50 µg/m³, em mais do que os 35 dias por ano permitidos, oscilou entre 18% e 50% (EEA, 2008a). Os dados parecem indicar uma tendência de diminuição da média diária mais elevada, no entanto, a reduzida quantidade de dados, devida ao curto período temporal de análise e a variabilidade meteorológica natural, não permitem obter uma relação estatisticamente significativa (EEA, 2008a). Várias cidades europeias verificam concentrações superiores ao limite diário em mais de 35 dias por ano (EEA, 2009). Os países em que se registam maiores concentrações urbanas localizam-se maioritariamente no Sul da Europa e incluem a Itália, Espanha, Portugal, República Checa, Hungria, Roménia, Bulgária, Grécia, mas também a Polónia e os países do Benelux (EEA, 2009b).

Em Portugal, verifica-se uma tendência de diminuição das concentrações médias anuais de PM₁₀, tendo sido ultrapassado o limite anual apenas uma vez no período entre 2000 e 2007 (APA 2008a). O mesmo não se verifica para as excedências ao limite diário, à semelhança do que acontece na Europa, que foram ultrapassadas em 9 das 21 zonas monitorizadas, em 2007. As zonas mais críticas incluem a Área Metropolitana de Lisboa, que registou o maior número de excedências ao valor limite diário e que tem vindo a piorar nos últimos anos, e ainda o Porto Litoral, Braga, Portimão/Lagoa, Aveiro/Ílhavo, Vale do Sousa, Vale do Ave e a zona de influência de Estarreja.

Apesar de se registarem valores aproximadamente constantes de concentrações ambiente, as emissões de partículas diminuíram desde 1997. Este facto não é ainda compreendido mas

pode dever-se à poluição transfronteiriça ou ainda ao aumento de temperatura média que afecta a qualidade do ar (EEA, 2009a).

1.2.4. Evolução das emissões de partículas

As emissões primárias de PM₁₀ na Europa (UE-27) diminuíram 10% no período compreendido entre 2000 e 2006 (EEA, 2008b) (Figura 1.1). A mesma redução percentual foi verificada para as PM_{2,5}. Espera-se que esta tendência de decréscimo nas emissões de partículas primárias se mantenha, devido à contínua melhoria das tecnologias de combustão de motores de veículos e dos filtros de partículas, da redução de emissões de combustão de fontes estacionárias por alteração do combustível e ainda devido à maior instalação de tecnologias de controlo nestas fontes (EEA, 2008b).

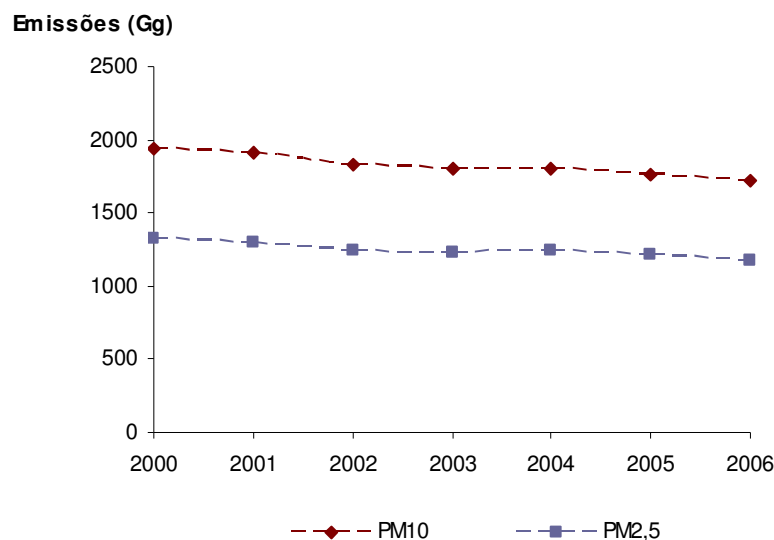


Figura 1.1 – Emissões primárias de partículas na EU-27 no período 2000-2006 (Fonte: EEA, 2008b)

Os sectores que mais contribuem para as emissões de PM₁₀ na UE-15 são os sectores da indústria (29%), transporte rodoviário (20%) e residencial (20%), segundo os dados das submissões nacionais à CLRTAP em 2002 (EU, 2004). Nestes dados, as emissões do sector dos transportes incluem as emissões de combustão dos veículos e as emissões que ocorrem por ressuspensão de partículas nas estradas. Nos restantes Estados membros, maioritariamente países do Leste Europeu, a maior contribuição vem do sector da produção de energia (32%) sendo os sectores da indústria (27%) e residencial (25%) também importantes.

A diferença entre estes dois grupos de países, que se verifica nos sectores da produção da energia e dos transportes, deve-se à menor frota de veículos, à maior percentagem de utilização de carvão e fuelóleo relativamente a gás natural e à menor utilização de tecnologias

de controlo no sector da produção de energia neste último grupo de países. Quando aplicadas as medidas de substituição de combustíveis e de instalação de tecnologias de controlo das emissões, o sector da produção de energia apresenta uma importância pouco significativa relativamente aos outros sectores (apenas 9% na UE-15) (EU, 2004).

A distribuição sectorial de emissões é diferente para as emissões de $PM_{2,5}$. Em 2006 e para o total da EU-27, as emissões resultantes da combustão contribuíam com 60% para as emissões de PM_{10} , enquanto que para as $PM_{2,5}$ essa contribuição era de 73% (EEA, 2008c). Esta diferente contribuição para as partículas PM_{10} e $PM_{2,5}$ reflecte o facto, acima referido, de que as $PM_{2,5}$ são emitidas essencialmente nos processos de combustão, incluindo o transporte rodoviário, que praticamente só emite partículas da fracção fina.

Relativamente à evolução sectorial de emissões na Europa, no período entre 2000 e 2006, os dados reportados pelos países membros à Convenção sobre a Poluição Atmosférica Transfronteiriça a Longa Distância (CLRTAP) são insuficientes para se poder inferir uma tendência (EEA, 2008c).

Em Portugal, contrariando a tendência de decréscimo verificada na União Europeia, registou-se um aumento de 41,6% das emissões de PM_{10} no período compreendido entre 1990 e 2006 (APA, 2008b). A distribuição sectorial de emissões é semelhante à verificada na EU-15. Os sectores mais significativos nas emissões de PM_{10} , em 2006, são os sectores da indústria (54% incluindo emissões de combustão e de processo), o sector residencial (14,5%) e ainda o processo de pavimentação das estradas com asfalto (17,5%) (APA, 2008b). O sector dos transportes é pouco importante (5,4%) e o sector da Energia apresenta apenas uma importância marginal (1,5%).

1.2.5. Legislação Europeia e Nacional

A legislação relativa às partículas existe apenas desde 1999, com a Directiva 1999/30/CE, transposta para o direito nacional em 2002, através do Decreto-lei nº 111/2002. Esta Directiva estabelece limites para as concentrações médias anuais e diárias de PM_{10} . A Directiva 2008/50/EC estabelece pela primeira vez limites de concentrações médias anuais e diárias para $PM_{2,5}$, a cumprir a partir de 2015.

Os precursores de partículas secundárias estão considerados na Directiva Tectos de Emissão Nacionais (NEC), designada por Directiva Tectos, e no protocolo de Gotemburgo da Convenção sobre a Poluição Atmosférica Transfronteiriça a Longa Distância (CLRTAP), que estabelecem ambos limites de emissão nacionais para aqueles poluentes.

Recentemente foi proposta pela Comissão Europeia a revisão da Directiva Tectos (EC, 2008), que considera pela primeira vez emissões de partículas. A revisão da Directiva Tectos apresenta limites nacionais para 2020 para emissões de óxidos de azoto, dióxido de enxofre, compostos orgânicos voláteis, amónia e $PM_{2,5}$ de modo a cumprir os objectivos ambientais definidos na Estratégia temática sobre a poluição atmosférica (EC, 2005). Para Portugal é proposta uma redução de 64% das emissões de $PM_{2,5}$ em 2020 relativamente ao ano 2000. As reduções nacionais propostas foram calculadas através do modelo GAINS e correspondem à solução mais custo-eficaz para o conjunto da UE.

A redução aplicada para $PM_{2,5}$ é percentual uma vez que para as partículas a metodologia não está tão desenvolvida como para os restantes poluentes e a qualidade dos dados não é assegurada. Após a implementação da nova Directiva Tectos e de novas submissões nacionais relativas às emissões de $PM_{2,5}$ em 2000, o valor percentual passará a um tecto nacional. É importante referir ainda que esta proposta é relativa a Portugal Continental e que o valor de emissões para o ano 2000 indicado (81Gg) é diferente do valor reportado no Informative Inventory Report (IIR) de 2008 (APA, 2008,b) para Portugal Continental (100Gg).

A Estratégia temática considera importante a inclusão dos tectos de $PM_{2,5}$ uma vez que, com as actuais políticas para este poluente, a redução na esperança média de vida devida às partículas passa dos actuais 8 meses para 5,5 meses em 2020 (EC, 2005). A aplicação dos limites propostos na revisão da Directiva Tectos permitirá uma redução deste valor para 2,5 meses em 2020.

1.3. Objectivos e Estrutura da Dissertação

A análise integrada de emissões de GEE e poluentes atmosféricos é um passo importante na perspectiva de definição de políticas e conseqüente elaboração de legislação nacional e internacional dirigida simultaneamente a ambos os tipos de emissões. O modelo utilizado para a realização deste trabalho, o TIMES_PT, é um modelo de optimização do sistema energético nacional, que minimiza os custos totais do sistema num ano objectivo com base numa determinada procura subjacente e cumprindo simultaneamente restrições ambientais. O modelo TIMES_PT é uma ferramenta essencial, que permite uma análise quantitativa comparativa entre cenários. Ao permitir a inserção de vários poluentes atmosféricos, constitui uma ferramenta útil para analisar interacções entre políticas ambientais. A integração de partículas no modelo TIMES_PT, que já inclui emissões de GEE, permitirá uma análise de co-benefícios das políticas de alterações climáticas na qualidade do ar e vice-versa. Permitirá igualmente uma análise de custo-eficácia de políticas comuns de redução.

Neste trabalho pretende-se quantificar interacções entre políticas de alterações climáticas e de qualidade do ar, utilizando o modelo TIMES_PT. Mais especificamente, tem-se por objectivo (1) avaliar o efeito das políticas climáticas de mitigação de GEE sobre as emissões de partículas em Portugal, (2) analisar o efeito do cumprimento dos limites para partículas finas propostos na nova Directiva Tectos nas emissões de GEE e ainda (3) avaliar o impacto que a proposta de revisão da Directiva Tectos terá nos vários sectores económicos em Portugal e o custo associado ao seu cumprimento.

Para cumprir os objectivos do trabalho foi necessário desenvolver o seguinte conjunto de tarefas:

1. Obtenção de dados relativos aos factores de emissão e às tecnologias de remoção de partículas
 - Revisão dos factores de emissão de partículas presentes na literatura
 - Cálculo de factores de emissão para os sub-sectoros da indústria.
 - Elaboração de um inventário de tecnologias de remoção de partículas existentes e aplicáveis ao sistema nacional
 - Caracterização técnica e económica das tecnologias de remoção
2. Modelo TIMES_PT
 - Familiarização e treino com o modelo TIMES_PT
 - Calibração para 2000 e validação para 2005 das emissões de PM_{2,5} e PM₁₀
3. Cenarização para 2030
 - Revisão da legislação nacional e europeia aplicável a partículas
 - Integração no modelo dos limites de emissões propostos pela CE

Esta dissertação encontra-se estruturada em quatro capítulos. O capítulo 1, apresenta o tema geral do trabalho e a sua relevância bem como uma revisão sobre matéria particulada, incluindo os seus efeitos na saúde humana, as suas principais fontes de emissão e a evolução das emissões e concentrações atmosféricas na Europa e em Portugal. No capítulo 2 descreve-se o modelo utilizado, os seus pressupostos, o trabalho desenvolvido para a integração de partículas no modelo e os cenários analisados. No capítulo 3 são apresentados e discutidos os resultados obtidos para cada cenário, analisado segundo as componentes emissões totais e sectoriais de partículas/GEE, consumo de energia primária e consumo de energia final. É ainda analisada a restrição proposta quanto aos custos marginais de redução de partículas. No capítulo 4 são apresentadas as conclusões deste trabalho.

2. METODOLOGIA

2.1. O modelo TIMES

O TIMES é um modelo de optimização de custos do sistema energético desenvolvido pelo Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP) da Agência Internacional de Energia (AIE). Através da simulação do sistema energético para qualquer ano futuro, com base numa procura energética subjacente, permite a análise comparativa do comportamento do sistema entre cenários alternativos de políticas energéticas ou ambientais. TIMES é um acrónimo para The Integrated MARKAL-EFOM System, sendo um sucessor dos modelos MARKAL (Market Allocation) e EFOM (Energy Flow Optimisation Model), ambos desenvolvidos pela AIE.

O modelo TIMES tem um conjunto de aplicações possíveis, entre as quais, identificar as opções de investimento no sistema energético de modo a satisfazer uma determinada procura a um custo mínimo, identificar respostas custo-eficazes do sistema energético a restrições nas emissões de determinados poluentes, projectar inventários de emissões de poluentes para determinado horizonte temporal, avaliar os efeitos de regulações, taxas e subsídios no sistema energético e/ou nas emissões, avaliar o potencial para entrada de novas tecnologias e assim identificar prioridades de investigação e desenvolvimento.

Para calcular a solução óptima, de minimização de custos do sistema energético, o modelo necessita de determinados inputs exógenos, inseridos pelo utilizador. Existem quatro tipos de inputs: procura energética e de materiais, fontes de energia primária incluindo o potencial dos recursos energéticos endógenos, políticas e medidas decididas ou a implementar e ainda os parâmetros técnico-económicos das tecnologias existentes e futuras. São assim necessárias estimativas da procura energética em todos os sectores para o ano objectivo (e.g. número de quilómetros percorridos em transporte rodoviário, procura de aquecimento e iluminação no sector residencial, procura energética de todas as indústrias, etc.), bem como de materiais. São também necessárias como inputs, as fontes presentes e futuras de produção de energia bem como os seus potenciais, estimativas do stock existente de tecnologias de produção de energia em todos os sectores, bem como uma base de dados de novas tecnologias de produção de energia. Políticas e medidas aplicáveis ao sistema energético devem também ser explicitadas, por exemplo, limites superiores ou inferiores às capacidades de tecnologias de produção de energia ou restrições às emissões de determinados poluentes. Os parâmetros técnico-económicos, necessários para a escolha entre tecnologias, incluem o custo de investimento, custos de operação e manutenção, tempo de vida, factores de emissão de poluentes, eficiência.

Como outputs do modelo obtêm-se o custo total do sistema energético, a configuração do sistema energético, incluindo as fontes de energia primária, a capacidade instalada de cada tecnologia de produção de energia, fluxos materiais, preços de energia final e a procura de energia final por sector do sistema energético, emissões de poluentes e, caso existam restrições ambientais, custos marginais de redução desses poluentes.

Utilizando os inputs acima referidos, o TIMES procura fornecer serviços de energia para o ano objectivo a um custo global mínimo do sistema energético, ou mais precisamente, a uma perda mínima de benefício líquido. Para atingir este objectivo e dados os inputs acima referidos, o modelo faz um conjunto de escolhas de oferta de energia, trocas comerciais de energia e de investimento em novas tecnologias. Por exemplo, se é esperado um aumento na procura de iluminação residencial, o modelo terá de escolher entre utilizar o presente stock de equipamentos de iluminação ou investir em novos equipamentos mais eficientes. A escolha dos equipamentos de produção de energia é baseada na análise dos parâmetros técnico-económicos associados a cada equipamento incluindo as suas características ambientais, caso existam critérios ambientais.

Deste modo, o modelo TIMES opera configurando o sistema energético ao longo de um determinado horizonte temporal de modo a satisfazer a procura energética e simultaneamente um conjunto de restrições impostas a um custo total mínimo do sistema. Deste modo, o modelo encontra a solução tecnológica de menor custo para satisfação da procura. A solução óptima do sistema é obtida através da minimização da sua função objectivo:

$$NPV = \sum_{r=1}^R \sum_{y \in YEARS} (1 + d_{r,y})^{REFYR-y} \cdot ANNCOST(r, y) \quad (1)$$

NPV: valor actualizado líquido dos custos totais

ANNCOST: custos anuais totais

d: taxa de actualização

r: região

REFYR: ano de referência para a actualização

YEARS: conjunto de anos do horizonte de modelação + anos passados, caso existam custos de investimentos passados + anos após o horizonte temporal, caso existam custos de desmantelamento e recuperação material.

A função objectivo corresponde à soma actualizada dos custos menos os ganhos totais, ao longo de todo o horizonte temporal. Os custos totais anuais (ANNCOST) têm várias componentes, explicitadas em base anual: custos de investimento, custos relativos a material retido na estrutura durante o tempo de vida da mesma, custos fixos e custos variáveis de operação e manutenção, custos de supervisão, custos de desmantelamento e impostos. A

estes custos são subtraídos os subsídios e os ganhos de recuperação de material. Enquanto as variáveis e as restrições são aplicáveis a um período de tempo, os componentes do custo são anuais, o que pretende tornar o modelo mais realista ao aproximá-lo do sistema de pagamentos real do sistema energético.

Comparativamente com outros modelos semelhantes, de simulação de sistemas energéticos, o TIMES é um modelo bottom-up, de base tecnológica, linear, e de equilíbrio parcial e dinâmico. Ao contrário dos modelos top-down, no TIMES a função de produção de cada sector é implicitamente construída através dos outputs das várias tecnologias, sendo para tal necessário especificar uma série de parâmetros técnicos e económicos associados a cada tecnologia. A propriedade de linearidade significa que a relação entre os inputs e outputs é linear, sem economias de escala, embora a função de produção seja geralmente não linear, constituída por um conjunto de funções lineares para vários intervalos de valores.

É um modelo que funciona com equilíbrio parcial no mercado energético. Ou seja, o modelo processa fluxos de energia e materiais bem como os seus preços de modo a que, aos preços 'assumidos' pelo modelo, os fornecedores de energia produzem exactamente as quantidades que os consumidores estão dispostos a comprar. Esta característica do modelo permite a maximização do benefício líquido total, isto é, a maximização da soma dos benefícios líquidos dos produtores e dos consumidores. Note-se que, no TIMES, os produtores são tecnologias que produzem um determinado bem enquanto que os consumidores são tecnologias ou a procura de determinado bem. O TIMES é ainda um modelo de equilíbrio dinâmico no sentido em que todas as decisões de investimento feitas num determinado período têm em conta o conhecimento dos parâmetros do mercado, presentes e futuros em todo o horizonte temporal analisado (Loulou *et al.*, 2005).

É importante referir que a solução do TIMES não deve ser interpretada como uma previsão do sistema energético no futuro. Devido aos longos períodos de tempo simulados, não é possível prever com rigor o comportamento dos drivers (e.g. procura energética, preços de combustível) do sistema energético no futuro. Assim, as soluções do TIMES devem ser utilizadas de modo comparativo, através de uma análise das alterações no sistema energético e consequências ambientais entre cenários alternativos. Um cenário consiste num conjunto de inputs, dos quatro tipos acima referidos, que constituem um futuro possível. Ao contrário de uma previsão, não pressupõe o conhecimento rigoroso do comportamento futuro dos drivers do sistema energético. Consiste antes num conjunto de pressupostos coerentes sobre as trajectórias futuras destes drivers, que não têm necessariamente de ocorrer no futuro como previstas.

A estrutura genérica do TIMES pode ser adaptada para simular um sistema energético específico, à escala local, nacional ou multi-regional.

2.2. O modelo TIMES_PT

O modelo TIMES_PT consiste numa adaptação do modelo TIMES ao sistema energético português. Foi desenvolvido no âmbito do projecto europeu NEEDS (New Energy Externalities Development for Sustainability) para integrar um modelo TIMES pan-europeu. Este projecto, que terminou em Fevereiro de 2009, teve como objectivo a avaliação dos custos e benefícios totais (incluindo externalidades) das políticas energéticas e sistemas energéticos futuros, tanto a nível dos países membros individuais como para o total da União Europeia. O TIMES_PT consiste numa ferramenta útil para avaliação de políticas energéticas (Simões *et al.*, 2008) ou climáticas e, como tal, tem sido utilizado como suporte a entidades públicas para avaliar o impacto de políticas europeias (MAOTDR, 2008).

No TIMES_PT está modelado o sistema energético Português de 2000 a 2030. Seguidamente referem-se os sectores considerados, a informação relativa aos inputs, e ainda os pressupostos considerados para a calibração do modelo para o sistema português.

Os sectores presentes no modelo incluem oferta de energia primária (refinação e produção de combustíveis sintéticos, importação e recursos endógenos); geração de electricidade; indústria (cimento, vidro, cerâmica, aço, química, pasta de papel, cal e outras indústrias); residencial; terciário; agricultura, silvicultura e pescas (apenas a componente de consumo de energia) e transportes, como apresentado na Figura 2.1.

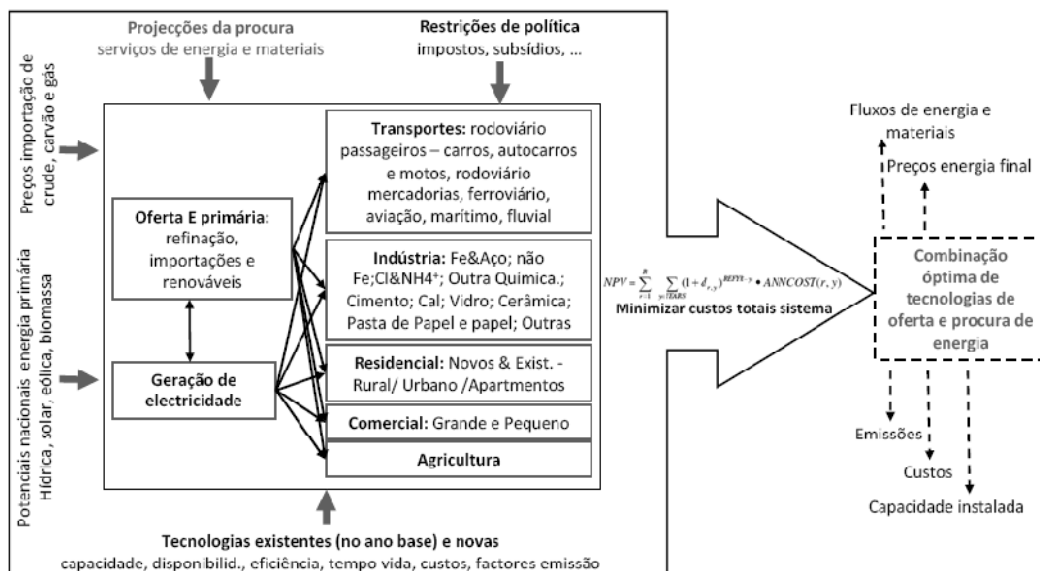


Figura 2.1 – Estrutura do modelo TIMES_PT (Fonte: Seixas *et al.*, 2007)

Relativamente aos inputs, a procura de serviços de energia foi gerada tendo em conta as projecções do modelo macroeconómico GEM-E3 para o crescimento do VAB dos diversos sectores económicos nacionais (Simões *et al.*, 2008). As tecnologias de oferta e procura de

energia foram caracterizadas relativamente aos seus parâmetros de capacidade instalada, eficiência, factor de disponibilidade e rácio input/output recorrendo a diversas fontes nacionais. As novas tecnologias de geração e consumo de energia, bem como os seus parâmetros, são as existentes na base de dados do projecto NEEDS com adições de tecnologias que reflectem a especificidade nacional. Foram inseridos factores de emissão de GEE no âmbito da avaliação do impacto da proposta Energia-Clima para Portugal, através da associação de factores de emissão de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) a todos os sectores modelados (MAOTDR, 2008).

Em Portugal, o potencial de energia primária endógena (tabela 2.1) é relativo apenas a energias renováveis, uma vez que o potencial extractivo de combustíveis fósseis é praticamente nulo, existindo apenas reservas residuais de carvão sem valor comercial (Simões *et al.*, 2008). Relativamente às energias renováveis, foi necessária a determinação do seu potencial, uma vez que cada recurso energético está sujeito a uma série de constrangimentos que limitam o seu potencial, como a terra disponível, ou a velocidade do vento (eólica). Para os combustíveis fósseis, foram considerados no modelo preços de importação de energia primária (carvão, crude e gás natural) com base em projecções da AIE (Cleto & Simões, 2007).

Tabela 2.1 – Potenciais endógenos de energia primária considerados no TIMES_PT (Fonte: MAOTDR, 2008)

| Tipo de energia primária | Potencial em 2000 | Potencial em 2020 | Fonte |
|---|-------------------|-------------------|--|
| Biomassa florestal (PJ) | 74,53 | 48,40 | GPPAA-MADRP |
| Resíduos agrícolas (PJ) | 74,53 | 16,30 | GPPAA-MADRP |
| Biogás (PJ) | 0,10 | 23,21 (+75%) | GPPAA & Extrapolação do PNAC |
| Culturas para produção de Biocombustíveis (PJ) | 0,00 | 9,99 (+100%) | GPPAA-MADRP |
| Importação de culturas para Biocombustível (PJ) | 0,00 | n,a, | |
| Óleos alimentares para produção de biodiesel (PJ) | 0,00 | 0,59 (+100%) | Fórum de Energias Renováveis |
| Culturas para produção de etanol (PJ) | 0,00 | 19,5 (+100%) | GPPAA-MADRP |
| Importação de culturas para produção de etanol (PJ) | 0,00 | n,a, | |
| Produção de biocombustíveis (PJ) | 0,00 | n,a, | |
| RSU (PJ) | 7,30 | 10,00 (+27%) | Extrapolação do PNAC |
| Lamas industriais (PJ) | 0,00 | 2,00 (+100%) | Estimativa |
| Solar – AQS (PJ) | 0,75 | 38,01 (+98%) | Extrapolação do Fórum Energias Renováveis em Portugal |
| Hídrica (GW) | 4,52 | 6,96 (+30%) | Plano Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroeléctrico |

| Tipo de energia primária | Potencial em 2000 | Potencial em 2020 | Fonte |
|---------------------------------------|-------------------|-------------------|---|
| Eólica onshore (GW) | 0,08 | 7,60 (+80%) | Informação fornecida pelo Eng. Sá da Costa, APREN |
| Eólica offshore (GW) | 0,00 | 1,00 (+100%) | Estimativa com base no estudo do INETI |
| Solar – geração de electricidade (GW) | 0,00 | 2,40 (+100%) | REN |
| Geotérmico (GW) | 0,01 | 0,05 (+75%) | Extrapolação do Fórum Energias Renováveis em Portugal |
| Ondas (GW) | 0,00 | 1,20 (+100%) | REN |
| Fotovoltaica (GW) | 0,00 | 9,30 (+100%) | REN |

Como componentes da função (1), são considerados no TIMES_PT os custos de investimento, os custos fixos e variáveis de operação e manutenção das várias tecnologias de produção e consumo de energia e o imposto sobre produtos petrolíferos (ISP). Os proveitos geralmente incluídos no modelo, que incluem subsídios e recuperação de materiais não são considerados no TIMES_PT.

O conjunto de políticas do governo português em matéria de energia foi considerado e serviu de base à calibração do modelo para o ano base (2000). Os pressupostos considerados, de acordo com decisões políticas nacionais, podem ser consultados em Simões *et al.*, 2008. São exemplos de alguns destes pressupostos:

- A inexistência da opção de energia nuclear em Portugal, de acordo com as declarações do primeiro-ministro no início de 2006.
- A capacidade instalada de energia eólica em 2010 deverá ser 5100 MW, de acordo com a legislação e a capacidade mínima de eólica onshore deverá ser 1.1 MW em 2005 (o que se verificou).
- A capacidade instalada de Centrais a gás de ciclo combinado para geração de energia eléctrica será no mínimo 1100 MW no período compreendido entre 2010 e 2030 e só poderão ser instaladas novas centrais a carvão a partir de 2015, seguindo a política nacional de diversificação de fontes energéticas
- Em 2010, 5.75% do combustível usado em transportes será biocombustível, de acordo com a Directiva dos Biocombustíveis.
- A importação máxima de electricidade será 60 PJ em 2050 e a exportação máxima será 30 PJ em 2030, a importação máxima de carvão será 20% do valor de 2000. Estes limites asseguram que Portugal terá capacidade nacional para satisfazer a sua procura.
- Não existe produção de calor em centrais dedicadas – toda a energia térmica será produzida através de cogeração.

- A cogeração (CHP) centralizada está limitada a um valor máximo de 20% da electricidade produzida em 2010 e 14% em 2030. Pelo menos 32% da electricidade consumida na indústria é produzida centralmente em 2001, 38% em 2010 e 40% em 2050.

2.3. Introdução de Partículas PM_{2,5} e PM₁₀ no modelo TIMES_PT

2.3.1. Calibração e Validação

O modelo TIMES_PT foi calibrado para as emissões de PM_{2,5} e PM₁₀, para o ano 2000, com base nos dados de emissões utilizados para a elaboração do Informativo Inventory Report (IIR) de 2008 ⁽¹⁾, a submissão nacional efectuada no âmbito da CLRTAP, e nos consumos de energia presentes no modelo, provenientes do balanço energético da Direcção Geral de Energia e Geologia (DGEG). Para efeitos de calibração e validação considera-se admissível um erro inferior a 10% entre as emissões obtidas através do modelo e as reportadas no IIR.

O TIMES_PT modela o sistema energético nacional, incluindo continente e ilhas, e deste modo modela também o total nacional de emissões. Recorde-se que a proposta da CE relativa às emissões de PM_{2,5} é relativa apenas a Portugal Continental. No entanto, as emissões reportadas no IIR relativas a Portugal Continental (100Gg) correspondem à quase totalidade das emissões nacionais (101Gg), pelo que a diferença não é significativa.

No TIMES_PT não estão modeladas as emissões fugitivas de combustíveis sólidos (NFR 1B1/1B2) e as emissões associadas à queima de resíduos agrícolas (NFR 4F). As restantes emissões inseridas no modelo correspondem a 96% do total de emissões de partículas (PM_{2,5}), de acordo com os dados do IIR relativos ao ano de 2005.

Relativamente às emissões de combustão, o modelo já se encontrava calibrado para as emissões de partículas suspensas totais (PST) para todos os sectores, com excepção da indústria. Para estes sectores, foi assim necessário substituir os factores de emissão de PST por factores de emissão de PM_{2,5} e PM₁₀. Para tal utilizaram-se as percentagens de cada uma destas fracções de partículas presentes nas PST, variáveis consoante o tipo de combustível e o sector, indicadas no IIR de 2008 (IIR, 2008). Nos casos em que o combustível presente no modelo corresponde a uma agregação de combustíveis, efectuou-se uma ponderação destas percentagens com base nos factores de agregação.

(1) Informação cedida por Teresa Costa Pereira, Agência Portuguesa do Ambiente.

No sector da indústria, calcularam-se factores de emissão implícitos para a utilização de cada combustível em cada tipo de indústria, incluindo os processos de cogeração. Deste modo, dividiu-se o somatório das emissões associadas a cada combustível em cada indústria pelo respectivo consumo energético, obtido através do modelo. Relativamente às emissões de processo, foram calculados factores de emissão implícitos do mesmo modo, através da divisão do total de emissões associadas a um determinado processo pelo respectivo consumo energético constante no modelo para o ano base. A diferença, em cada sector, nos valores de $PM_{2,5}$ e PM_{10} entre o TIMES e o IIR não ultrapassa 9%, constatando-se uma boa correspondência, como se mostra na Figura 2.2.

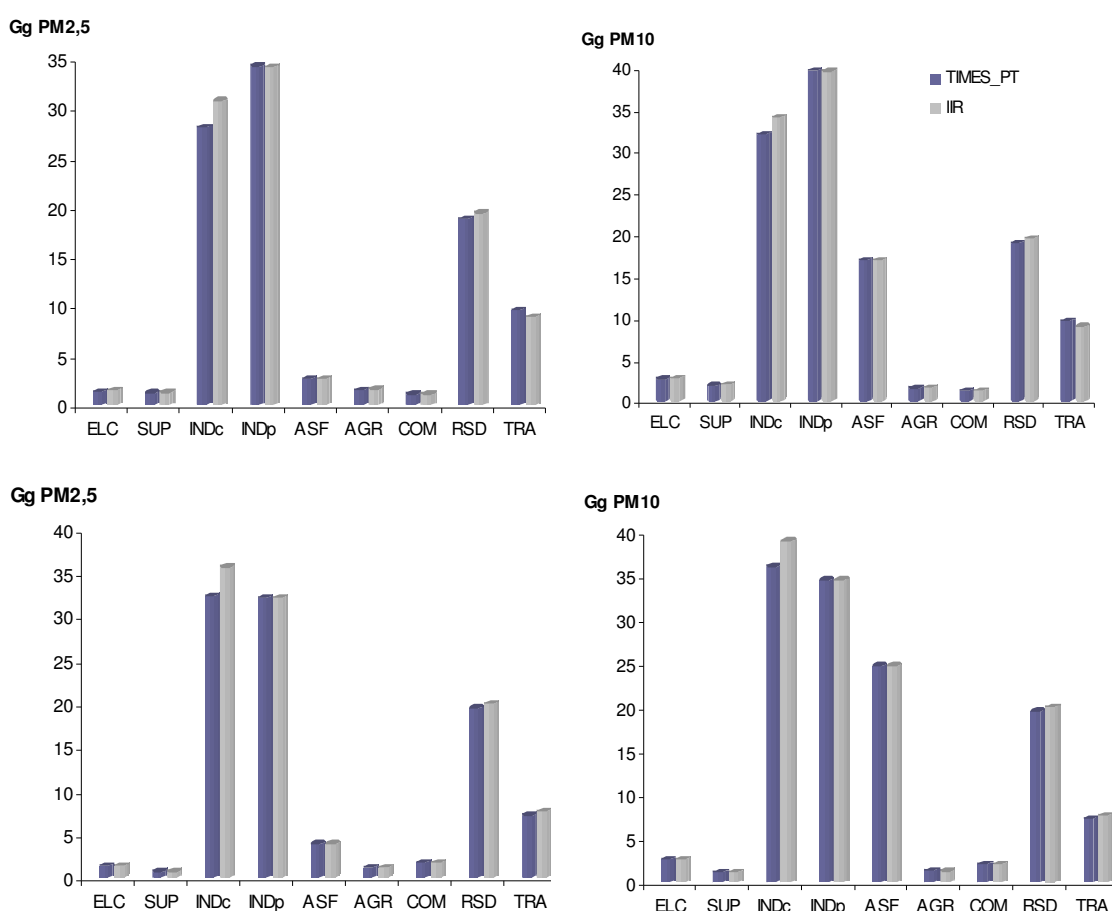


Figura 2.2 – Calibração para 2000 (em cima) e validação para 2005 (em baixo) das emissões de $PM_{2,5}$ e PM_{10} . ELC – produção de electricidade, SUP – Refinação, INDc – Indústria (combustão), INDp – Indústria (processo), ASF – ressuspensão asfalto, AGR – Agricultura, COM – Sector comercial, RSD – Sector residencial, TRA - Transportes

O modelo foi validado para 2005 através do cálculo de factores de emissão implícitos como acima descrito, por combustível e sector ou por combustível e por tipo de indústria, no caso da indústria. Para os sectores residencial, comercial, agricultura e transportes verificou-se que as

emissões em 2005 obtidas através do modelo diferiam em menos de 10% das reportadas no IIR, o que significa que os factores de emissão apurados para 2000 se mantêm aproximadamente constantes em 2005 para estes sectores. Já para os sectores da produção de electricidade, refinação e indústria foi necessário ajustar os factores de emissão, tendo-se obtido diferenças inferiores a 9% para cada sector entre o TIMES e o IIR. A figura 2.2 mostra o resultado da validação do modelo para as emissões de PM_{2,5} e PM₁₀.

2.3.2. Tecnologias de remoção de partículas

Foram inseridas tecnologias de remoção de emissões de PM_{2,5} e PM₁₀ de modo a possibilitar ao modelo o controlo das emissões destes poluentes, através de opções tecnológicas de fim-de-linha. A base de dados de tecnologias de remoção de partículas do GAINS, incluindo os seus parâmetros de caracterização, foi utilizada para a elaboração da base de dados a inserir no TIMES_PT. Cada tecnologia é caracterizada por um conjunto de parâmetros: eficiência de remoção de PM_{2,5} e PM₁₀, custo (inclui o custo de investimento e os custos fixos de operação e manutenção) e tempo de vida.

As tecnologias de remoção existentes no GAINS para os sectores da produção de electricidade, refinação e indústria consistem em ciclones, precipitadores electrostáticos de um ou dois campos e despoeiradores de elevada eficiência. No sector residencial, para além dos ciclones e despoeiradores de elevada eficiência, existem ainda pellets, precipitadores electrostáticos para caldeiras com consumo de pellets, equipamentos melhorados com menores emissões associadas e novos equipamentos. Na Tabela 2.2 encontram-se as tecnologias presentes no GAINS bem como uma descrição do seu modo de funcionamento e as suas gamas de eficiência, que é variável consoante o sector e tipo de combustível.

Tabela 2.2 – Tecnologias de remoção de PM_{2,5} e PM₁₀ inseridas no modelo TIMES_PT

| Tecnologia | Nomenclatura GAINS | Descrição/ Princípio de funcionamento | Eficiência de remoção (%) | |
|---------------------------------------|--------------------|--|---------------------------|------------------|
| | | | PM _{2,5} | PM ₁₀ |
| Ciclone | CYC | Remove partículas por um processo de centrifugação dos gases emitidos. As partículas, mais densas, colidem com as paredes do ciclone, perdem velocidade e depositam-se no fundo. | 30 | 35,4-62,3 |
| Precipitador electrostático (1 campo) | ESP1 | Funciona através da criação de um campo electromagnético que carrega as partículas electrostáticamente, sendo depois removidas por atracção electromagnética. | 93 | 93,3-94,6 |

| Tecnologia | Nomenclatura GAINS | Descrição/ Princípio de funcionamento | Eficiência de remoção (%) | |
|---|-----------------------|---|---------------------------|------------------|
| | | | PM _{2,5} | PM ₁₀ |
| Precipitador electrostático (2 campos) | ESP2 | Funcionamento idêntico ao precipitador electrostático de 1 campo mas com um campo electrostático adicional e duas fases de remoção. | 96 | 96,4-98,4 |
| Despoeirador de elevada eficiência | HED | Inclui todos os despoeiradores de eficiência superior à dos precipitadores electrostáticos, tais como filtros de mangas. | 99 | 99,3-99,7 |
| Pellets | PELL | Tipo de combustível que consiste em granulados de madeira comprimida a pressões elevadas | 90-95 | 90-95 |
| Pellets+ Precipitador electrostático | PLESP | Precipitador electrostático aplicável a caldeiras com consumo de pellets (sector residencial) | 99-99,3 | 99-99,3 |
| <i>Spray</i> | SPRAY | Água nas vias rodoviárias após colocação de asfalto ou pavimento nos locais de construção | 10 | 18,9 |
| Equipamento melhorado | IMP | Adições construtivas que diminuem as emissões de partículas (aplicável a caldeiras, fogões e lareiras no sector residencial) | 60-44 | 60-44 |
| Novo equipamento | NEW | Equipamentos novos, com menores emissões de partículas associadas (aplicável a caldeiras, fogões e lareiras no sector residencial) | 70-80 | 70-80 |

Não foram introduzidas tecnologias no sector comercial uma vez os combustíveis consumidos neste sector consistem maioritariamente em combustíveis líquidos (derivados de petróleo), não sendo consumida biomassa. Para estes combustíveis, todas as tecnologias disponíveis para controlo de emissões estão já implementadas, de acordo com a percentagem de penetração obtida igualmente do modelo GAINS, como explicado a seguir.

Também no sector dos transportes não foram inseridas tecnologias de remoção, uma vez que os factores de emissão das novas tecnologias automóveis já reflectem a existência de tecnologias de fim-de-linha nos veículos, nomeadamente filtros de partículas. Por exemplo, os veículos a gasolina existentes em 2000, ano base do TIMES_PT, têm um factor de emissão de 0,07 Gg/PJ enquanto que os novos veículos que consomem este combustível têm já um factor de emissão associado de 0,0035 Gg/PJ. Estes novos factores de emissão foram obtidos com base nas normas EURO, consideradas apenas até à EURO IV.

As tecnologias existentes no GAINS têm parâmetros diferentes consoante o sector e o tipo de combustível, pelo que cada tecnologia genérica descrita na Tabela 2 pode ser subdividida em várias tecnologias iguais mas com parâmetros de caracterização diferentes. No modelo foram inseridas tecnologias de remoção por sector e por tipo de combustível, em coerência com o GAINS. No Anexo I apresenta-se uma lista exaustiva das tecnologias de remoção de partículas inseridas no TIMES_PT bem como os seus respectivos parâmetros.

As tecnologias inseridas em cada sector não correspondem ao total de tecnologias disponíveis, uma vez que já se encontravam tecnologias de remoção aplicadas em alguns sectores. A escolha das tecnologias a inserir no modelo, a partir do conjunto de tecnologias de remoção disponíveis para cada sector, baseou-se na percentagem de penetração de cada tecnologia de remoção no ano 2005, igualmente obtida através do GAINS. As tecnologias inseridas correspondem às tecnologias mais eficientes ainda não implementadas bem como às tecnologias já existentes, no caso da percentagem de penetração destas ser inferior a 100% no ano 2005. Por exemplo, em 2005, o GAINS considera para o consumo de biomassa no sector da indústria, a implementação de ESP1 a 20% e de ESP2 a 80%. Neste caso, isto é, para o consumo deste combustível neste sector, apenas foram inseridas as tecnologias ESP2 e HED, a primeira para permitir ao TIMES_PT a escolha de implementar esta tecnologia a 100% e segunda porque corresponde a uma opção tecnológica mais eficiente.

A eficiência de remoção associada a cada tecnologia inserida não corresponde à eficiência indicada no GAINS, nos casos em que existiam já tecnologias aplicadas em 2005. Nestes casos, o factor de emissão implícito calculado para 2005 já reflecte a presença de tecnologias de remoção no sector. Foi calculada para cada tecnologia uma nova eficiência de remoção para ambas as fracções de partículas. Esta corresponde à eficiência de remoção adicional relativamente à eficiência presente no ano de 2005, calculada tendo em conta as tecnologias existentes em 2005 e a sua percentagem de penetração. No mesmo exemplo, em 2005, com a implementação de ESP1 (eficiência de remoção de 93%) a 20% e de ESP2 (eficiência de remoção de 96%) a 80%, por cada 100Gg de partículas são emitidas 4,6Gg ($20 \times 0,07 + 80 \times 0,04$). A implementação de ESP2 a 100% permite a emissão de 4Gg por cada 100Gg, pelo que a sua eficiência de remoção adicional corresponde a 13% ($((4,6-4)/4,6 \times 100)$).

Assumi-se que os factores de emissão implícitos calculados para 2005 reflectiam esta percentagem de penetração, ou seja, considerou-se que em alguns sectores estavam já implementadas algumas das tecnologias de remoção disponíveis. A partir de 2006 foi dada liberdade ao modelo para escolher entre as opções restantes para cada sector.

2.3.3. Factores de emissão para as novas tecnologias e directiva GIC

O TIMES_PT contém uma base de dados de novas tecnologias para cada sector, que podem ser escolhidas pelo modelo para substituir as tecnologias existentes, ao longo do horizonte temporal de modelação. Foi necessário validar os factores de emissão de $PM_{2,5}$ e PM_{10} para estas novas tecnologias.

No sector da geração de electricidade, encontravam-se associados às novas tecnologias factores de emissão para PST. Os factores de emissão de $PM_{2,5}$ e PM_{10} foram calculados com base nas percentagens destas fracções nas PST, de acordo com o tipo de combustível, como já referido anteriormente. O sector dos transportes já incluía igualmente factores de emissão de PST para novas tecnologias. O mesmo factor de emissão foi aplicado a $PM_{2,5}$ e PM_{10} , uma vez que a maioria das partículas emitidas são inferiores às $PM_{2,5}$. Nos restantes sectores as novas tecnologias assumem o factor de emissão implícito calculado para 2005.

Não se considerou necessário fazer um ajustamento dos factores de emissão das novas tecnologias uma vez que, com os factores de emissão presentes no modelo, a evolução das emissões para os vários sectores no período 2000-2020 obtida através do TIMES_PT é coerente com a indicada no GAINS.

Foi acomodado o Plano Nacional de Redução das Emissões (PNRE) das Grandes Instalações de Combustão (GIC), para a produção de electricidade e refinação. O PNRE apresenta limites anuais de partículas, SO_2 e NO_x para as grandes instalações de combustão existentes em Portugal no ano 2000, de modo a cumprir os valores limite de emissão (VLE) constantes na directiva GIC. Para os restantes sectores, pasta e papel e petroquímica, não foi possível considerar os limites constantes no PNRE devido ao nível de agregação presente no TIMES_PT, que não permite a associação de factores de emissão específicos às instalações indicadas.

De modo a considerar a implementação desta política no modelo, foram calculados limites para $PM_{2,5}$ e PM_{10} correspondentes aos limites de PST presentes no PNRE. Os limites de PST, a aplicar a partir de 2008, correspondem a 2449 toneladas por ano (tpa) para o sector da produção de electricidade, que inclui apenas as centrais com consumo de carvão, Sines e Pego, e 226 tpa para o sector da refinação. Com base nas percentagens de $PM_{2,5}$ e PM_{10} presentes nas PST para os combustíveis consumidos nestes sectores foram calculados limites para estas fracções de partículas, respectivamente 1640 tpa e 710 tpa no sector da produção de electricidade e 166 tpa e 130 tpa no sector da refinação. Foram introduzidos novos factores de emissão para estes sectores de modo a obter-se o total de emissões calculado, reflectindo a implementação do PNRE.

2.4. Cenários analisados

Os cenários analisados baseiam-se nos desenvolvidos no âmbito da avaliação do impacto da proposta Energia-Clima para Portugal (MAOTDR, 2008). Seleccionaram-se os cenários BAU (Business-as-usual) e QUIT (Quioto Tendencial), que diferem em termos de legislação considerada, o segundo contendo objectivos mais exigentes com vista ao cumprimento do Protocolo de Quioto. Através de uma análise comparativa destes dois cenários, avaliou-se os co-benefícios das políticas e medidas implementadas com vista ao cumprimento do Protocolo de Quioto, nas emissões de partículas. Com o objectivo de avaliar os co-benefícios das políticas de redução de emissões de partículas nas emissões de GEE, foi elaborado um cenário, designado NEC6. O cenário NEC6 é equivalente ao cenário QUIT, incluindo adicionalmente a restrição proposta para Portugal na revisão da directiva NEC: uma redução de 64% das emissões de PM_{2,5} em 2020 relativamente aos valores de 2000. Uma vez que a restrição proposta é percentual, aplicou-se uma redução percentual ao valor de 2000 constante no IIR para calcular o valor limite de emissões em 2020.

Nos três cenários analisados é assumida a mesma procura de energia e materiais. A procura foi definida pelos cenários macro-económicos nacionais, desenvolvidos pelo Departamento de Prospectiva e Planeamento e Relações Internacionais (DPP) do Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e Desenvolvimento Regional (Ribeiro *et al.*, 2008). Estes cenários assumem uma determinada evolução de crescimento económico nacional (PIB) e sectorial (VAB), expansão do parque habitacional e de serviços e ainda necessidades de mobilidade de passageiros e mercadorias. A evolução esperada para estes parâmetros, gera uma procura correspondente de energia para os sectores residencial e serviços (que inclui procura de aquecimento, arrefecimento, iluminação, entre outros), procura de energia para satisfazer as necessidades de mobilidade e procura de energia e matérias-primas para a indústria.

Embora no trabalho desenvolvido para a avaliação da proposta Energia-Clima para Portugal tenham sido assumidos dois cenários para a procura, cenário Tendencial e cenário Mudança, neste trabalho foi apenas considerado o cenário Tendencial uma vez que é o que apresenta maior aderência à evolução da economia portuguesa. Para uma análise mais detalhada sobre a evolução da procura de serviços de energia e materiais consultar MAOTDR, 2008.

Os cenários analisados distinguem-se apenas no que se refere às políticas e medidas (P&M) que cada um acomoda. O cenário BAU apenas considera as P&M já implementadas até 31 de Dezembro de 2007. O cenário QUIT inclui as P&M já implementadas até 31 de Dezembro bem como as decididas até esta data, destacando-se o PNAC 2006 e Novas Metas de 2007 (Resolução de Conselho de ministros 1/2008 de 4 de Janeiro), que têm como objectivo assegurar o cumprimento do Protocolo de Quioto. Entre estas salientam-se as seguintes medidas: 45% de produção de electricidade a partir de fontes de energia renováveis em 2010;

potência hidroeléctrica instalada de 7588 MW em 2020, segundo os objectivos do Plano Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroeléctrico (PNBEPH); nova central a carvão de potência 900 MW, com captura e sequestro de carbono (CCS) em 2020, 10% de biodiesel nos combustíveis a partir de 2010, 5% de transferência modal nas áreas metropolitanas de Lisboa e Porto, do carro articular para o transporte colectivo, objectivos de eficiência energética do Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética (PNAEE) (MAOTDR, 2008). O cenário NEC6 contém o mesmo conjunto de P&M acomodadas no cenário QUIT.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são apresentados em quatro secções, focando os três cenários analisados, BAU, QUIT e NEC6, seguindo a sequência: (1) emissões de partículas no cenário QUIT, com vista a avaliar co-benefícios de políticas climáticas de mitigação de GEE nas emissões de partículas; (2) emissões de partículas no cenário NEC6, de modo a avaliar a solução mais custo-eficaz obtida para o cumprimento do tecto proposto; (3) emissões de GEE no cenário NEC6, com vista a avaliar co-benefícios de políticas de qualidade do ar na mitigação de GEE; (4) custos de cumprimento da restrição proposta pela CE. Recorde-se que os cenários diferem nas políticas e medidas inseridas (P&M), sendo que o BAU contém as P&M implementadas até 31 de Dezembro de 2007, o QUIT e o NEC6 contêm adicionalmente todas as políticas decididas até à mesma data e o NEC6 inclui ainda a restrição para emissões de partículas proposta pela CE.

Nas duas primeiras secções, a discussão segue o padrão: análise das emissões de partículas; avaliação dos drivers das emissões, nomeadamente aplicação de tecnologias de remoção de partículas ou alterações no sistema energético, por substituição de combustíveis ou por alterações no perfil de tecnologias energéticas.

3.1. Cenário QUIT: emissões de partículas

A introdução de $PM_{2,5}$ e PM_{10} no modelo TIMES_PT permite apurar as emissões destes poluentes no cenário QUIT. Através da análise da diferença de emissões no cenário QUIT relativamente ao cenário BAU, é possível avaliar o efeito que políticas implementadas em Portugal com vista ao cumprimento do Protocolo de Quioto têm sobre a qualidade do ar, no que concerne a este poluente. Nesta secção analisam-se as diferenças nas emissões de partículas e no sistema energético nacional nos cenários BAU e QUIT. Recorde-se que nenhum destes cenários inclui restrições às emissões de partículas.

É importante referir que o cenário BAU não consiste num cenário de referência, sem quaisquer políticas e medidas (P&M) climáticas implementadas. As diferenças mais significativas de P&M nos dois cenários encontram-se na *obrigatoriedade*, até ao ano 2020, de instalação de uma central CCS no cenário QUIT bem como um aumento de electricidade renovável de 39% no BAU para 45% no QUIT e na utilização de biocombustíveis no sector dos transportes, 5,75% no BAU para 10% no QUIT. A lista exhaustiva de políticas e medidas inseridas nos cenários BAU e QUIT pode ser encontrada em MAOTDR, 2008. Deste modo o BAU contém algumas P&M climáticas e o QUIT pode ser interpretado como um cenário que contém objectivos mais ambiciosos para o cumprimento do Protocolo de Quioto.

3.1.1. Emissões totais e sectoriais de PM_{2,5}

A evolução das emissões totais de PM_{2,5} no período 2000-2020 é semelhante nos cenários BAU e QUIT (figura 3.1), verificando-se uma redução de 28%. Deste modo, parte da redução nas emissões exigida na proposta da CE (64%) é acomodada com a evolução expectável do sistema energético, pelo que será apenas necessária uma redução adicional para o cumprimento da proposta.

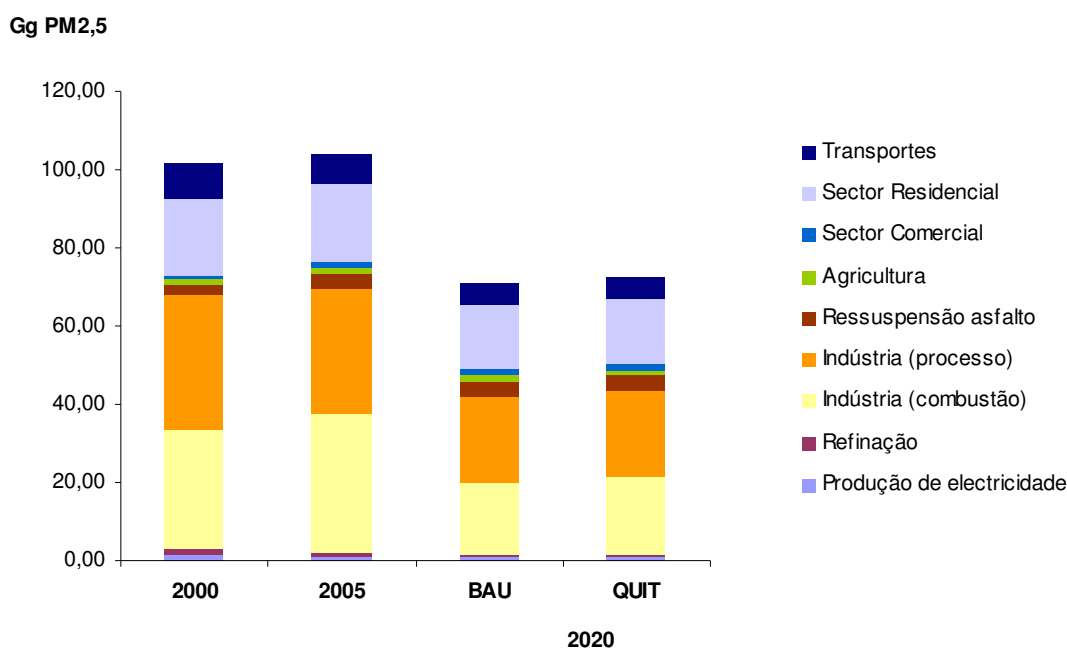


Figura 3.1 – Emissões totais e sectoriais de PM_{2,5} nos cenários BAU e QUIT, no período 2000-2020.
NOTA: para os anos 2000 e 2005 foram utilizadas as emissões reais reportadas no IIR, as emissões dos restantes anos foram obtidas por modelação

Através da análise da figura 3.1 verifica-se que a evolução sectorial em ambos os cenários é também semelhante. A redução verificada deve-se sobretudo ao sector da indústria (emissões de combustão e de processo), com um decréscimo de 65Gg no ano base para 26Gg em 2020 em ambos os cenários BAU e QUIT, correspondendo a uma redução de 60% das emissões do sector. As emissões do sector dos transportes também decrescem substancialmente neste período, 36% em ambos os cenários.

No sector da indústria o decréscimo das emissões deve-se à redução nos factores de emissão por aplicação da directiva GIC, que obriga ao cumprimento de limites de caudal de emissões e sobretudo à substituição do consumo de combustíveis por consumo de electricidade, reduzindo as emissões associadas à cogeração. O decréscimo verificado no sector dos transportes deve-se principalmente à maior eficiência dos veículos e à redução dos factores de emissão de

partículas por aplicação de filtros de partículas de acordo com as normas EURO. Deste modo a redução esperada não está relacionada com as P&M climáticas inseridas.

As políticas e medidas de mitigação de GEE mais ambiciosas com vista ao cumprimento do Protocolo de Quioto (QUIT) não têm impacto nas emissões de $PM_{2,5}$, uma vez que não existem diferenças significativas nas emissões de $PM_{2,5}$ em 2020 entre este cenário e o BAU. Analisando em detalhe, verifica-se que as emissões totais de $PM_{2,5}$ no cenário QUIT são ligeiramente superiores (2,4%) às verificadas no cenário BAU, em 2020.

Verifica-se que as diferenças de emissões entre os dois cenários em 2020 se devem sobretudo ao sector indústria (figura 3.2). O aumento observado no cenário QUIT neste sector é devido principalmente às emissões associadas ao combustível licor negro (1Gg), sendo resultado da solução de optimização encontrada pelo modelo, sem relação directa com as P&M inseridas neste cenário. No sector electroprodutor, as emissões no cenário QUIT são 47% superiores relativamente ao cenário BAU e devem-se à introdução da tecnologia de captura e sequestro de carbono (CCS) bem como ao maior consumo de biomassa no cenário QUIT (ver 3.1.3). As emissões de combustão na indústria são também superiores no cenário QUIT, Verificam-se ainda emissões ligeiramente inferiores no cenário QUIT no sector comercial e no sector dos transportes.

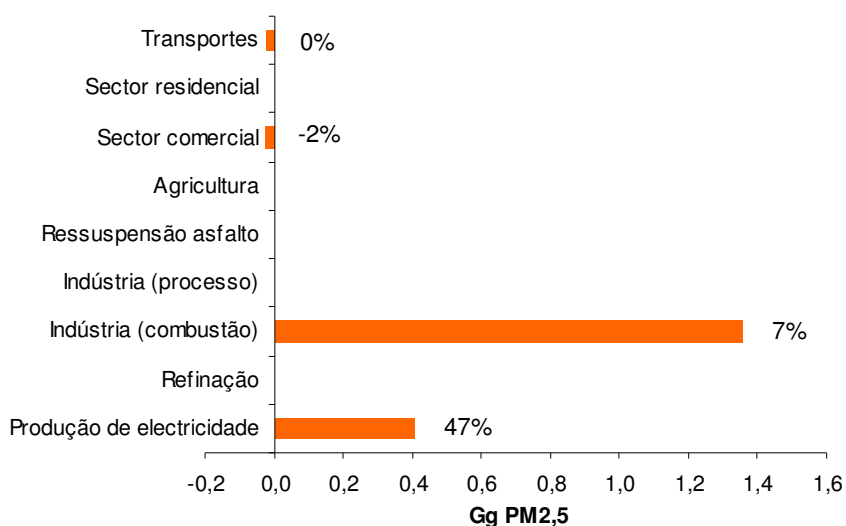


Figura 3.2 – Diferença absoluta e percentual de emissões de $PM_{2,5}$, no cenário QUIT relativamente ao cenário BAU, por sector, em 2020

É assim previsível um aumento das emissões de partículas de acordo com objectivos mais exigentes para o cumprimento do Protocolo de Quioto. Deste modo, em Portugal a implementação de medidas com vista ao cumprimento do protocolo de Quioto não tem co-benefícios relativamente à poluição do ar devida a partículas inaláveis.

3.1.2. Emissões totais e sectoriais de PM₁₀

As emissões totais e sectoriais de PM₁₀ seguem um perfil semelhante às emissões de PM_{2,5}, com tendência de decréscimo até 2020 (figura 3.3). Em 2020 as emissões de PM₁₀ decrescem 21% e 23% nos cenários BAU e QUIT respectivamente, relativamente ao ano base (2000). No ano 2020 e tal como para as PM_{2,5}, as emissões de PM₁₀ do cenário QUIT são superiores (2,6%) às do cenário BAU.

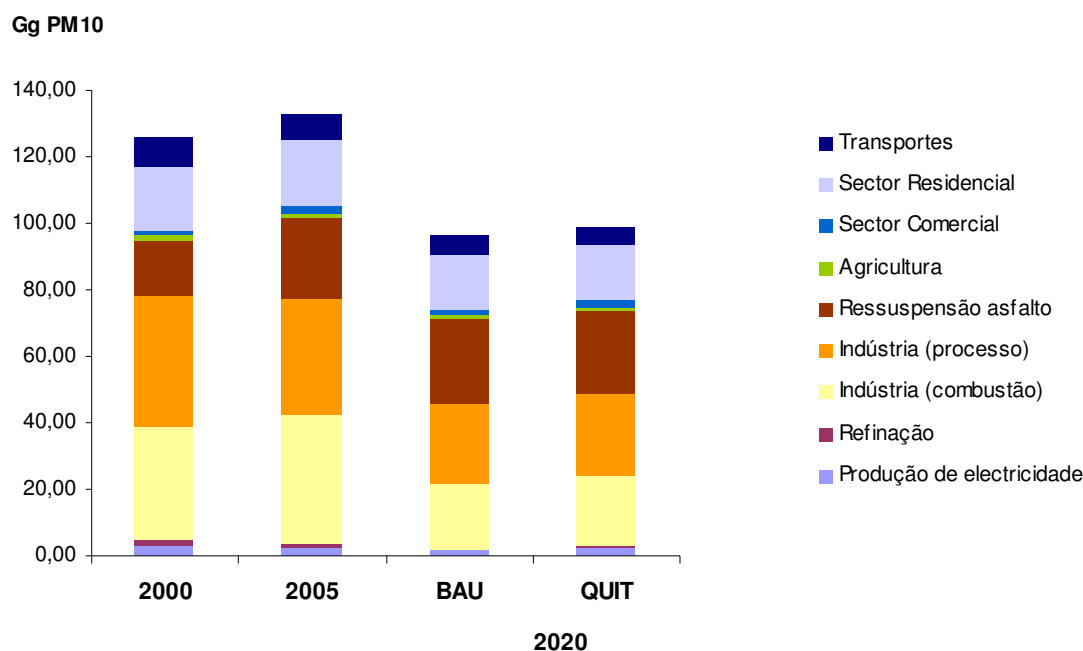


Figura 3.3 – Emissões totais e sectoriais de PM₁₀ nos cenários BAU e QUIT, no período 2000-2020.
NOTA: para os anos 2000 e 2005 foram utilizadas as emissões reais reportadas no IIR, as emissões dos restantes anos foram obtidas por modelação

Comparativamente às emissões de PM_{2,5}, a maior diferença sectorial encontra-se no processo de pavimentação de estradas com asfalto, que contribui com 4Gg para as emissões de PM_{2,5} e 25Gg para as emissões de PM₁₀. As emissões de processos industriais e da produção de electricidade são também ligeiramente superiores. Nos restantes sectores a matéria particulada é constituída quase inteiramente por PM_{2,5}, pelo que não se verificam diferenças significativas nas emissões de PM₁₀ e PM_{2,5}.

3.1.3. Consumo de energia primária

No consumo de energia primária estão incluídos os sectores da produção de electricidade, refinação e os processos de cogeração na indústria, sendo excluída desta análise a electricidade importada. O consumo de energia primária aumenta 4% no cenário BAU e 9% no

cenário QUIT no período compreendido entre 2000 e 2020. Este aumento tem subjacente um aumento na procura de serviços de energia em ambos os cenários (suportados pela mesma procura) e é superior no cenário QUIT devido à *obrigatoriedade* de aumento do parque electroprodutor nacional considerado nas políticas para este cenário.

A evolução é caracterizada em ambos os cenários por uma diminuição na utilização de combustíveis fósseis e um aumento da componente renovável (figura 3.4). A diminuição no consumo de combustíveis fósseis deve-se à redução da componente de produtos petrolíferos, aumentando o consumo de gás natural e de carvão neste período, em ambos os cenários. A *share* de renováveis no consumo de energia primária aumenta de 15% para 25% e 29% nos cenários BAU e QUIT respectivamente, no período considerado. Destaca-se a grande expansão da componente eólica, cuja produção aumenta de 0,58PJ em 2000 para 38,8PJ (BAU) e 48,5PJ (QUIT), no ano 2020. Os dados obtidos relativos ao consumo de energia primária podem ser encontrados no Anexo III.

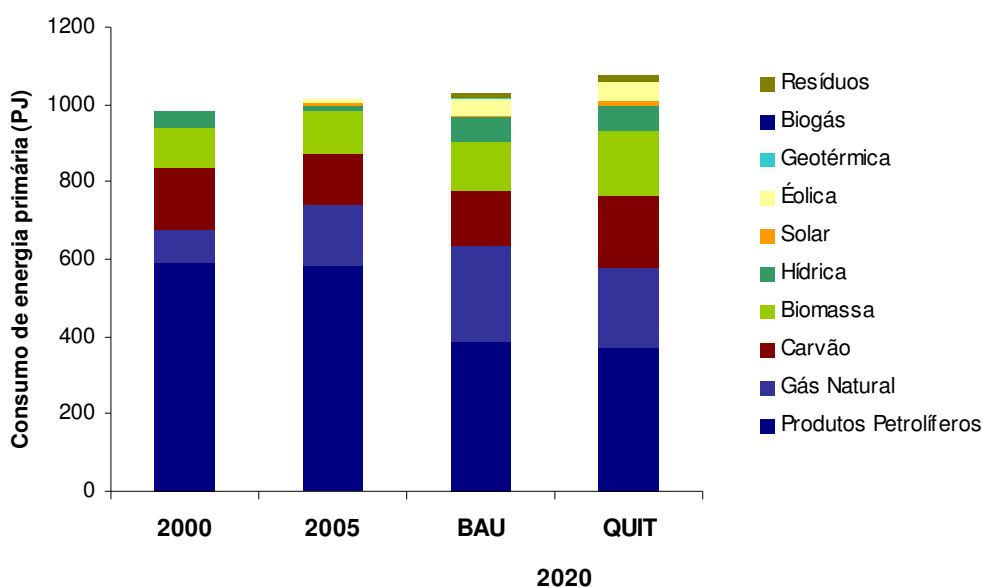


Figura 3.4 – Evolução do consumo de energia primária no período 2000-2020, para os cenários BAU e QUIT

Relativamente às diferenças entre os dois cenários, no ano 2020, evidencia-se um maior consumo de carvão no cenário QUIT, o que se justifica através da *obrigatoriedade* de instalação de uma central CCS neste cenário e também uma maior componente renovável, igualmente devida às políticas consideradas neste cenário, salientando-se a biomassa neutra em CO₂ mas com impacto na geração de partículas.

Analisando o sector electroprodutor em 2020, a capacidade instalada para geração de electricidade é superior no cenário QUIT (22%), existindo mais electricidade a ser produzida neste cenário. No cenário QUIT evidencia-se um aumento da utilização de fontes de energia renováveis para geração de electricidade (figura 3.5), que correspondem a 61% da capacidade instalada em comparação com 57% no cenário BAU. Este aumento relativamente ao BAU verifica-se em todas as componentes de energia renovável, nomeadamente, biomassa, energia eólica, hídrica, e outras renováveis (solar, geotérmica e ondas). Estes dois cenários diferem ainda no consumo de carvão, superior no Cenário QUIT.

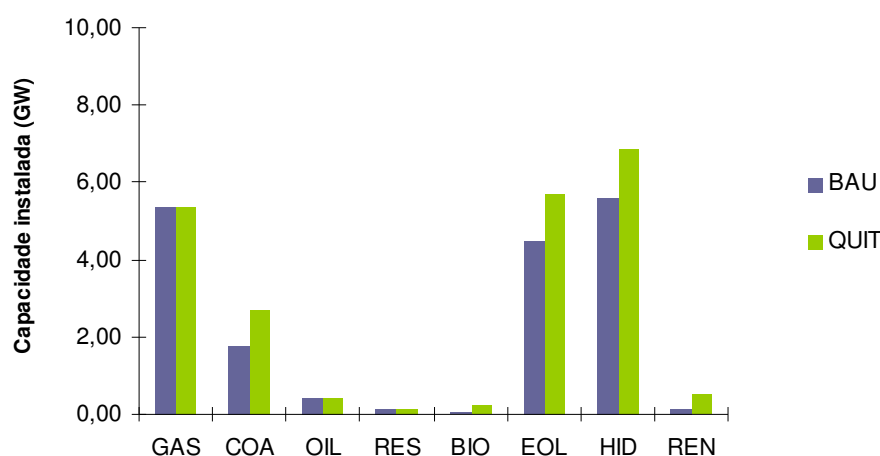


Figura 3.5 – Capacidade instalada por tipo de combustível nos cenários BAU e QUIT, em 2020. GAS – Gás; COA – Carvão; OIL – Fuelóleo; RES – Resíduos; BIO – Biomassa; EOL – Eólica; HID – Hídrica; REN – Outras Renováveis

Relativamente às tecnologias presentes neste sector em 2020, estão a funcionar no cenário QUIT todas as tecnologias presentes no cenário BAU e adicionalmente uma central a carvão com a tecnologia CCS. O parque electroprodutor existente no BAU é suficiente para satisfazer a procura, que é igual nos dois cenários. No QUIT é assim produzida mais electricidade do que a necessária, sendo parte da energia eléctrica utilizada para substituir a utilização de combustíveis fósseis noutros sectores e o excedente exportado para Espanha.

3.1.4. Consumo de energia final

A evolução do consumo de energia final no período 2000-2020 é semelhante para os cenários BAU e QUIT, aumentando 22% e 23%, nos cenários BAU e QUIT respectivamente, em 2020 relativamente a 2000 (figura 3.6). O consumo de energia final inclui os sectores da indústria, agricultura, comercial, residencial e transportes, excluindo os sectores da geração de electricidade, refinação e ainda os processos de cogeração nos sectores da indústria e agricultura. Destaca-se a redução da utilização do carvão como forma de energia final e um

aumento significativo da componente renovável em ambos os cenários, neste período. O aumento da componente renovável deve-se ao aumento do consumo de biocombustíveis e outras renováveis (energia solar e geotérmica). O consumo de produtos petrolíferos mantém-se a valores de 2000. O aumento do consumo total deve-se fundamentalmente ao aumento do consumo de gás e de energia eléctrica.

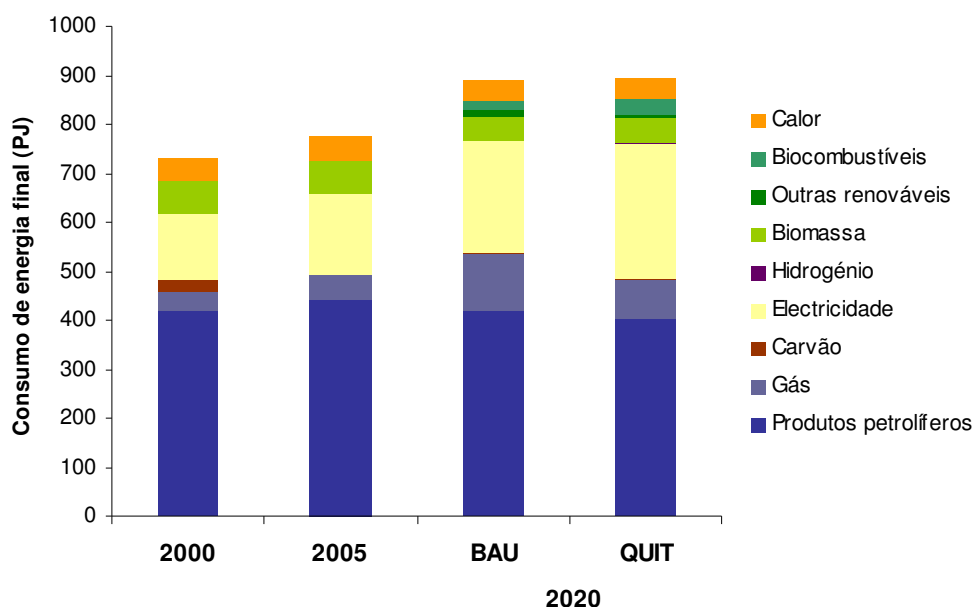


Figura 3.6 – Evolução do consumo de energia final por forma de energia no período 2000-2020, para os cenários BAU e QUIT. Os anos 2000 e 2005 têm por base os valores de consumo de energia final da DGEG

No ano 2020, o cenário QUIT apresenta um consumo ligeiramente superior ao cenário BAU (0,5%), devendo-se ao aumento da componente renovável, 16% superior no cenário QUIT relativamente ao BAU. A biomassa e outras renováveis apresentam valores semelhantes em ambos os cenários, a diferença consiste no aumento de biocombustíveis. O cenário QUIT inclui ainda consumo de hidrogénio, embora muito reduzido, associado ao sector dos transportes. Note-se ainda que no QUIT ocorre uma substituição de produtos petrolíferos e de gás por electricidade relativamente ao BAU.

Relativamente à evolução sectorial de consumos de energia final no período 2000-2020, verifica-se em ambos os cenários um aumento do consumo de energia final em todos os sectores, excepto no sector agrícola que decresce 18% (figura 3.7). Em termos percentuais, o sector comercial regista o maior aumento, 66% e 67% nos cenários BAU e QUIT respectivamente. Em termos absolutos é o sector dos transportes que mais contribui para o aumento do consumo, com um aumento de 70 PJ.

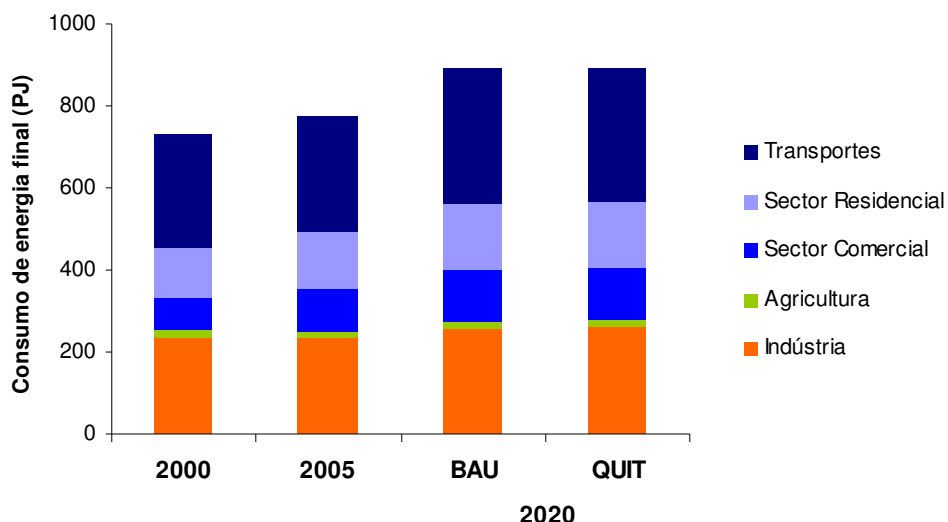


Figura 3.7 – Evolução do consumo de energia final por sector no período 2000-2020, para os cenários BAU e QUIT. Os anos 2000 e 2005 têm por base os valores de consumo de energia final da DGEG

No ano 2020, o consumo sectorial de energia final é muito semelhante nos cenários BAU e QUIT. O sector da indústria aumenta 2% no cenário QUIT relativamente ao BAU, verificando-se também ligeiros aumentos, inferiores a 1% no sector comercial e dos transportes e diminuição de 1% no sector residencial.

3.2. Cenário NEC6: tecto de emissões de partículas proposto pela Comissão Europeia

A restrição à emissão de partículas proposta pela CE, designadamente 64% de redução das emissões no período 2000-2020, tem um impacto diferenciado nos vários sectores do sistema energético. A análise comparativa dos cenários NEC6 e QUIT no ano 2020 permite identificar os esforços de redução sectoriais adicionais necessários para cumprir a restrição e a opção mais custo-eficaz de cumprimento em cada sector.

Com a aplicação da restrição proposta às emissões de partículas, o modelo apresenta uma solução, o que significa que é possível uma redução de 64% das emissões de $PM_{2,5}$ em 2020 relativamente ao ano base (2000), satisfazendo a procura de serviços de energia subjacente a este cenário e as tecnologias de remoção disponíveis na base de dados do modelo.

3.2.1. Emissões totais e sectoriais de PM_{2,5}

A aplicação de uma redução de 64% das emissões de partículas face a 2000 corresponde a um total de 36,5Gg de emissões no ano 2020. Como visto anteriormente, com as políticas e medidas actuais (QUIT) espera-se um total de emissões de PM_{2,5} de 72,6Gg no ano 2020 que corresponde a uma redução de 28% relativamente ao ano 2000. É assim necessária uma redução adicional de 50% relativamente ao cenário QUIT no ano 2020 de modo a cumprir a restrição proposta.

O cumprimento da restrição às emissões de PM_{2,5} implica uma diferente distribuição da redução pelos vários sectores do sistema energético (tabela 3.1), obtida por comparação relativamente ao ano base. Note-se, mais uma vez, que a distribuição das emissões por sector indicada corresponde à solução custo-eficaz encontrada pelo modelo para satisfazer a procura de serviços de energia em 2020.

Tabela 3.1 – Distribuição custo-eficaz da redução proposta para PM_{2,5} pelos vários sectores do sistema energético, no cenário NEC6

| Sector | Emissões de PM _{2,5} (Gg) | | Δ2020/2000 | |
|---------------------------|------------------------------------|-------|------------|-----|
| | 2000 | 2020 | (Gg) | (%) |
| Produção de electricidade | 1,49 | 1,15 | -0,34 | -23 |
| Refinação | 1,24 | 0,04 | -1,21 | -97 |
| Indústria (combustão) | 30,79 | 4,77 | -26,03 | -85 |
| Indústria (processo) | 34,21 | 10,35 | -23,86 | -70 |
| Ressuspensão asfalto | 2,66 | 3,98 | 1,32 | 50 |
| Agricultura | 1,56 | 1,22 | -0,34 | -22 |
| Sector Comercial | 1,06 | 1,66 | 0,60 | 56 |
| Sector Residencial | 19,41 | 7,64 | -11,76 | -61 |
| Transportes | 8,89 | 5,67 | -3,22 | -36 |
| TOTAL | 101,32 | 36,47 | -64,84 | -64 |

O cumprimento custo-eficaz da restrição implica esforços de redução sectoriais maiores nos sectores da refinação, indústria (emissões de combustão e de processo), residencial e transportes, sendo estes os que têm maior percentagem de variação no período 2000-2020. O maior potencial para redução das emissões está no sector da indústria, que no conjunto das emissões de combustão e de processo é responsável pela redução de 50Gg. No entanto, parte da redução verificada nestes sectores está prevista nas políticas e medidas actuais e ocorre no cenário QUIT em 2020.

O modo como se consegue o cumprimento da restrição em cada sector obtém-se por análise dos esforços de redução sectoriais adicionais em 2020 relativamente ao cenário QUIT. Os

esforços adicionais relativamente ao cenário QUIT permitem identificar quais os sectores onde a implementação de medidas que permitem a redução de emissões é mais custo eficaz. A figura 3.8 compara as emissões sectoriais nos dois cenários em 2020.

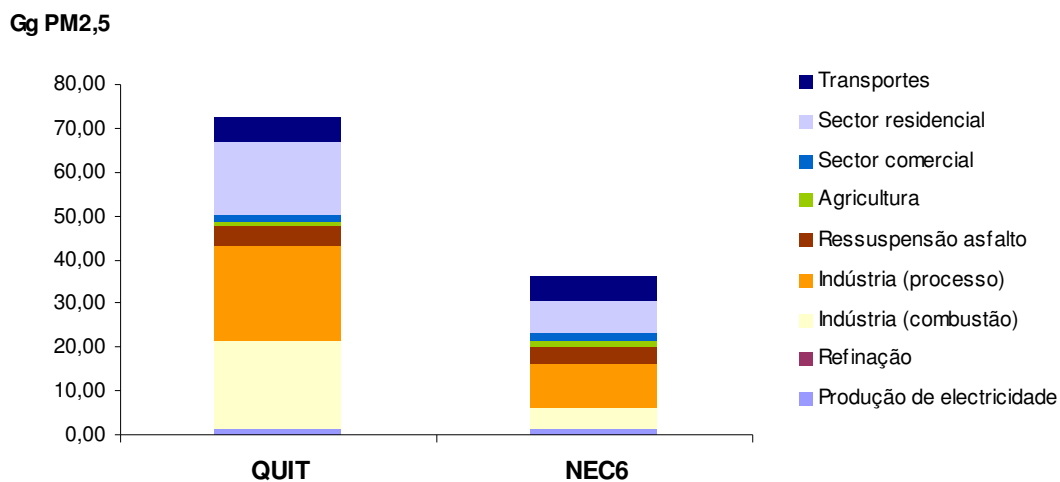


Figura 3.8 – Emissões totais e sectoriais de PM_{2,5} em 2020, nos cenários QUIT e NEC6

As maiores reduções conseguem-se nas emissões de combustão e de processo do sector da indústria e no sector residencial (figura 3.9). Também os sectores da refinação e da produção de electricidade apresentam uma redução percentual considerável relativamente ao cenário QUIT, mas que representa um baixo contributo para a redução total de emissões.



Figura 3.9 – Redução absoluta e percentual de emissões de PM_{2,5}, no cenário NEC6 relativamente ao cenário QUIT, por sector, em 2020

A redução de emissões em cada sector pode ser conseguida através de duas vias possíveis: através de um maior consumo relativo de combustíveis menos poluentes ou através da aplicação de tecnologias de remoção de partículas. Uma vez que não se verificam alterações no consumo de energia primário ou final, decorrentes da aplicação da restrição, como ilustrado a seguir, a redução de emissões consegue-se totalmente por aplicação de tecnologias de remoção de partículas em vários sectores do sistema energético.

A solução obtida pelo modelo considera a aplicação de tecnologias de remoção nos sectores da produção de electricidade, refinação, indústria e residencial (figura 3.10). As tecnologias aplicadas consistem maioritariamente em despoeiradores de elevada eficiência (HED) que correspondem às tecnologias mais eficientes existentes no mercado, com eficiência de remoção para $PM_{2,5}$ de 99%.

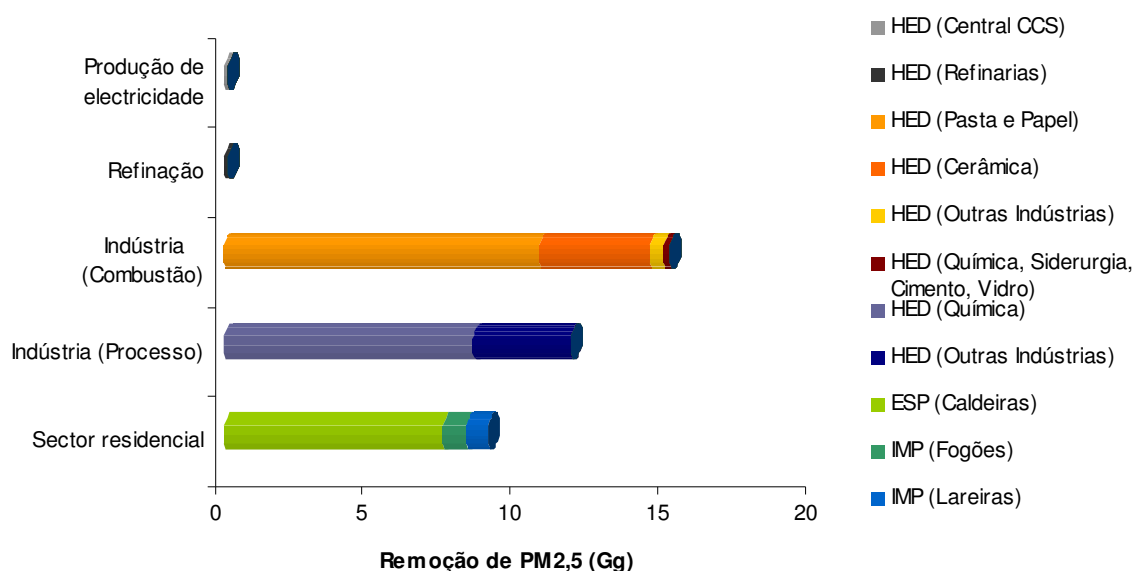


Figura 3.10 – Tecnologias de remoção aplicadas em 2020 no cenário NEC6 e contribuição percentual de cada tecnologia para a redução no sector, relativamente ao cenário de referência

No sector da indústria o modelo aplica tecnologias a todas as indústrias nas quais se verificam emissões. No sector da pasta e papel, a aplicação de um HED permite remover praticamente a totalidade de emissões neste sector, associadas maioritariamente à combustão de licor negro em cogeração. Na indústria química e da cerâmica, os HED substituem os precipitadores electrostáticos existentes. São igualmente aplicados HED às indústrias siderúrgica, de produção de cimento, vidro e outras, removendo a quase totalidade de emissões. As emissões que ainda se verificam no sector da indústria, após a aplicação de tecnologias de controlo (4,77Gg), devem-se maioritariamente à combustão de gás na indústria da cerâmica e não são passíveis de controlo uma vez que não existe opção tecnológica para remoção destas emissões.

As emissões de partículas do sector residencial estão associadas à combustão de biomassa em caldeiras, lareiras e fogões (cozinha), sendo aplicadas tecnologias para o controlo das emissões nestas três fontes. A tecnologia aplicada no sector residencial em maior extensão consiste num precipitador electrostático aplicável a caldeiras, com consumo de pellets, sendo responsável pelo controlo da totalidade das emissões de caldeiras deste sector. É também aplicada uma tecnologia melhorada para fogões de cozinha, que controla metade das emissões associadas a estes aparelhos e ainda uma tecnologia melhorada para lareiras que controla apenas 10% das emissões provenientes de lareiras. Neste sector, após a implementação de tecnologias de controlo, são ainda emitidas 7,64Gg de $PM_{2,5}$. Estas emissões são passíveis de controlo, uma vez que existem na base de dados tecnologias para o seu controlo, não utilizadas pelo modelo.

Neste sector, os precipitadores electrostáticos (ESP) correspondem à solução mais eficiente disponível para caldeiras. As tecnologias aplicadas a lareiras e a fogões, que consistem em adições construtivas que diminuem as emissões de partículas (IMP), embora não sejam as mais eficientes, tem menores custos associados do que a solução de controle alternativa (novas lareiras e fogões), que implicaria a substituição das lareiras e fogões existentes no país.

No sector da refinação é instalado um HED, controlando a totalidade de emissões neste sector, associadas à combustão do crude. No sector da produção de electricidade, a opção tecnológica mais custo-eficaz consiste na aplicação de um HED à nova central com CCS, existindo ainda emissões associadas maioritariamente às centrais a biomassa e a fuelóleo para as quais o modelo não escolhe aplicar as tecnologias de remoção disponíveis.

A solução custo-eficaz obtida considera a introdução à máxima capacidade de tecnologias nos sectores da indústria e da refinação, ou seja, são introduzidas todas as tecnologias possíveis nestes sectores, removendo todas as emissões passíveis de controlo. No sector residencial, cerca de metade das emissões de partículas não são removidas, existindo tecnologias disponíveis que não são aplicadas pelo modelo. Esta solução encontrada faz sentido em termos de custo-eficácia uma vez que o modelo escolhe aplicar de tecnologias de controlo em sectores onde a aplicação de uma só tecnologia permite a remoção de uma maior quantidade de partículas, como é o caso das grandes instalações.

3.2.2. Emissões totais e sectoriais de PM_{10}

A aplicação de uma restrição às $PM_{2,5}$ tem também como consequência a redução de PM_{10} uma vez que as fontes de emissão são comuns. No entanto, a redução percentual total e as reduções sectoriais são diferentes (figura 3.11). Uma redução de 64% das emissões de $PM_{2,5}$ induz uma redução de 50% de PM_{10} , já que a grande quantidade de PM_{10} emitidas no processo

de pavimentação das estradas com asfalto não é controlada por aplicação de tecnologias de remoção. Estas emissões não são controladas uma vez que as emissões de $PM_{2,5}$ associadas a este processo são consideravelmente menores. Com a aplicação desta restrição consegue-se uma redução adicional de 36% de PM_{10} relativamente ao cenário de QUIT, em 2020.

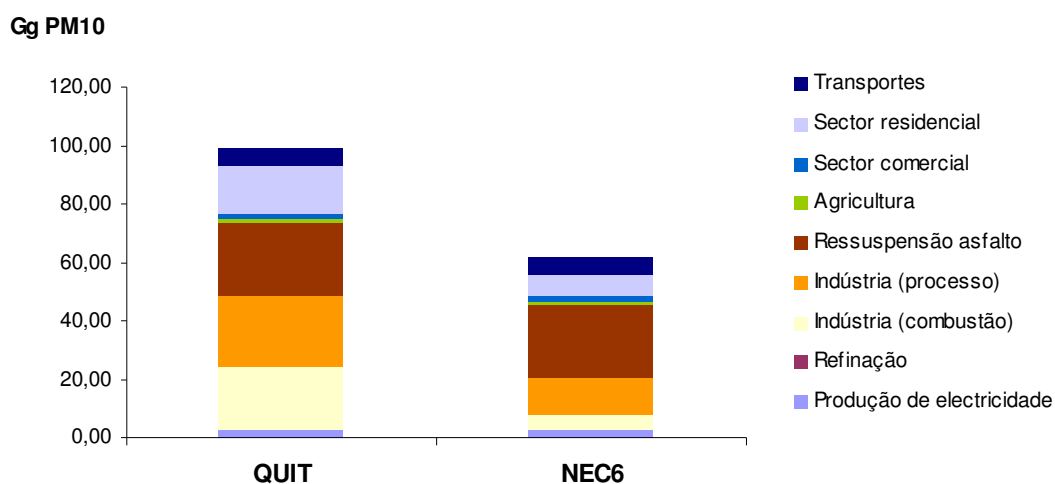


Figura 3.11 – Emissões totais e sectoriais de PM_{10} em 2020, nos cenários QUIT e NEC6

3.2.3. Consumo de energia primária

Não se verificam alterações estruturais no sistema energético para 2020 decorrentes da aplicação da restrição proposta para partículas, de acordo com a solução custo-eficaz encontrada pelo modelo. Assim, tal como o cenário QUIT, o cenário NEC6 caracteriza-se por um aumento de 9% no consumo de energia final no período 2000-2020, e por uma diminuição em termos absolutos no consumo de combustíveis fósseis e aumento da componente renovável. A diminuição no consumo de combustíveis fósseis (-9%) deve-se à componente de produtos petrolíferos, aumentando o consumo de gás natural e carvão neste período. A *share* de renováveis aumenta devido a um aumento de utilização de todas as fontes, com destaque para a grande expansão do parque eólico nacional.

O sector electroprodutor não verifica também alterações relativamente ao cenário QUIT, caracterizando-se por um aumento no parque electroprodutor nacional, devido ao aumento na produção de electricidade a partir de fontes renováveis e à instalação de uma central CCS.

3.2.4. Consumo de energia final

Tal como para o consumo de energia primária, o consumo de energia final corresponde ao analisado para o cenário QUIT. Deste modo, o cenário NEC6 caracteriza-se por um aumento

de 23% relativamente a 2000, devido sobretudo aos sectores dos transportes, residencial e comercial. Relativamente às formas de energia, o aumento deve-se à maior utilização de electricidade e gás natural. Verifica-se uma redução significativa da utilização de carvão e um aumento da componente renovável devido a um maior consumo de biocombustíveis, energia solar e geotérmica.

3.3. Cenário NEC6: impacto do tecto de partículas nas emissões de GEE

A análise comparativa do cenário NEC6 com o cenário QUIT permite identificar co-benefícios na mitigação de GEE resultantes da aplicação da restrição proposta para PM_{2,5}. Permite igualmente avaliar o impacto da revisão da Directiva Tectos, no que se refere a partículas, no cumprimento de políticas de alterações climáticas, como o pacote Energia-Clima.

Refira-se que as emissões de GEE analisadas incluem as emissões modeladas no TIMES_PT, que constituem aproximadamente 82% do total nacional de emissões em 2005 reportadas à UNFCCC (MAOTDR, 2008). As emissões modeladas incluem as emissões de CO₂, CH₄ e N₂O associadas aos sectores de produção e consumo de energia e aos processos industriais, que correspondem aos sectores já analisados para as emissões de partículas. Não estão incluídas as emissões associadas às actividades não energéticas do sector agrícola e pecuária, do sector dos resíduos e águas residuais e das actividades de produção e uso de gases fluorados.

3.3.1. Emissões totais e sectoriais de GEE

As emissões totais de GEE aumentam 3% nos cenários QUIT e NEC6, de 66741Gg de CO₂e para 68933Gg de CO₂e, no período compreendido entre 2000 e 2020. As emissões de GEE, totais e sectoriais, para ambos os cenários analisados podem ser encontradas no Anexo IV. Os sectores que mais contribuem para as emissões de GEE são os sectores da produção de electricidade (32%), transportes (28%) e indústria (26%).

A evolução sectorial é semelhante para os dois cenários analisados, verificando-se um aumento das emissões associadas aos sectores electroprodutor e da refinação, respectivamente e 15% e 6% em ambos os cenários (figura 3.12). No sector da indústria as emissões diminuem 4% nos três cenários analisados e nos restantes sectores as emissões mantêm-se aproximadamente constantes.

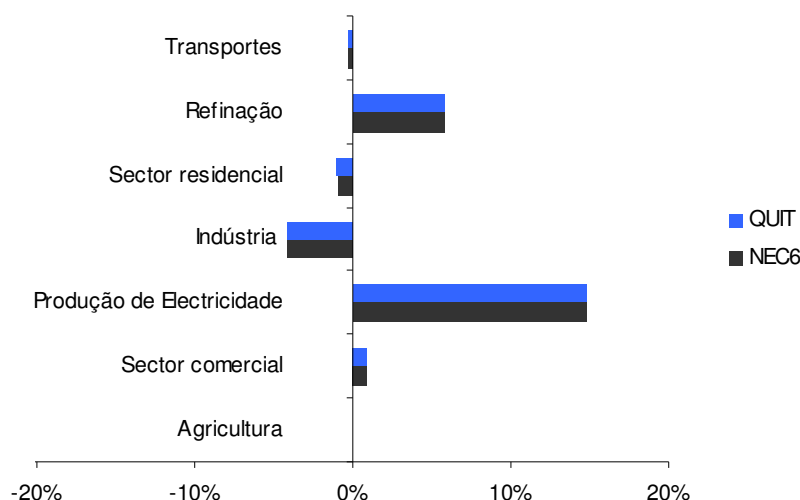


Figura 3.12 – Diferença percentual de emissões de GEE, por sector, nos cenários QUIT e NEC6, no período 2000-2020

As diferenças existentes entre os dois cenários em alguns sectores não são significativas (inferiores a 0,1%). Estes resultados são coerentes com os apresentados acima, isto é com a ausência de alterações estruturais no sistema energético com a imposição de uma restrição para partículas. Deste modo, verifica-se que a restrição proposta para PM_{2,5} não tem qualquer efeito nas emissões de GEE.

3.3.2. Análise do cumprimento do pacote Energia-Clima

A proposta da Comissão Europeia COM(2008) 20 20 by 2020: *Europe's climate change opportunity*, aprovada em Março de 2008 e conhecida como pacote Energia-Clima, apresenta um conjunto de objectivos, metas e acções propostas para a Europa, mais ambiciosos que o protocolo de Quioto, com o objectivo global de limitar o aquecimento do planeta a 2°C. Define dois objectivos principais, a saber, reduzir as emissões de GEE em pelo menos 20% e elevar para 20% a parte das energias renováveis no consumo de energia final da EU, até 2020 e propõe as seguintes metas para 2020 (MAOTDR, 2008):

- 1) alteração do actual regime de Comércio Europeu de Licenças de Emissão (CELE), passando a ser definidos tectos de emissão para os diversos sectores de actividade à escala europeia, e tendo como meta uma redução no total da UE de 21% relativamente às emissões de 2005;
- 2) 1% de aumento de emissões de GEE para Portugal, para os sectores não cobertos pelo CELE;

3) 31% da componente renovável no balanço nacional de consumo final de energia para Portugal, em 2020, incluindo 10% de biocombustíveis nos transportes.

As emissões abrangidas pelo CELE aumentam ligeiramente em 2020 (1,2% em ambos os cenários) relativamente a 2005 (Anexo IV), o ano de referência para avaliação do cumprimento desta proposta. Estão incluídas no CELE todas as emissões dos sectores da produção de electricidade, refinação e ainda parte das emissões de CO₂ do sector da indústria e 46% das emissões de CH₄ e N₂O do mesmo sector (MAOTDR, 2008). A meta de 21% de redução de emissões dentro do CELE é referente ao total da UE e, uma vez que a divisão é sectorial, não existe uma meta para Portugal mas sim para os vários sectores nacionais. No entanto, para efeitos de avaliação do cumprimento desta proposta, considera-se como meta para Portugal, 21% de redução. Deste modo, para as emissões abrangidas pelo CELE não se verifica o cumprimento da meta proposta.

Relativamente às emissões fora do CELE, verifica-se uma diminuição de 2% nos cenários QUIT e NEC6 no período 2005-2020. As emissões não cobertas pelo CELE incluem a totalidade das emissões dos sectores dos transportes, agricultura, comercial e residencial e ainda as restantes emissões de CO₂, CH₄ e N₂O do sector industrial não abrangidas pelo CELE. Assim, para estas emissões espera-se o cumprimento da meta proposta.

Relativamente à meta de renováveis, a percentagem de fontes renováveis no consumo de energia final é apenas 29% em 2020 nos cenários QUIT e NEC6 (ver figura 3.4) e a percentagem de biocombustíveis nos transportes 10% em ambos os cenários. A percentagem de renováveis no consumo de energia final inclui para além da energia renovável consumida nos sectores da indústria, agricultura, transportes e residencial (ver 3.1.4), a electricidade e o calor produzidos a partir de fontes renováveis.

Deste modo, relativamente às metas definidas para Portugal no pacote Energia-Clima, é previsível apenas o cumprimento da meta relativa às emissões fora do regime CELE. Note-se mais uma vez que apenas se consideram as emissões modeladas no TIMES_PT mas que estas correspondem a uma percentagem significativa das emissões totais.

3.4. Análise do custo da restrição proposta na revisão da directiva NEC

A solução encontrada pelo modelo é a solução mais custo-eficaz dado o limite de emissões considerado. No entanto, é necessário fazer uma análise de custos para avaliar se a solução encontrada, embora possível, é razoável. Nesta secção analisam-se os custos associados do

sistema energético, decorrentes da solução encontrada para o cumprimento da restrição proposta.

Através da definição de limites de $PM_{2,5}$ para 2020 sucessivamente mais restritivos e da obtenção dos custos marginais para cada um desses limites foi gerada uma curva de custos marginais de redução de $PM_{2,5}$. Analisando a curva obtida (figura 3.13), verifica-se que os custos marginais aumentam consideravelmente a partir de um nível de restrição de 50%. Até este ponto os custos de redução da última tonelada reduzida de partículas são inferiores a 2500€. Verifica-se um segundo aumento abrupto dos custos marginais para um nível de restrição até 65%. A partir deste nível os custos marginais são superiores a 15000€/ton. A redução de 64% das emissões tem um custo aproximado de 14000€/ton.

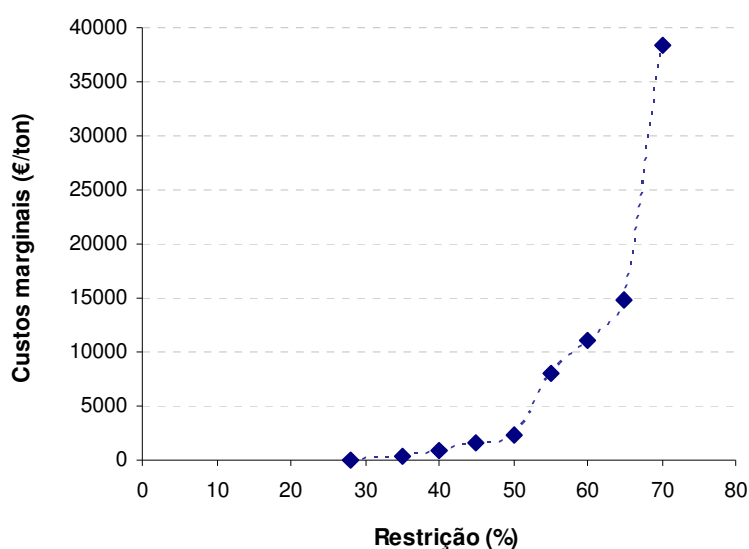


Figura 3.13 – Curva de custos marginais de redução de $PM_{2,5}$ no sistema energético nacional para diferentes valores de redução percentual face a 2000

Note-se que, até ao ponto de restrição de 28% não existem custos associados uma vez que, como já foi referido, se consegue esta redução através das políticas e medidas actuais, sem custos relativos a tecnologias de remoção de partículas. A restrição de 35% tem já um custo marginal de redução de $PM_{2,5}$ associado de 346 €/ton.

Os valores obtidos para os custos marginais de redução de $PM_{2,5}$ encontram-se dentro dos valores referidos na literatura, sendo considerados aceitáveis limites inferiores a 5000€/ton e elevados limites superiores a 10000€/ton reduzida (Karvosenoja, 2007).

Uma vez que o nível de restrição proposto se encontra na terceira secção da curva, onde é maior o aumento dos custos por unidade de redução percentual aplicada, a proposta da CE para Portugal deve ser vista com prudência. De acordo com a curva de custos marginais obtida, deveria ser considerado um limite máximo de 50% de redução.

4. CONCLUSÕES

Em sequência da proposta de revisão da Directiva Tectos de Emissão Nacionais apresentada recentemente pela Comissão Europeia, que inclui pela primeira vez tectos para as emissões de partículas finas ($PM_{2.5}$), procurou-se estudar o impacto desta política no sistema energético português e as suas interações com políticas de alterações climáticas.

O principal objectivo deste trabalho consistiu na avaliação de co-benefícios entre políticas nacionais de alterações climáticas e de qualidade do ar relativas ao poluente partículas. Uma vez que os gases com efeito de estufa e as partículas têm fontes comuns, a reestruturação do sistema energético decorrente de legislação aplicada sobre um destes poluentes implica geralmente co-benefícios no outro. Recorrendo a modelação, através do TIMES_PT, não foram identificados co-benefícios entre políticas de alterações climáticas implementadas em Portugal e políticas de qualidade do ar, nomeadamente a proposta da CE para emissões de partículas.

É expectável uma redução de 28% nas emissões de partículas no período entre 2000 e 2020, sobretudo devida aos sectores da indústria e transportes, com reduções de 60% e 36% respectivamente. No entanto esta redução não está relacionada com as medidas decorrentes de políticas de mitigação de GEE mas com políticas de redução de emissões de partículas em cada sector.

Verifica-se que metas mais exigentes para o cumprimento do protocolo de Quioto, consubstanciadas no cenário QUIT, conduzem a um ligeiro aumento (2,4%) das emissões de partículas relativamente a metas menos exigentes. Este aumento deve-se ao sector electroprodutor e da indústria e apresenta coerência com as políticas adicionais introduzidas neste cenário. Estas incluem o aumento do parque electroprodutor com a implementação de uma central com captura e sequestro de carbono e a um aumento de fontes renováveis para produção de electricidade, incluindo o combustível biomassa, o qual tem associadas elevadas emissões de partículas. Verifica-se assim um efeito antagónico destas políticas climáticas de mitigação de GEE nas emissões de partículas.

Relativamente ao impacto da nova proposta de Directiva Tectos nas emissões de gases com efeito de estufa, não são esperados co-benefícios. Para cumprir a restrição não se verificam alterações no sistema energético, sendo apenas implementadas tecnologias de fim-de-linha como solução para a redução exigida das emissões. Esta é a solução mais custo-eficaz encontrada pelo modelo para cumprir a restrição proposta. Uma vez que não se verificam alterações significativas nas emissões de gases com efeito de estufa, não se verificam igualmente alterações no cumprimento do pacote Energia-Clima.

Em Portugal, a solução custo-eficaz para cumprir a restrição para $PM_{2.5}$ proposta pela CE implica a aplicação de tecnologias de fim-de-linha nos sectores da produção da electricidade, refinação, indústria, para as emissões de combustão e de processo e ainda no sector residencial. As tecnologias são aplicadas à capacidade máxima, removendo todas as emissões passíveis de controlo em todos os sectores, excepto no residencial. Neste sector existem tecnologias disponíveis na base de dados para o controlo de emissões que não são aplicadas pelo modelo. O facto do modelo apenas aplicar tecnologias de fim-de-linha significa que, de modo a cumprir a restrição proposta, é mais vantajoso em termos de custos a instalação de tecnologias de remoção de partículas nos vários sectores do sistema energético comparativamente à substituição de combustíveis.

Embora seja possível o cumprimento da restrição proposta para Portugal, os custos associados são muito elevados, pelo que seria mais razoável a aplicação de um tecto menos exigente. Os custos marginais de remoção de partículas encontram-se na parte da curva de custos marginais onde é maior o aumento de custos por unidade adicional de redução. De acordo com a curva obtida, o limite máximo a aplicar deveria ser 50%, uma vez que este é o limite para o qual não existem aumentos significativos por unidade adicional de redução. Até este nível conseguem-se custos marginais inferiores a 2500€/ton enquanto que o nível de 64% de redução corresponde a um custo de aproximadamente 14000€/ton.

Note-se que é possível que os resultados obtidos para o nível óptimo de restrição através do modelo TIMES_PT sejam mais realistas do que os obtidos pela Comissão Europeia. A restrição proposta na revisão da Directiva Tectos foi calculada com recurso ao modelo GAINS, com base em valores de emissões de 2000 que não estão de acordo com os dados nacionais, reportados no IIR (APA, 2008). O modelo TIMES_PT é um modelo validado para o sistema nacional, com fontes nacionais. Ou seja, o modelo TIMES_PT, embora seja utilizado para modelação do sistema energético e não de emissões, ao contrário do GAINS, é uma ferramenta mais específica para o sistema nacional, pelo que os resultados obtidos devem ser considerados para apoiar o cálculo desta restrição.

Por outro lado, note-se que a solução custo-eficaz obtida pelo TIMES_PT tem uma margem de incerteza devido aos vários pressupostos admitidos na modelação. Admite-se, por exemplo, que os factores de emissão de 2005 apurados para os vários sectores com base nas emissões nacionais de 2005 se mantêm no futuro. Outra variável que poderá ser ajustada é a percentagem de penetração das tecnologias de remoção de poluentes, com base nas quais foram calculadas as eficiências adicionais das novas tecnologias de controlo consideradas na base de dados do TIMES_PT. Estas eficiências poderão ser mais elevadas do que as inseridas, caso a percentagem de penetração das tecnologias existentes seja menor do que a assumida.

De modo a garantir uma maior aproximação dos dados introduzidos à realidade, a informação introduzida com base no GAINS poderá ser validada para o sistema nacional. Assim, sugere-se que sejam consultados os stakeholders nos sectores da produção de electricidade, refinação, e indústria de modo a obter informação sobre a percentagem de penetração em 2005 de cada tecnologia de remoção, bem como as eficiências e custos destas tecnologias. Embora os resultados obtidos constituam uma boa aproximação à realidade, sugere-se como trabalho futuro proceder a esta validação.

REFERÊNCIAS

Amann, M., Raes, F., Swart, R., Tuinstra, W. (2004). A good climate for clean air: Linkages between climate change and air pollution. *Climatic Change*, vol. 66 (3), pp. 263-269

APA (2008a). Relatório do Estado do Ambiente 2007. Agência Portuguesa do Ambiente, Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, Amadora. Disponível em: [www.apambiente.pt]

APA (2008b). Portuguese Informative Inventory Report on Air Pollutant Emissions, 1990-2006 Submitted under the UNECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution. Agência Portuguesa do Ambiente, Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, Amadora. Disponível em: [www.apambiente.pt]

Becker, S., Soukup, J. M., Sioutas, C., Cassee, F. R. (2003). Response of human alveolar macrophages to ultrafine, fine, and coarse urban air pollution particles. *Experimental lung research*, vol 29, pp. 29–44

Brunekreef & Forsberg (2005). Epidemiological evidence of effects of coarse airborne particles on health. Review article. *European Respiratory Journal*, vol 26, pp. 309-318

Brunekreef, B., Beelen, R., Hoek, G., Schouten, L., Bausch-Goldbohm, S., Fischer, P., Armstrong, B., Hughes, E., Jerrett, M., van den Brandt, P. (2009). Effects of long-term exposure to traffic-related air pollution on respiratory and cardiovascular mortality in the Netherlands: the NLCS-AIR study. *Research Report Health Effects Institute*, vol. 139, pp. 5-71

Cleto, J., Simões, S., (2007). Cenários para o sistema energético Português para 2030 e suas implicações ambientais: TIMES_PT – Implementação do modelo TIMES para Portugal. 9ª Conferência Nacional do Ambiente. 18-20 Abril de 2007. Universidade de Aveiro. Aveiro, Portugal

Dockery, D. W., Pope, C. A. and Xu, X. (1993). An association between air pollution and mortality in six US cities. *New England Journal for Medicine*, vol 329, pp. 1753-1759

EC (2005). Thematic Strategy on Air Pollution. Communication from the Commission to the Council and the European Parliament. COM (2005) 446 final. Commission of the European Communities, Brussels. Disponível em: [http://eur-lex.europa.eu]

EC (2008). Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2001/81/EC as regards interim objectives and national emission ceilings for certain atmospheric pollutants for 2020 and amending Directive 2003/35/EC as regards national programmes. Commission of the European Communities. Brussels

EEA (2004a). Air pollution and climate change policies in Europe: exploring linkages and the added value of an integrated approach. European Environment Agency, Copenhagen. Disponível em: [www.eea.europa.eu]

EEA (2004b). Air Pollution in Europe 1990-2004. European Environment Agency, Copenhagen. Disponível em: [www.eea.europa.eu]

EEA (2006). Air Quality and Ancillary Benefits of Climate Change Policies. European Environment Agency, Copenhagen. Disponível em: [www.eea.europa.eu]

EEA (2008a). CSI 004: Exceedance of air quality limit values in urban areas (version 2). European Environment Agency, Copenhagen. Disponível em: [http://themes.eea.europa.eu/IMS/CSI]

EEA (2008b). CSI 003: Emissions of primary particles and secondary particulate matter precursors. European Environment Agency, Copenhagen. Disponível em: [http://themes.eea.europa.eu/IMS/CSI]

EEA (2008c). Annual European Community LRTAP Convention Emission Inventory Report 1990-2006. European Environment Agency, Copenhagen. Disponível em: [www.eea.europa.eu]

EEA (2009a). EEA Signals 2009 – Key Environmental Issues Facing Europe. European Environment Agency, Copenhagen. Disponível em: [www.eea.europa.eu]

EEA (2009b). Quality of life in cities. European Environment Agency, Copenhagen. Disponível em: [www.eea.europa.eu]

EU (2004). Second position paper on particulate matter. CAFE Working Group on Particulate Matter. Disponível em: [http://ec.europa.eu]

Hoek, G., Brunekreef, B., Goldbohm, S., Fischer, P., van den Brandt, P.A. (2002). Association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in the Netherlands: a cohort study. *The Lancet*, Vol. 360, Issue 9341, pp. 1203-1209

IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press. Cambridge and New York. pp.996. Disponível em: [www.ipcc.ch/]

Karvosenoja, N., Klimont, Z., Tohka, A., Johansson, M. (2007). Cost-effective reduction of fine primary particulate matter emissions in Finland. *Environmental Research Letters*, vol 2, Issue 4, 044002

Kovats, R. S., Menne, B., McMichael, A. J., Bertollini, R., Soskolne, C. (1999). Early human effects of climate change and stratospheric ozone depletion in Europe. WHO background document to Third Ministerial Conference on Environment and Health, 16–19 June, London

Krewski, D., Burnett, R. T., Goldberg, M. S. and et al. (2000). Re-analysis of the Harvard sixcities study and the American cancer society study of air pollution and mortality. Health Effects Institute, Cambridge, MA., U.S.A

Laden, F., Neas, L., Dockery, D., Schwartz, J. (2000). Association of fine particulate matter from different sources with daily mortality in six U.S. cities. *Environmental health perspectives*, vol. 108, pp. 941–947

Loulou, R., Remme, U., Kanudia, A., Lehtila, A. and Goldstein, G., 2005. *Documentation for the TIMES model - PART I.* Energy Technology Systems Analysis Programme. Disponível em: [www.etsap.org/tools.htm]

MAOTDR (2008). *PortugalClima2020 – Avaliação do impacto da Proposta Energia-Clima da CE para Portugal*, MAOTDR – Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, Agosto 2008. Disponível em: [www.maotdr.gov.pt]

Myhre, G. (2009). Consistency Between Satellite-Derived and Modeled Estimates of the Direct Aerosol Effect. *Science*, vol 325 Issue 5937, pp.187-190

Nemmar, A., Hoet, P., Vanquickenborne, B., Dinsdale, D., Thomeer, M., Hoylaerts, M., Vanbilloen, H., Mortelmans, L., Nemery, B. (2002). Passage of inhaled particles into the blood circulation in humans. *Circulation*, vol. 105, pp. 411–414

Pope, C. A., Burnett, R., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K. and Thurston, G. D. (2002) Lung cancer, cardiopulmonary mortality and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Journal of the American Medical Association*, vol. 287 (9), pp. 1132- 1141

Quaas, J., Boucher, O., Bellouin, N., Kinne, S. (2008). Satellite-based estimate of the direct and indirect aerosol climate forcing. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, vol. 113 Issue D5, Article Number D05204

Seixas, J., Simões, S., Cleto, J. (2007). A eficiência energética na descarbonização da economia. 11^a Conferência COGEN Portugal – Eficiência Energética e Cogeração. 5 de Dezembro de 2007. Porto, Portugal

Simões, S., Cleto, J., Fortes, P., Seixas, J., Huppel, G. (2008). Cost of energy and environmental policy in Portuguese CO₂ abatement - scenario analysis to 2020. *Energy Policy*, vol. 36, Issue 9, pp. 3598-3611

Tagaris, E., Manomaiphiboon, K., Liao, K. J., Leung, L. R., Woo, J. H., He S., Amar, P., Russell, A.G. (2009). Impacts of global climate change and emissions on regional ozone and fine particulate matter concentrations over the United States. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, vol 112, Issue D14, article number D14312

Wagner, F., Schöpp, W. (2007). Comparison of the RAINS emission control cost curves for air pollutants with emission control costs computed by the GAINS model. International Institute for Applied Systems Analysis, Austria. Disponível em: [www.iiasa.ac.at/rains/reports.html]

WHO (2003). Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide. Report on a WHO working group Bonn, Germany 13–15 January 2003. World Health Organization, Europe. Disponível em: [www.euro.who.int]

WHO (2004a). Health Aspects of Air Pollution. Results from the WHO project “Systematic Review of Health Aspects of Air Pollution in Europe”. World Health Organization, Europe

WHO (2004b). Health Aspects of Air Pollution – answers to follow-up questions from CAFE. Report on a WHO working group meeting Bonn, Germany, 15–16 January 2004. World Health Organization, Europe. Disponível em: [www.euro.who.int]

WHO (2005). WHO air quality guidelines global update 2005. Report on a working group meeting Bonn, Germany, 18-20 October 2005. World Health Organization, Europe. Disponível em: [www.euro.who.int]

Wyzga, E. R. (2002). Air pollution and health; are particulates the answer? Proceedings of the NETL Conference ‘PM_{2.5} and electric power generation: Recent findings and implications’, Pittsburgh, PA, 9–10 April

Anexo I

Tecnologias de remoção de partículas inseridas no TIMES_PT

Anexo I tabela 1 – Tecnologias de remoção de PM_{2,5} e PM₁₀ inseridas no TIMES_PT

| Sector | Subsector (Ind./ Equipamento (Res.)) | Combustível | Tecnologia (GAINS) | Nomenclatura TIMES_PT | Eficiência de remoção (%) | | Custo (M€/Gg removida) | | Tempo de vida (anos) |
|------------------------------|---|-------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|------------------|------------------------|------------------|-------------------------|
| | | | | | PM _{2,5} | PM ₁₀ | PM _{2,5} | PM ₁₀ | |
| Produção de electricidade | | Fuelóleo | HED | ELCOILHED | 99 | 99,265 | 6,919 | 4,871 | 30 |
| | | Biomassa | HED | ELCWOOHED | 99 | 99,727 | 7,822 | 1,493 | 30 |
| | | Carvão | ESP1 | ELCCOHESP1 | 93 | 94,478 | 0,652 | 0,167 | 30 |
| | | Carvão | ESP2 | ELCCOHESP2 | 96 | 98,217 | 0,701 | 0,179 | 30 |
| | | Carvão | HED | ELCCOHHED | 99 | 99,665 | 0,740 | 0,192 | 30 |
| Refinação | | Crude | HED | SUPOILHED | 99 | 99,265 | 9,742 | 6,859 | 20 |
| Indústria (combustão) | Química | Biomassa | ESP2 | INDBIOESP21 | 96 | 98,423 | 11,039 | 2,071 | 20 |
| | Química | Biomassa | HED | INDBIOHED1 | 99 | 99,727 | 12,336 | 2,355 | 20 |
| | Minerais não metálicos | Biomassa | ESP2 | INDBIOESP22 | 96 | 98,423 | 11,039 | 2,071 | 20 |
| | Minerais não metálicos | Biomassa | HED | INDBIOHED2 | 99 | 99,727 | 12,336 | 2,355 | 20 |
| | Outras indústrias | Biomassa | ESP3 | INDBIOESP23 | 96 | 98,423 | 11,039 | 2,071 | 20 |
| | Outras indústrias | Biomassa | HED | INDBIOHED3 | 99 | 99,727 | 12,336 | 2,355 | 20 |
| | Pasta e Papel | Fuelóleo | HED | INDHFOHED1 | 99 | 99,265 | 10,976 | 7,727 | 20 |
| | Química | Fuelóleo | HED | INDHFOHED2 | 99 | 99,265 | 10,976 | 7,727 | 20 |
| | Siderurgia | Fuelóleo | HED | INDHFOHED3 | 99 | 99,265 | 10,976 | 7,727 | 20 |
| | Cimento | Fuelóleo | HED | INDHFOHED4 | 99 | 99,265 | 10,976 | 7,727 | 20 |
| | Vidro | Fuelóleo | HED | INDHFOHED5 | 99 | 99,265 | 10,976 | 7,727 | 20 |
| | Outras Indústrias | Fuelóleo | HED | INDHFOHED6 | 99 | 99,265 | 10,976 | 7,727 | 20 |
| | Pasta e papel CG* | Licor negro | CYC | INDCGBLQCYC | 30 | 43,333 | 2,696 | 1,244 | 20 |
| | Pasta e papel CG | Licor negro | ESP1 | INDCGBLQESP1 | 93 | 93,667 | 1,987 | 1,315 | 20 |
| | Pasta e papel CG | Licor negro | ESP2 | INDCGBLQESP2 | 96 | 97 | 2,383 | 1,573 | 20 |
| | Pasta e papel CG | Licor negro | HED | INDCGBLQHED | 99 | 99,3 | 2,674 | 1,777 | 20 |
| | Pasta e papel CG | Biomassa | CYC | INDCGBIOCYC1 | 30 | 35,393 | 1,256 | 0,921 | 20 |
| | Pasta e papel CG | Biomassa | ESP1 | INDCGBIOESP11 | 93 | 93,27 | 0,928 | 0,800 | 20 |
| | Pasta e papel CG | Biomassa | ESP2 | INDCGBIOESP21 | 96 | 96,404 | 1,111 | 0,957 | 20 |
| | Pasta e papel CG | Biomassa | HED | INDCGBIOHED1 | 99 | 99,121 | 1,245 | 1,076 | 20 |
| Outras indústrias CG | Biomassa | CYC | INDCGBIOCYC2 | 30 | 35,393 | 1,256 | 0,921 | 20 | |

| Sector | Subsector (Ind.)/ Equipamento (Res.) | Combustível | Tecnologia (GAINS) | Nomenclatura TIMES_PT | Eficiência de remoção (%) | | Custo (M€/Gg removida) | | Tempo de vida (anos) |
|--------------------------|---|-------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|------------------|------------------------|------------------|-------------------------|
| | | | | | PM _{2,5} | PM ₁₀ | PM _{2,5} | PM ₁₀ | |
| Indústria (combustão) | Outras indústrias CG | Biomassa | ESP1 | INDCGBIOESP12 | 93 | 93,27 | 0,928 | 0,800 | 20 |
| | Outras indústrias CG | Biomassa | ESP2 | INDCGBIOESP22 | 96 | 96,404 | 1,111 | 0,957 | 20 |
| | Outras indústrias CG | Biomassa | HED | INDCGBIOHED2 | 99 | 99,121 | 1,245 | 1,076 | 20 |
| | Pasta e Papel CG | Fuelóleo | HED | INDCGHFOHED1 | 99 | 99,265 | 19,591 | 13,792 | 20 |
| | Química CG | Fuelóleo | HED | INDCGHFOHED2 | 99 | 99,265 | 19,591 | 13,792 | 20 |
| | Minerais não metálicos CG | Fuelóleo | HED | INDCGHFOHED3 | 99 | 99,265 | 19,591 | 13,792 | 20 |
| | Vidro CG | Fuelóleo | HED | INDCGHFOHED4 | 99 | 99,265 | 19,591 | 13,792 | 20 |
| | Outras indústrias CG | Fuelóleo | HED | INDCGHFOHED5 | 99 | 99,265 | 19,591 | 13,792 | 20 |
| Indústria (processo) | Siderurgia | | CYC | PRIISCYC | 30 | 40,345 | 0,086 | 0,060 | 20 |
| | Siderurgia | | HED | PRIISHED | 99 | 99,233 | 0,054 | 0,051 | 20 |
| | Química | | ESP1 | PRICHESP1 | 93 | 94,199 | 0,320 | 0,308 | 20 |
| | Química | | ESP2 | PRICHESP2 | 96 | 97,798 | 0,360 | 0,345 | 20 |
| | Química | | HED | PRICHHED | 99 | 99,540 | 0,391 | 0,379 | 20 |
| | Outras indústrias | | ESP1 | PRIOIESP1 | 93 | 94,199 | 0,320 | 0,272 | 20 |
| | Outras indústrias | | ESP2 | PRIOIESP2 | 96 | 97,798 | 0,360 | 0,305 | 20 |
| | Outras indústrias | | HED | PRIOIHED | 99 | 99,540 | 0,391 | 0,335 | 20 |
| Ressuspensão asfalto | | | SPRAY | PRIROSPRAY | 10 | 18,947 | 726 | 60,651 | 20 |
| Sector residencial | Caldeiras | Biomassa | IMP | RSDBIOBIMP | 60 | 60 | 7,959 | 7,710 | 15 |
| | Caldeiras | Biomassa | NEW | RSDBIOBNEW | 80 | 79,688 | 9,730 | 9,463 | 15 |
| | Caldeiras | Biomassa | PELL | RSDBIOBPELL | 90 | 90,026 | 10,877 | 10,535 | 15 |
| | Caldeiras | Biomassa | PLESP | RSDBIOBPLESP | 99 | 99,028 | 11,359 | 11,001 | 15 |
| | Fogões (cozinha) | Biomassa | IMP | RSDBIOSTIMP | 63 | 63 | 5,737 | 5,558 | 15 |
| | Fogões (cozinha) | Biomassa | NEW | RSDBIOSTNEW | 80 | 80 | 34,799 | 33,712 | 15 |
| | Lareiras | Biomassa | IMP | RSDBIOFPIMP | 44 | 44 | 9,673 | 9,370 | 25 |
| | Lareiras | Biomassa | NEW | RSDBIOFPNEW | 70 | 70 | 46,096 | 44,655 | 25 |

*CG – Cogeração. Nota: As eficiências de remoção apresentadas são as indicadas no GAINS. Na maioria dos casos estas não correspondem às eficiências de remoção inseridas, ligeiramente inferiores, obtidas após cálculos que consideram a eficiência de remoção presente no ano 2005, como exemplificado em 2.3.2.

Anexo II

Emissões de $PM_{2,5}$ e PM_{10} nos cenários BAU, QUIT e NEC6

Anexo II tabela1 – Emissões totais e sectoriais de PM_{2,5} (Gg) nos cenários BAU, QUIT e NEC6 no período 2000-2020

| Sector | 2000 | 2005 | 2010 | | | 2015 | | | 2020 | | |
|---------------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | | | BAU | QUIT | NEC6 | BAU | QUIT | NEC6 | BAU | QUIT | NEC6 |
| Produção de electricidade | 1.49 | 1.38 | 0.85 | 0.87 | 0.87 | 0.88 | 0.97 | 0.97 | 0.87 | 1.27 | 1.15 |
| Refinação | 1.24 | 0.71 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.04 |
| Indústria (combustão) | 30.79 | 35.71 | 29.45 | 29.45 | 29.45 | 23.75 | 23.70 | 23.70 | 18.63 | 19.99 | 4.77 |
| Indústria (processo) | 34.21 | 32.18 | 17.74 | 17.74 | 17.74 | 19.85 | 19.85 | 19.85 | 22.08 | 22.08 | 10.35 |
| Ressuspensão asfalto | 2.66 | 3.91 | 3.86 | 3.86 | 3.86 | 3.89 | 3.89 | 3.89 | 3.98 | 3.98 | 3.98 |
| Agricultura | 1.56 | 1.15 | 1.21 | 1.21 | 1.21 | 1.18 | 1.18 | 1.18 | 1.22 | 1.22 | 1.22 |
| Sector comercial | 1.06 | 1.78 | 1.66 | 1.66 | 1.66 | 1.66 | 1.65 | 1.65 | 1.69 | 1.66 | 1.66 |
| Sector residencial | 19.41 | 20.05 | 18.24 | 18.24 | 18.24 | 22.37 | 22.37 | 22.37 | 16.56 | 16.56 | 7.64 |
| Transportes | 8.89 | 7.60 | 6.61 | 6.58 | 6.58 | 5.46 | 5.44 | 5.44 | 5.69 | 5.67 | 5.67 |
| TOTAL | 101,32 | 104,45 | 79,73 | 79,71 | 79,71 | 79,17 | 79,18 | 78,18 | 70,85 | 72,57 | 36,47 |

Anexo II tabela 2 – Emissões totais e sectoriais de PM₁₀ (Gg) nos cenários BAU, QUIT e NEC6 no período 2000-2020

| Sector | 2000 | 2005 | 2010 | | | 2015 | | | 2020 | | |
|---------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| | | | BAU | QUIT | NEC6 | BAU | QUIT | NEC6 | BAU | QUIT | NEC6 |
| Produção de electricidade | 2.71 | 2.52 | 1.78 | 1.79 | 1.79 | 1.80 | 1.90 | 1.90 | 1.78 | 2.62 | 2.33 |
| Refinação | 1.88 | 1.07 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.19 | 0.19 | 0.19 | 0.19 | 0.19 | 0.04 |
| Indústria (combustão) | 33.97 | 39.03 | 31.74 | 31.74 | 31.74 | 25.42 | 25.37 | 25.37 | 19.79 | 21.51 | 5.45 |
| Indústria (processo) | 39.49 | 34.56 | 19.53 | 19.53 | 19.53 | 21.81 | 21.81 | 21.81 | 24.26 | 24.26 | 12,35 |
| Ressuspensão asfalto | 16.82 | 24.70 | 24.40 | 24.40 | 24.40 | 24.56 | 24.56 | 24.56 | 25.16 | 25.16 | 25.16 |
| Agricultura | 1.58 | 1.17 | 1.21 | 1.21 | 1.21 | 1.18 | 1.18 | 1.18 | 1.22 | 1.22 | 1.22 |
| Sector comercial | 1.21 | 2.00 | 1.86 | 1.87 | 1.87 | 1.87 | 1.85 | 1.85 | 1.89 | 1.86 | 1.86 |
| Sector residencial | 19.41 | 20.05 | 18.24 | 18.24 | 18.24 | 22.37 | 22.37 | 22.37 | 16.56 | 16.56 | 7.64 |
| Transportes | 8.89 | 7.60 | 6.61 | 6.58 | 6.58 | 5.46 | 5.44 | 5.44 | 5.69 | 5.67 | 5.67 |
| TOTAL | 125,97 | 132,68 | 105,51 | 105,49 | 105,49 | 104,65 | 104,67 | 104,67 | 96,55 | 99,06 | 61,73 |

Anexo III

Consumo de energia primária e final nos cenários BAU, QUIT e
NEC6

Anexo III tabela 1 – Consumo de energia primária (PJ) nos cenários BAU, QUIT e NEC6, no período 2000-2020

| Forma de energia | 2000 | 2005 | 2010 | | | 2015 | | | 2020 | | |
|-----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | BAU | QUIT | NEC6 | BAU | QUIT | NEC6 | BAU | QUIT | NEC6 |
| Produtos Petrolíferos | 646,42 | 657,91 | 488,55 | 474,64 | 474,64 | 405,06 | 391,94 | 391,93 | 388,14 | 373,67 | 373,41 |
| Gás Natural | 89,39 | 157,47 | 139,32 | 145,30 | 145,30 | 192,81 | 190,11 | 190,11 | 246,82 | 204,35 | 204,59 |
| Carvão | 159,65 | 140,21 | 134,80 | 134,80 | 134,80 | 135,96 | 133,45 | 133,45 | 138,34 | 187,65 | 187,65 |
| Biomassa | 105,66 | 111,23 | 168,28 | 180,90 | 180,90 | 162,00 | 186,43 | 186,43 | 133,88 | 164,92 | 164,92 |
| Hídrica | 41,26 | 18,43 | 48,48 | 48,48 | 48,48 | 58,06 | 59,02 | 59,05 | 58,07 | 70,11 | 70,10 |
| Solar | 0,75 | 0,93 | 1,21 | 1,18 | 1,18 | 2,55 | 2,97 | 2,97 | 8,65 | 9,12 | 9,12 |
| Eólica | 0,60 | 6,38 | 38,88 | 38,88 | 38,88 | 38,88 | 43,85 | 43,85 | 38,88 | 48,53 | 48,53 |
| Geotérmica | 0,38 | 1,20 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 4,00 | 4,00 | 4,00 |
| Biogás | 0,06 | 0,45 | 0,48 | 0,08 | 0,08 | 0,00 | 1,51 | 1,51 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Resíduos | 7,30 | 8,67 | 10,17 | 10,67 | 10,67 | 11,00 | 11,00 | 11,00 | 11,00 | 11,33 | 11,33 |
| TOTAL | 1051,45 | 1102,88 | 1032,17 | 1036,94 | 1036,94 | 1009,32 | 1023,28 | 1023,29 | 1027,78 | 1073,68 | 1073,65 |

Nota: Os dados de 2000 e 2005 são provenientes do balanço energético, da DGEG.

Anexo III tabela 2 – Consumo de energia final (PJ) por forma de energia nos cenários BAU, QUIT e NEC6, no período 2000-2020

| Forma de energia | 2000 | 2005 | 2010 | | | 2015 | | | 2020 | | |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | BAU | QUIT | NEC6 | BAU | QUIT | NEC6 | BAU | QUIT | NEC6 |
| Produtos Petrolíferos | 421,59 | 439,78 | 433,28 | 419,37 | 419,38 | 428,26 | 414,17 | 414,15 | 420,65 | 403,07 | 403,06 |
| Gás | 37,22 | 52,33 | 60,43 | 55,76 | 55,76 | 70,60 | 62,31 | 62,31 | 113,68 | 79,26 | 79,26 |
| Carvão | 21,19 | 0,68 | 1,35 | 1,35 | 1,35 | 2,50 | 0,00 | 0,00 | 4,88 | 3,66 | 3,66 |
| Electricidade | 136,65 | 163,08 | 210,37 | 216,04 | 216,04 | 235,00 | 248,38 | 248,40 | 230,10 | 274,82 | 274,85 |
| Hidrogénio | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,79 | 0,81 | 0,00 | 0,74 | 0,75 | 0,00 | 0,69 | 0,71 |
| Biomassa | 68,38 | 72,01 | 59,76 | 59,76 | 59,76 | 66,54 | 66,54 | 66,54 | 48,98 | 48,98 | 48,98 |
| Outras renováveis | 0,55 | 0,36 | 1,95 | 1,92 | 1,92 | 4,29 | 5,00 | 5,00 | 11,40 | 10,92 | 10,92 |
| Biocombustíveis | 0,01 | 0,04 | 19,72 | 32,25 | 32,25 | 21,54 | 32,63 | 32,63 | 17,56 | 30,15 | 30,15 |

| Forma de energia | 2000 | 2005 | 2010 | | | 2015 | | | 2020 | | |
|------------------|---------------|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | | | BAU | QUIT | NEC6 | BAU | QUIT | NEC6 | BAU | QUIT | NEC6 |
| Calor | 43,71 | 48,47 | 64,56 | 64,56 | 64,56 | 48,41 | 48,41 | 48,41 | 43,46 | 43,14 | 43,14 |
| TOTAL | 729,30 | 777 | 851,43 | 851,80 | 851,83 | 877,14 | 878,17 | 878,18 | 890,71 | 894,69 | 894,72 |

Nota: Os dados de 2000 e 2005 são provenientes do balanço energético, da DGEG.

Anexo III tabela 3 – Consumo de energia final (PJ) por sector nos cenários BAU, QUIT e NEC6, no período 2000-2020

| Sector | 2000 | 2005 | 2010 | | | 2015 | | | 2020 | | |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | | | BAU | QUIT | NEC6 | BAU | QUIT | NEC6 | BAU | QUIT | NEC6 |
| Indústria | 234,14 | 235,31 | 257,32 | 257,69 | 257,69 | 254,22 | 254,35 | 254,35 | 259,20 | 262,99 | 262,99 |
| Agricultura | 19,85 | 15,78 | 15,93 | 15,93 | 15,93 | 15,62 | 15,62 | 15,62 | 16,06 | 16,06 | 16,06 |
| Sector comercial | 75,53 | 104,38 | 117,28 | 117,30 | 117,31 | 121,24 | 121,31 | 121,31 | 127,35 | 128,16 | 128,17 |
| Sector residencial | 122,72 | 134,92 | 145,26 | 145,19 | 145,20 | 161,11 | 160,70 | 160,70 | 160,07 | 158,54 | 158,54 |
| Transportes | 277,05 | 286,35 | 315,62 | 315,67 | 315,68 | 324,93 | 326,17 | 326,18 | 328,02 | 328,92 | 328,95 |
| TOTAL | 729,30 | 776,74 | 851,43 | 851,80 | 851,83 | 877,14 | 878,17 | 878,18 | 890,71 | 894,69 | 894,72 |

Nota: Os dados de 2000 e 2005 são provenientes do balanço energético, da DGEG.

Anexo IV

Emissões de GEE nos cenários QUIT e NEC6

Anexo IV tabela 1 – Emissões totais e sectoriais de GEE (Gg CO₂e) nos cenários QUIT e NEC6, no período 2000-2020

| Sector | 2000 | 2005 | 2010 | | 2015 | | 2020 | |
|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | | QUIT | NEC6 | QUIT | NEC6 | QUIT | NEC6 |
| Produção de electricidade | 19150,26 | 22467,78 | 19440,14 | 19440,14 | 21477,88 | 21477,88 | 21975,78 | 21975,78 |
| Refinação | 3532,81 | 3639,18 | 3627,51 | 3627,51 | 3716,39 | 3716,39 | 3740,00 | 3740,40 |
| Indústria | 18635,29 | 17604,30 | 17717,97 | 17718,97 | 17842,60 | 17843,60 | 17846,56 | 17847,60 |
| Agricultura | 1324,35 | 1312,77 | 1317,50 | 1318,50 | 1319,07 | 1320,07 | 1324,12 | 1325,12 |
| Sector comercial | 2127,98 | 2138,64 | 2142,90 | 2143,91 | 2144,19 | 2145,19 | 2146,90 | 2147,90 |
| Sector residencial | 2810,17 | 2829,42 | 2808,88 | 2809,88 | 2890,28 | 2891,28 | 2782,72 | 2783,72 |
| Transportes | 19160,21 | 19281,36 | 19300,66 | 19301,60 | 19275,80 | 19276,77 | 19111,61 | 19112,58 |
| TOTAL | 66741,07 | 69273,45 | 66355,56 | 66360,50 | 68666,21 | 68671,18 | 68927,70 | 68933,11 |

Anexo IV tabela 2 – Emissões de GEE (Gg CO₂e) abrangidas pelo CELE nos cenários QUIT e NEC6, no período 2000-2020

| Sector | 2005 | 2020 | | Δ 2020/2020 (%) | |
|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------|
| | | QUIT | NEC6 | QUIT | NEC6 |
| Produção de electricidade | 19315,03 | 19626,20 | 19626,20 | 1,6 | 1,6 |
| Refinação | 2941,19 | 3042,02 | 3042,42 | 3,4 | 3,4 |
| Cogeração | 2528,19 | 2538,19 | 2539,19 | 0,4 | 0,4 |
| Outras indústrias | 743,63 | 747,51 | 747,52 | 0,5 | 0,5 |
| Química | 1444,23 | 1444,23 | 1444,23 | 0 | 0 |
| Cimento | 6289,10 | 6289,10 | 6289,10 | 0 | 0 |
| Vidro | 487,26 | 487,26 | 487,26 | 0 | 0 |
| Siderurgia | 1186,71 | 1186,71 | 1186,71 | 0 | 0 |
| Cal | 418,14 | 418,14 | 418,14 | 0 | 0 |
| Cerâmica | 1084,34 | 1084,34 | 1084,34 | 0 | 0 |
| Pasta e Papel | 186,32 | 186,32 | 186,32 | 0 | 0 |
| TOTAL | 36624,14 | 37050,02 | 37051,44 | 1,2 | 1,2 |

Anexo IV tabela 3 – Emissões de GEE (Gg CO₂e) abrangidas pelo CELE nos cenários QUIT e NEC6, no período 2000-2020

| Sector | 2005 | 2020 | | Δ 2020/2000 (%) | |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------|
| | | QUIT | NEC6 | QUIT | NEC6 |
| Agricultura | 1312,77 | 1324,12 | 1325,12 | 0,9 | 0,9 |
| Sector comercial | 2138,64 | 2146,90 | 2147,90 | 0,4 | 0,4 |
| Sector residencial | 2829,42 | 2782,72 | 2783,72 | -1,7 | -1,6 |
| Transportes | 19281,36 | 19111,61 | 19112,58 | -0,9 | -0,9 |
| Indústria | 7087,12 | 6512,33 | 6512,35 | -8,1 | -8,1 |
| TOTAL | 32649,31 | 31877,67 | 31881,67 | -2 | -2 |