

Avaliação ambiental de ciclo de vida dos principais sistemas de geração de eletricidade em Portugal

Análisis ambiental de ciclo de vida de los principales sistemas de generación de electricidad en Portugal

Environmental life cycle assessment of the main electricity generating systems in Portugal

Pedro Marques*
Jeremiah Kabayo*
Rita Garcia*
Fausto Freire*

*ADAI, LAETA, Department of Mechanical Engineering,
University of Coimbra, Portugal.
fausto.freire@dem.uc.pt

Resumo

Este artigo apresenta uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) dos principais sistemas de geração de eletricidade em Portugal, nomeadamente: carvão; gás natural; hídrica de reservatório; hídrica a fio de água; eólica e solar fotovoltaico. Foram desenvolvidos inventários de ciclo de vida para estes sistemas de geração e calculados impactes ambientais para as seguintes categorias do método ReCiPe: Depleção De Metais (DM), Depleção Fóssil (DF), Aquecimento Global (AG), Depleção De Ozono (DO), Acidificação Terrestre (AC), Eutrofização De Água Doce (EU); e do método Usetox: Ecotoxicidade De Água Doce (EC) e Toxicidade Humana Cancerígena (TH-c) e Não-cancerígena (TH-nc). Adicionalmente, avaliou-se a Pegada de Água (PA) usando dois métodos alternativos (ReCiPe e AWARE). Em geral, os sistemas fósseis apresentam impactes mais elevados do que os sistemas renováveis em 7 das 11 categorias de impacto (DF, AG, DO, AC, EU, TH-c e TH-nc). Por outro lado, a geração hídrica a fio de água é aquela que apresenta no geral menores impactes ambientais em quase todas as categorias. No entanto, este sistema é marcadamente sazonal e não “despachável”, pelo que deve ser parte de um sistema integrado de base renovável. Foi ainda realizada uma análise aos impactes normalizados, observando-se que as categorias mais relevantes são a EC, a TH-c, a TH-

nc- e a EU, embora a incerteza associada às categorias de toxicidade seja muito elevada (fatores de caracterização provisórios do Usetox).

Palavras-chave: *Avaliação de Ciclo de Vida. Sistemas Renováveis. Sistemas Não Renováveis. Geração de Eletricidade. Normalização.*

Resumen

En este artículo se presenta un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de los principales sistemas de generación eléctrica de Portugal, a saber: el carbón; gas natural; hidroeléctrica de agua fluyente; hidroeléctrica de agua embalsada; eólica y solar fotovoltaica. Se han desarrollado inventarios de ciclo de vida para estos sistemas de generación y calculado impactos ambientales para las siguientes categorías del método ReCiPe: Agotamiento de Metales (AM), Agotamiento Fósil (AF), Calentamiento Global (CG), Agotamiento de Ozono (AO), Acidificación del Suelo (AC), Eutrofización de Agua Dulce (EU); y del método Usetox: Ecotoxicidad de Agua dulce (EC) y Toxicidad Humana Cancerígena (TH-c) y No Cancerígena (TH-nc). Adicionalmente, se evaluó la Huella Hídrica (HH) usando dos métodos alternativos (ReCiPe y AWARE). En general, los combustibles fósiles presentan impactos más elevados que los sistemas renovables en 7 de las 11 categorías de impacto (AF, CG, AO, AC, EU, TH-c y TH-nc). Por otro lado, la hidroeléctrica de agua fluyente presenta en general menores impactos ambientales. Sin embargo, este sistema es marcadamente estacional y no “despachable”, por lo que debe ser parte de un sistema integrado de base renovable. Se ha realizado un análisis de los impactos normalizados, observándose que las categorías más relevantes son la EC, la TH-c, la TH-nc- y la EU, aunque la incertidumbre asociada a las categorías de toxicidad es muy elevada (factores de caracterización provisionales del Usetox).

Palabras clave: *Análisis de Ciclo de Vida. Sistemas Renovables. Sistemas No Renovables. Generación de Electricidad. Normalización.*

Abstract

This article presents a Life Cycle Assessment (LCA) of the main electricity generation systems in Portugal, namely: coal, natural gas, hydro reservoir, run-of-river hydro, wind and Photovoltaic (PV). Life cycle inventories for these systems were implemented and environmental impacts were calculated for the following impact categories: Metal Depletion (MD), Fossil Depletion (FD), Global Warming (GW), Ozone Depletion (OD), Terrestrial Acidification (TA), and Freshwater Eutrophication (FEU) (ReCiPe method); Freshwater Ecotoxicity (FEC), Human Toxicity Cancer (HT-c) and Non-cancer (HT-nc) (Usetox method). Additionally, the water footprint of these systems was assessed based

on two different methods (ReCiPe and AWARE). In general, fossil systems presented higher impacts than renewable ones in 7 out of 11 impact categories (FD, GW, TA, FEU, HT-c and HT-nc). On the other hand, run-of-river hydro presented the lowest impacts in almost all categories. Nevertheless, this system is highly seasonal and non-dispatchable; therefore, it should be considered within an integrated renewable energy system. Normalized impacts were also assessed and it was found that the most relevant categories are FEC, HT-c, HT-nc and FEU, although the uncertainty associated with toxicity categories is very high (interim characterization factors of Usetox).

Keywords: *Life Cycle Assessment. Renewable Systems. Non-Renewable Systems. Electricity, Normalization.*

1. Introdução

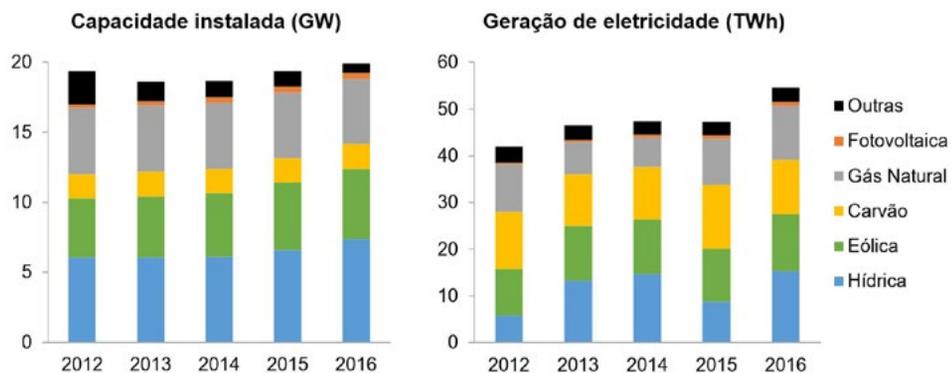
A geração de eletricidade está geralmente associada a impactes ambientais significativos. No entanto, os impactes dependem significativamente da tecnologia de geração, tal como evidenciado por diversos estudos de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) (e.g., GARCIA et al., 2014; TURCONI et al., 2013). A ACV permite obter uma visão holística do desempenho ambiental dos sistemas de geração de eletricidade, bem como identificar as fases ou processos mais significativos.

Para o contexto Português, Garcia et al. (2014) realizaram uma avaliação ambiental de ciclo de vida para os mixes de eletricidade de 2003 a 2012 e Garcia e Freire (2016) apresentaram uma avaliação marginal das emissões de Gases com Efeito Estufa (GEE) da geração de eletricidade. Garcia et al. (2014), também compararam os impactes ambientais de diferentes tecnologias de geração de eletricidade, observando uma redução global nos impactes do mix de eletricidade no período de 2003 a 2012.

Tendo por base Garcia et al. (2014), o presente artigo expande a avaliação dos impactes ambientais dos principais sistemas de geração de eletricidade em Portugal considerando indicadores adicionais (e.g., toxicidade, pegada de água) e atualiza os modelos de ciclo de vida de modo a refletir as características

atuais dos sistemas. O objetivo principal deste artigo é avaliar e comparar os impactos ambientais associados aos seis principais sistemas de geração de eletricidade em Portugal, nomeadamente carvão, gás natural, hídrica de reservatório, hídrica a fio de água, eólica e solar fotovoltaica, para os anos de 2012-2016. Esses sistemas foram selecionados por representarem a maior parte da capacidade instalada e da geração de eletricidade em Portugal nos últimos cinco anos (mais de 90% em 2016), como mostra a Figura 1. Deste modo, os sistemas com reduzida capacidade instalada foram excluídos, com exceção dos sistemas fotovoltaicos, uma vez que se perspetiva um crescimento significativo destes sistemas a curto-prazo.

Figura 1: Capacidade instalada (esquerda) e geração de eletricidade (direita) de 2012 a 2016 (dados obtidos em REN, 2017)

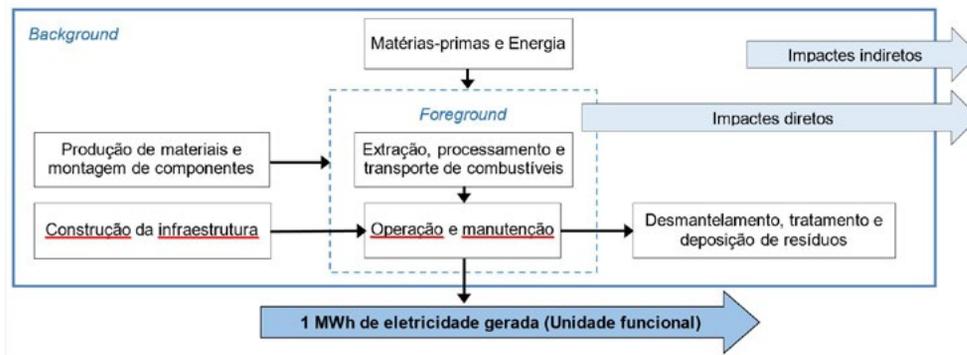


2. Materiais e Métodos

A avaliação dos impactos ambientais dos principais sistemas de eletricidade em Portugal foi realizada com base na metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (GUINÉE et al., 2001; ISO, 2006). Foram desenvolvidos inventários de ciclo de vida para cada tecnologia tendo em conta as fases do ciclo de vida descritas na Figura 2 (produção de materiais e montagem de componentes,

extração, processamento e transporte de combustíveis, construção, operação, manutenção e desmantelamento das centrais, tratamento e deposição final dos resíduos), como base nos modelos desenvolvidos em Kabayo (2017). A unidade funcional adotada é 1 MWh de eletricidade gerada. O ano de referência da avaliação é 2016, mas os impactos associados aos sistemas individuais foram calculados para o período 2012-2016. Ao considerar um período temporal superior a um ano, o estudo tem em conta a variabilidade anual na geração (e respetivos impactos).

Figura 2: Fronteiras do sistema



O software Simapro v8.0 foi usado para modelar os sistemas de geração de eletricidade e calcular os impactos de ciclo de vida. O inventário usado para construir os modelos de ciclo de vida foi recolhido de várias fontes. Os dados primários foram obtidos de fontes diretamente relacionadas com os sistemas de geração a operar em Portugal. Dados relativos a sistemas de energias renováveis foram obtidos da base de dados e2P – Energias Endógenas de Portugal (APREN, 2017). Dados dos sistemas fósseis foram obtidos a partir das declarações ambientais das centrais de Sines (EDP, 2016) (carvão) e Ribatejo (EDP, 2015) (gás natural), bem como dos principais fornecedores de combustíveis fósseis (e.g., GALP ENERGIA, 2017). Dados operacionais relativos à capacidade instalada e eletricidade gerada pelas centrais foram obtidos da

base de dados da REN (operadora nacional de transmissão de energia elétrica). Dados secundários foram obtidos da base de dados ecoinvent v3.0 (WERNET et al., 2016). Foram consideradas as seguintes simplificações:

As características dos sistemas e condições de operação (e.g., eficiência de conversão anual, origem dos combustíveis e matérias-primas, etc.) foram consideradas constantes ao longo da vida das centrais.

As variações na eficiência ou performance dos sistemas devido à idade dos sistemas ou à sua localização geográfica foram consideradas negligenciáveis. No entanto, variações regionais no que diz respeito ao nível de escassez de água foram tidas em conta na avaliação do impacto do uso da água.

Os métodos de Avaliação de Impactes de Ciclo de Vida (AICV) utilizados foram o ReCiPe (HUIJBREGTS et al., 2017) para as categorias: Depleção De Metais (DM), Depleção Fóssil (DF), Aquecimento Global (AG), Depleção de Ozono (DO), Acidificação Terrestre (AC) e Eutrofização De Água Doce (EU); e o USETox recomendado (“recommended”) e recomendado + provisório (“recommended + interim”) (ROSENBAUM et al., 2008) para as categorias: Ecotoxicidade de Água Doce (EC) e Toxicidade Humana (TH) cancerígena e não-cancerígena. Adicionalmente, avaliou-se a pegada de água comparando dois métodos alternativos: ReCiPe (depleção de água - DA) e AWARE (pegada de escassez de água - PEA) (BOULAY et al., 2018). A Tabela 1 sumariza os indicadores e os métodos de avaliação utilizados neste estudo.

Com o objetivo de identificar quais as categorias de impacto mais relevantes, foi feita a normalização dos impactes (ISO, 2006). A normalização consiste em dividir os impactes ambientais calculados na AICV pelos fatores de normalização, tal como descrito na equação 1:

$$N_i = C_i / R_i \text{ (eq. 1)}$$

em que N_i é o resultado normalizado para a categoria ambiental i ; C_i é o resultado do impacto ambiental na categoria i ; R_i é o fator de normalização do sistema de referência para a categoria i . A normalização permite avaliar a magnitude dos impactes em relação a um sistema de referência. Este passo

opcional na AICV permite relativizar os impactos em relação aos impactos de um sistema de referência, permitindo que os decisores identifiquem quais as categorias de impacto mais relevantes para o sistema em estudo.

Neste artigo, a normalização foi realizada para sete categorias ambientais (AG, DO, AC, EU, EC, TH-c e TH-nc), com base nos impactos per capita na Europa (EU-27) no ano de 2010, apresentados na Tabela 2 (BENINI et al., 2014). Para as restantes categorias ambientais não estão disponíveis fatores de normalização, pelo que não foram calculados valores normalizados.

Tabela 1: Indicadores e métodos de avaliação de impactos

Indicadores	Unidades	Métodos de avaliação
Depleção de metais (DM)	kg Fe eq. MWh ⁻¹	ReCiPe (Midpoint) (H) V1.11/EU (HUIJBREGTS et al., 2017)
Depleção fóssil (DF)	kg oil eq. MWh ⁻¹	ReCiPe (Midpoint) (H) V1.11/EU (HUIJBREGTS et al., 2017)
Aquecimento global (AG)	kg CO ₂ eq. MWh ⁻¹	IPCC 2013 GWP 100a (IPCC, 2013)
Depleção de ozono (DO)	kg CFC-11 eq. MWh ⁻¹	ReCiPe (Midpoint) (H) V1.11/EU (HUIJBREGTS et al., 2017)
Acidificação terrestre (AT)	kg SO ₂ eq. MWh ⁻¹	ReCiPe (Midpoint) (H) V1.11/EU (HUIJBREGTS et al., 2017)
Eutrofização de água doce (EU)	kg P eq. MWh ⁻¹	ReCiPe (Midpoint) (H) V1.11/EU (HUIJBREGTS et al., 2017)
Ecotoxicidade de água doce (EC) ^a	CTUe MWh ⁻¹	USETox v1.04 (ROSENBAUM et al., 2008)
Depleção de água (DA)	m ³ eq. MWh ⁻¹	ReCiPe (Midpoint) (H) V1.11/EU (HUIJBREGTS et al., 2017)
Pegada de escassez de água doce (PEA)	world m ³ eq. MWh ⁻¹	AWARE (BOULAY et al., 2018)
Toxicidade humana – cancerígena (TH-c) ^a	CTUh MWh ⁻¹	USETox v1.04 (ROSENBAUM et al., 2008)
Toxicidade humana – Não cancerígena (TH-nc) ^a	CTUh MWh ⁻¹	

^a O cálculo de impactos para as três categorias de toxicidade do Usetox foi efetuado tanto utilizando os fatores de caracterização “recomendados” como os fatores “recomendados + provisórios”, seguindo as recomendações do Usetox para permitir uma análise mais robusta dos resultados

3. Resultados

3.1. Avaliação de impactes de ciclo de vida

A Tabela 3 apresenta os impactes ambientais de ciclo de vida por MWh de eletricidade gerada pelos vários sistemas e para o mix de geração em Portugal (média de 2012-2016, adaptado de Garcia (2016) e Garcia et al. (2014), usado como referência. Note-se que o mix de geração inclui uma pequena percentagem de outras tecnologias para além das analisadas neste artigo (ver Figura 1). As Figuras 3 e 4 apresentam a contribuição das principais substâncias para os impactes ambientais de cada sistema nas categorias DM, DF, AG, DO, AC e EU (FIGURA 3), e TH-c, TH-nc e EC (FIGURA 4).

Tabela 2: Fatores de normalização (BENINI et al., 2014)

Indicador	Unidades	Fatores de normalização
Aquecimento global (AG)	kg CO ₂ eq (p.yr) ⁻¹	9.22E+03
Depleção da camada de ozono (DO)	kg CFC-11 eq (p.yr) ⁻¹	2.16E-02
Acidificação terrestre (AC)	kg SO ₂ eq (p.yr) ⁻¹	4.73E+01
Eutrofização de água doce (EU)	kg P eq (p.yr) ⁻¹	1.48E+00
Ecotoxicidade de água doce (EC)	CTUe (p.yr) ⁻¹	8.74E+03
Toxicidade humana – cancerígena (TH-c) ^a	CTUh (p.yr) ⁻¹	3.69E-05
Toxicidade humana – não cancerígena (TH-nc) ^a	CTUh (p.yr) ⁻¹	5.33E-04

^a Apenas para fatores recomendados + provisórios, uma vez que não existem fatores de normalização que considerem apenas as substâncias incluídas nos recomendados.

Tabela 3: Impactes ambientais de ciclo de vida por MWh gerado por tecnologia e para o mix elétrico Português (média dos anos 2012-2016)

Indicador	Unidade	CO	GN	HR	HF	EO	PV	PT mix
DM	kg Fe eq.	3,1	1,1	2,2	2,0	18,6	13,9	7,0
DF	kg oil eq.	238	155	1,3	0,9	4,4	13	81
AG	kg CO ₂ eq.	965	444	14	4	16	50	301
DO	mg CFC-11 eq.	5,0	60,0	0,5	0,3	2,0	9,0	1,7
AC	kg SO ₂ eq.	2,62	0,31	0,03	0,02	0,11	0,33	0,79
EU	g P eq.	400	2,0	1,0	1,0	20	30	100
DA	m ³	1,73	0,52	29	0,03	0,07	0,99	3,32
PEA	world. m ³	1,7	12	616	0,6	1,3	24	-
EC (cons.)	CTUe	0,50	0,03	0,03	0,01	0,11	0,54	0,29
EC (rec.+int.)	CTUe	3315	49	418	262	7417	2537	2495
TH-c (cons.)	μCTUh	6E-03	7E-05	4E-05	2E-05	2E-04	2E-03	5E-03
TH-c (rec.+int.)	μCTUh	38	0,7	1,1	1,2	7,7	7,0	12
TH-nc (cons.)	μCTUh	1E-03	6E-03	5E-04	4E-04	2E-03	3E-03	1E-03
TH-nc (rec.+int.)	μCTUh	140	4,2	2,6	2,2	37	40	47

Em geral, os sistemas fósseis apresentam impactes ambientais mais elevados do que os sistemas renováveis em 7 das 11 categorias de impacte ambiental consideradas (DF, AG, DO, AC, EU e TH-c e TH-nc). A hídrica a fio de água apresenta os menores impactes em quase todas as categorias. Para todas as categorias, os impactes dos sistemas fósseis provêm principalmente da operação das centrais (i.e., extração, processamento e transporte de

combustíveis e operação e manutenção das centrais), enquanto que nos sistemas renováveis, os impactos têm origem essencialmente na infraestrutura (i.e., produção de materiais e montagem de componentes, construção e desmantelamento das centrais e tratamento e deposição final dos resíduos).

A depleção de metais é mais elevada para os sistemas eólicos e fotovoltaicos, que se estimou reduzirem as reservas existentes em 18,6 e 13,9 kg Fe eq. por MWh de eletricidade gerada, respetivamente. Os sistemas eólicos e fotovoltaicos requerem quantidades de metais relativamente elevadas por MWh gerado na sua vida útil em comparação com os outros sistemas. A utilização de ferro, manganês e cobre constituem as principais causas da depleção de metais nos sistemas fósseis, enquanto que a utilização de cobre (EO e PV) e de níquel, manganês, ferro e crómio (HR e HF) é responsável pela maioria dos impactos nesta categoria nos sistemas renováveis (FIGURA 3). As centrais a gás natural apresentam os menores impactos nesta categoria (1,1 kg Fe eq. MWh⁻¹).

A depleção fóssil é mais elevada nos sistemas a carvão e gás natural (238 e 154,8 kg oil eq. MWh⁻¹, respetivamente). Por outro lado, os sistemas hidroelétricos (reservatório e fio de água) apresentam os menores impactos nesta categoria (1,3 e 0,9 kg oil eq. MWh⁻¹, respetivamente). A utilização de carvão e gás natural contribui significativamente para os impactos nesta categoria, tanto por serem combustíveis usados na operação das centrais fósseis como por serem fontes de energia primária no fabrico da infraestrutura dos sistemas renováveis (e.g., fundição de metais) (FIGURA 3). No caso destes últimos, também a utilização de petróleo contribui significativamente para os impactos nesta categoria.

As centrais fósseis apresentam a maior contribuição para o aquecimento global (carvão: 965 kg CO₂ eq. MWh⁻¹; gás natural: 444 kg CO₂ eq. MWh⁻¹), enquanto que os sistemas hidroelétricos apresentam a menor contribuição para esta categoria (reservatório: 14 kg CO₂ eq. MWh⁻¹; fio-de-água: 4 kg CO₂ eq. MWh⁻¹). As substâncias que mais contribuem para os impactos são o dióxido de carbono (proveniente de gases de combustão e flaring) e o metano

(proveniente da libertação direta de gás natural na sua extração, venting) (FIGURA 3) (SAFAEI et al., 2015). As emissões de metano biogénico (resultantes da decomposição anaeróbia da matéria orgânica submersa) representam uma percentagem significativa (~45%) dos impactes para o aquecimento global das hídricas de reservatório (FIGURA 3).

A geração a gás natural causa os maiores impactes na depleção da camada de ozono (60 mg CFC-11 eq. MWh⁻¹) devido ao uso de bromotrifluorometano (i.e., Halon 1301) nos sistemas de combate aos incêndios durante a extração e processamento de gás natural, composto altamente inflamável. A geração a carvão causa os maiores impactes na acidificação terrestre (2.62 kg SO₂ eq. MWh⁻¹). As substâncias que mais contribuem para esta categoria são o dióxido de enxofre (SO₂) e os óxidos de azoto (NO_x), que resultam da oxidação de impurezas presentes no combustível durante a combustão (FIGURA 3). Os resultados têm em conta o efeito da utilização de sistemas de tratamento de gases (dessulfurização, desnitrificação e remoção de partículas) que foram instalados nas centrais a carvão em 2008 (GARCIA et al., 2014). O impacto na eutrofização de água doce é mais elevado para as centrais a carvão (400 g P eq. MWh⁻¹), sendo a emissão de fosfatos a que mais contribui para este impacto (FIGURA 3).

A pegada da água foi calculada a partir dos métodos ReCiPe (depleção de água) e AWARE (pegada de escassez de água). A depleção de água (DA) estima o consumo de água de ciclo de vida para cada um dos sistemas de geração em análise. Para obter a pegada de escassez de água (PEA), os consumos de água foram multiplicados por fatores de caracterização regionais do método AWARE. Em geral, a aplicação destes fatores de caracterização resultou em impactes mais elevados no uso da água do que o método ReCiPe, exceto para as centrais a carvão. Em ambos os casos, as hídricas de reservatório apresentam as maiores pegadas de água (29 m³ MWh⁻¹ – DA; 616 world m³ MWh⁻¹ – PEA) e as de fio-de-água as menores (0,03 m³ MWh⁻¹ – DA; 0,6 world m³ MWh⁻¹ – PEA).

Os sistemas fotovoltaicos causam os maiores impactos na ecotoxicidade de água doce (0,54 CTUe MWh-1) e as hídricas a fio de água os menores (0,01 CTUe MWh-1) considerando os fatores de caracterização recomendados do método Usetox, que não incluem os metais. Estes impactos são maioritariamente atribuídos a emissões de diflubenzurão e clorotalonil, pesticidas usados nas atividades agrícolas (FIGURA 4). Considerando os fatores de caracterização recomendados + provisórios, que incluem os metais, os maiores impactos são causados pelos sistemas eólicos (7417 CTUe MWh-1) e devem-se maioritariamente à utilização de cobre. Neste caso, os menores impactos são gerados pelos sistemas a gás natural (49 CTUe MWh-1).

Relativamente aos impactos na toxicidade humana, foram avaliadas duas categorias – toxicidade carcinogénica e não-carcinogénica – considerando os fatores de caracterização recomendados e recomendados + provisórios do método Usetox. Para a toxicidade carcinogénica, a geração com base em carvão produz os maiores impactos quer usando os fatores de caracterização recomendados ($6E-03 \mu\text{CTUh MWh-1}$) quer recomendados + provisórios ($38 \mu\text{CTUh MWh-1}$), enquanto que as hídricas a fio de água geram os menores impactos considerando os fatores recomendados ($2E-05 \mu\text{CTUh MWh-1}$), e os sistemas a gás natural se usados os fatores recomendados + provisórios ($0,7 \mu\text{CTUh MWh-1}$). Utilizando os fatores recomendados, as substâncias que mais contribuem para os impactos são o 2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-dioxina (TCDD) e o formaldeído, emitidas durante a combustão de compostos orgânicos voláteis, tais como hidrocarbonetos presentes nos combustíveis fósseis (FIGURA 4). Considerando os fatores recomendados + provisórios, a substância com maior contribuição para os impactos é o crómio VI.

Os sistemas a gás natural (centrais ciclo combinado) causam os impactos mais elevados na toxicidade não-carcinogénica quando usados os fatores recomendados ($6E-03 \mu\text{CTUh MWh-1}$), enquanto que os sistemas a carvão apresentam os maiores impactos quando considerados os fatores recomendados + provisórios ($140 \mu\text{CTUh MWh-1}$). Por outro lado, as hídricas a fio de água

apresentam os valores mais baixos qualquer que sejam os fatores utilizados ($4E-04 \mu\text{CTUh MWh}^{-1}$ – recomendados; $2.2 \mu\text{CTUh MWh}^{-1}$ – recomendados + provisórios). Nesta categoria, as substâncias mais significativas são o aldrin (recomendados), usado como pesticida, e o zinco, o arsénio e o mercúrio (recomendados + provisórios) (FIGURA 4).

Figura 3: Contribuição das principais substâncias para os impactos ambientais de ciclo de vida dos principais sistemas de geração de eletricidade em Portugal (método ReCiPe)

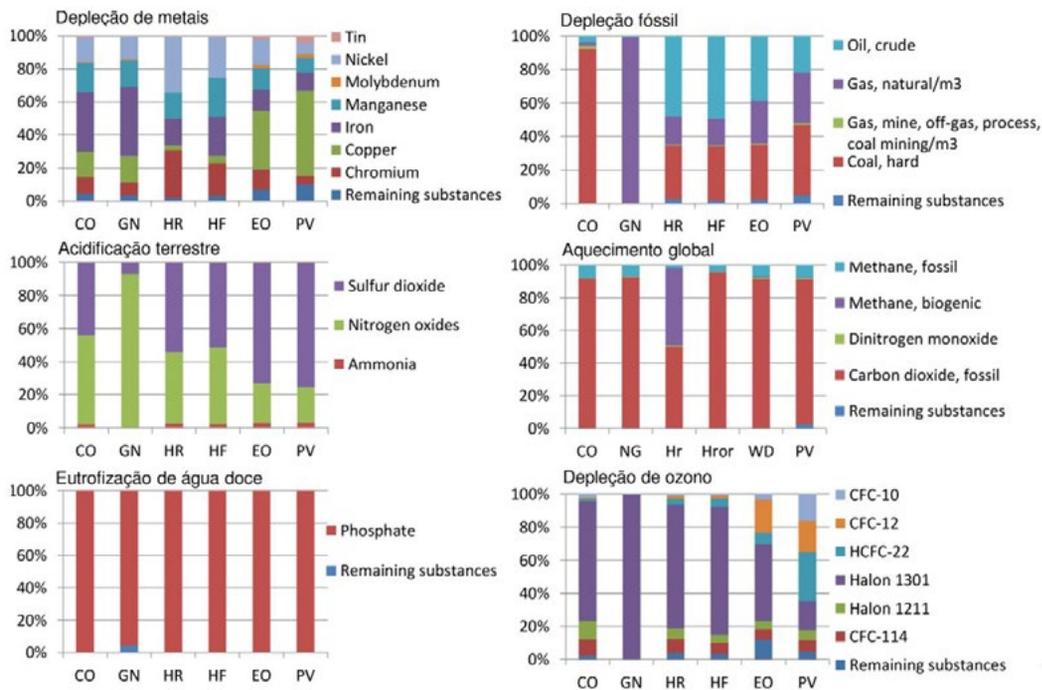
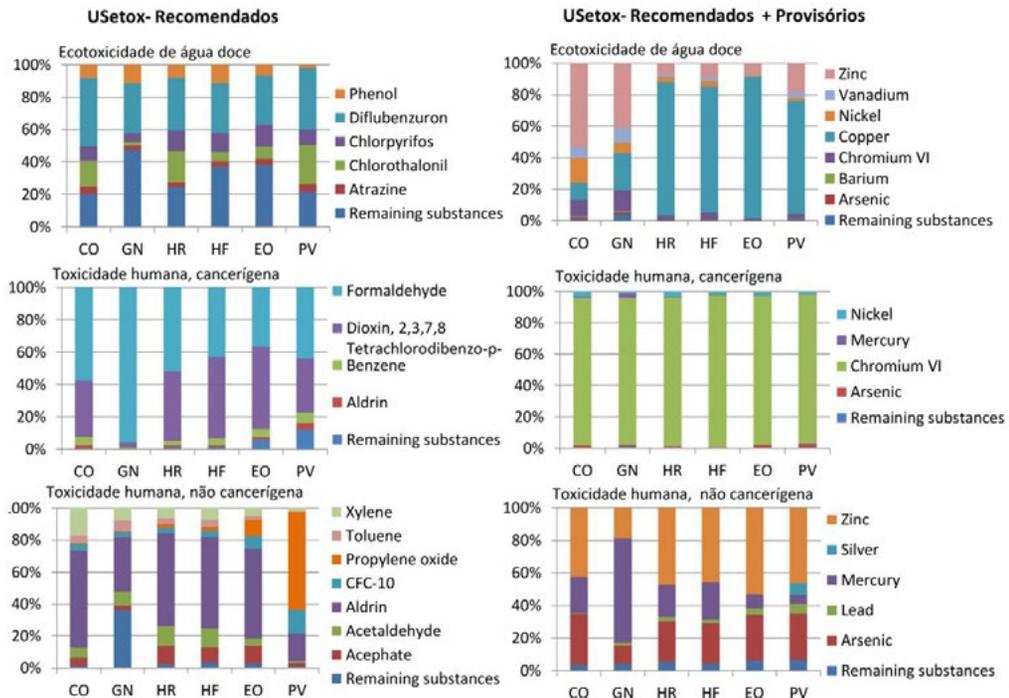
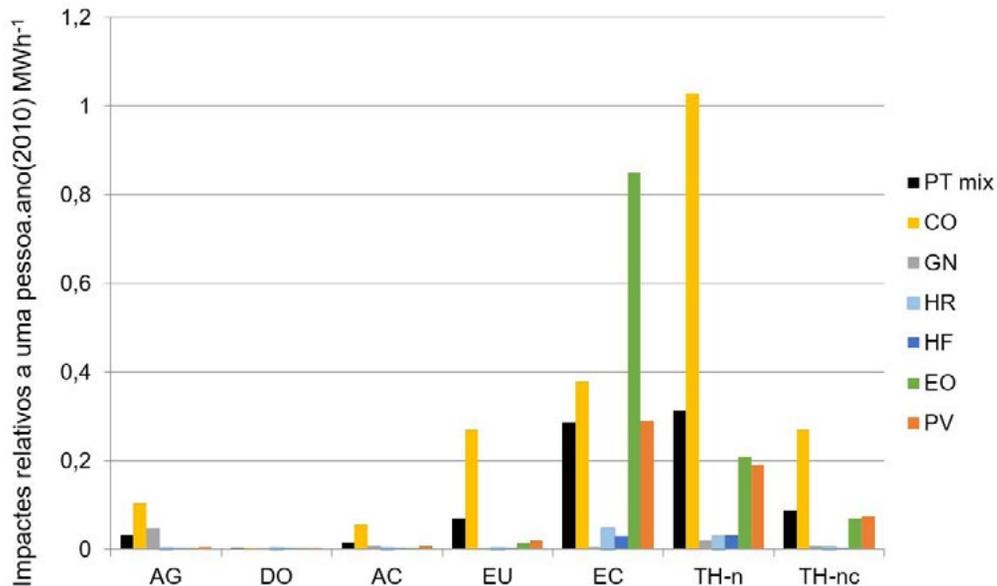


Figura 4: Contribuição das principais substâncias para os impactes ambientais de ciclo de vida dos principais sistemas de geração de eletricidade em Portugal (método Usetox)



3.2. Normalização

A Figura 5 apresenta os resultados normalizados da AICV. Verifica-se que as categorias ambientais com maior significância para os sistemas em estudo são a ecotoxicidade de água doce, a toxicidade humana cancerígena e não cancerígena e a eutrofização de água doce. É de notar que a incerteza associada ao método Usetox considerando os fatores de caracterização recomendados + provisórios é muito elevada, pelo que os resultados associados às categorias de toxicidade devem ser interpretados com cautela. O sistema baseado em carvão é o que apresenta maior magnitude nos impactes normalizados para estas categorias, com exceção da EC em que o sistema eólico prevalece.

Figura 5: Resultados normalizados

4. Conclusões

A ACV realizada permitiu obter uma visão global da performance ambiental dos principais sistemas de geração de eletricidade em Portugal, identificando os sistemas e situações com impactes mais significativos. Os sistemas fósseis são os que apresentam impactes ambientais mais elevados na maioria das categorias, o que enfatiza a importância de reduzir a contribuição destes sistemas (principalmente o baseado em carvão) no mix elétrico Português. Por outro lado, os sistemas renováveis baseados na geração hídrica apresentam no geral os menores impactes ambientais, em particular a geração hídrica a fio de água que apresenta menores impactes em quase todas as categorias analisadas. No entanto, este sistema é marcadamente sazonal e não “despachável”, pelo que deve ser parte de um sistema integrado de base renovável. Também os sistemas de geração eólica e fotovoltaica são não despacháveis, estando a geração dependente de condições climáticas. A integração destes sistemas, em

particular o eólico, com a hídrica de reservatório com sistemas de bombagem e o aumento da capacidade de interligação com Espanha e o resto da Europa são estratégias possíveis para aumentar a contribuição destes sistemas no mix elétrico e reduzir a necessidade de utilização de sistemas fósseis.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, Portugal (FCT) e do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) no âmbito dos projetos: PTDC/AAG-MAA/6234/2014 (POCI-01-0145-FEDER-016765) – SABIOS; PTDC/AGR-FOR/1510/2014 (POCI-01-0145-FEDER-016764) – SUSTAINFOR; e POCI-01-0145-FEDER-029820 – T4ENERTEC. Rita Garcia agradece o apoio da FCT e do Programa Operacional Capital Humano – Fundo Social Europeu no âmbito da Bolsa de Pós-Doutoramento SFRH/BPD/114869/2016. A tradução do resumo para espanhol foi feita pela Yvonne Vogt a quem os autores agradecem.

Referências

APREN (Associação de Energias Renováveis), 2017. Projeto *e2p - endogenous energies of Portugal*. [S.l: s.n.], 2017.

BENINI, Lorenzo et al., 2014. *Normalisation method and data for Environmental Footprints*. Ispra: JRC Science Hub, 2017. Available from: <http://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/JRC_Normalisation_method_and_data_EF_web.pdf>.

BOULAY, Anne Marie et al., 2018. The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). *International Journal of Life Cycle Assessment*, February 2018, vol. 23, no. 2, pp. 368–378. Available from: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-017-1333-8>>.

EDP. Declaração Ambiental - Central Termoelectrica de Sines - EU Eco-Management and Audit Scheme (EMAS). 2016.

EDP. Declaração ambiental 2015 - Central Termoeletrica do Ribatejo. 2015.

GALP ENERGIA. *Natural gas sourcing* - Galp. . [S.l: s.n.]. , 2017.

GARCIA, Rita and FREIRE, Fausto, 2016. Marginal life-cycle greenhouse gas emissions of electricity generation in Portugal and implications for electric vehicles. *Resources*, November 2016, vol. 5, no. 4. Available from: doi: <<https://doi.org/10.3390/resources5040041>>.

GARCIA, Rita, 2016. *Dynamic fleet-based life-cycle assessment: addressing environmental consequences of the introduction of electric vehicles in Portugal*. Ph.D thesis, University of Coimbra, Coimbra, Portugal.

GARCIA, Rita, MARQUES, Pedro and FREIRE, Fausto, 2014. Life-cycle assessment of electricity in Portugal. *Applied Energy*, December 2014, vol. 134, pp. 563–572. Available from: doi: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.067>>.

GUINÉE, J.B. (ed.), 2001. *Life cycle assessment: operational guide to the ISO standards*. [S.l.]: Leiden University, Centre of Environmental Science, 2001.

HUIJBREGTS, Mark A.J. et al, 2017. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, February 2017, vol. 22, issue 2, pp. 138–147. Available from: doi: <<https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>>.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2013. *Climate change 2013: the physical science basis: contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge, USA: Cambridge University Press, 2013. Available from: <http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf>.

ISO (International Organization for Standardization), 2006. *ISO 14040: environmental management-life cycle assessment: principles and framework*. Geneva: ISO, 2006.

KABAYO, Jeremiah Murumunawe, 2017. *Life cycle sustainability assessment of key electricity generation systems in Portugal*. Master thesis, University of Coimbra, Portugal, 2017.

REN (Redes Energéticas Nacionais), 2017. Dados Técnicos=Technical Data. Lisboa: REN, 2017. Available from: <<http://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT/InformacaoTecnica/DadosTecnicos/REN%20Dados%20T%C3%A9cnicos%202012.pdf>>.

ROSENBAUM, Ralph K. et al., 2008. USEtox - The UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, October 2008, vol. 13, no. 7, pp. 532–546. Available from: <<https://toxnet.nlm.nih.gov/cpdb/pdfs/Setac.pdf>>.

SAFAEI, Amir, FREIRE, Fausto and HENGGELER ANTUNES, Carlos, 2015. Life-cycle greenhouse gas assessment of nigerian liquefied natural gas addressing uncertainty. *Environmental Science & Technology*, 2015, vol. 49, no. 6, pp. 3949–3957. Available from: <<https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es505435j>>.

TURCONI, Roberto, BOLDRIN, Alessio and ASTRUP, Thomas, 2013. Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: overview, comparability and limitations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, December 2013, vol. 28, 555–565. Available from: doi: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.013>>.

WERNET, Gregor et al., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2016, vol. 21, no. 9, pp. 1218–1230.