



Guilherme Luís Martins Adriano

Licenciado em Engenharia do Ambiente

Análise de ciclo de vida da tecnologia fotovoltaica em Portugal

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Energias
Renováveis, Conversão Eléctrica e Utilização Sustentável

Orientador: Professor Doutor João Miguel Dias Joanaz de
Melo, Professor auxiliar com agregação da UNL/FCT
Co-orientador: Professor Doutor João Murta Pina, Professor
auxiliar da UNL/FCT

Presidente: Doutora Anabela Monteiro Gonçalves Pronto
Arguente: Doutor Nuno Miguel Ribeiro Videira Costa
Vogal: Doutor João Miguel Dias Joanaz de Melo

Setembro, 2015

Análise de ciclo de vida da tecnologia fotovoltaica em Portugal

Guilherme Luís Martins Adriano
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos aqueles que de forma mais directa ou indirecta contribuíram para a realização da presente dissertação.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, o Professor João Joanaz de Melo, por todo o acompanhamento prestado no desenvolvimento deste trabalho, estando sempre disponível para resolver todas as dificuldades.

Um grande agradecimento ao António Galvão pelo tempo despendido, pela incansável ajuda prestada e contributo para o trabalho desenvolvido.

Agradeço à OpenRenewables por todos os dados fornecidos. Em especial, ao Engenheiro Rui Lobo, que possibilitou esta colaboração e ao Sr. Nuno Cardoso pela disponibilidade na resposta às dúvidas que foram surgindo.

Um grande obrigado à minha família e amigos por todo o apoio prestado ao longo do mestrado, em especial aos meus pais, que sempre tiveram uma palavra de apoio nos momentos mais adversos, mas também pela sua dedicação e esforço para me proporcionarem todas as condições necessárias ao longo destes anos.

Resumo

É impensável viver nos dias de hoje sem energia eléctrica. Com o aumento das alterações climáticas, é fulcral substituir ou diminuir a dependência dos combustíveis fósseis, apostando em tecnologias de produção de energia mais limpas e amigas do ambiente. Neste seguimento, as energias renováveis surgem como uma boa alternativa a este problema. A tecnologia fotovoltaica aproveita a energia solar para a produção de electricidade, apresentando a vantagem de não produzir emissões durante a sua operação e ter um tipo de instalação distribuída, mas põe-se em causa o seu ciclo de vida. O principal objectivo desta dissertação é analisar o ciclo de vida da tecnologia fotovoltaica em Portugal, consistindo o objectivo secundário em comparar esta tecnologia com outras fontes de electroprodução, também em Portugal.

Do ponto de vista ambiental, de maneira a ser possível identificar as fases críticas do ciclo de vida e comparar as tecnologias, foi utilizado o método Ecoblok, que fornece indicadores de desempenho. Após a análise, constatou-se que os principais impactes no ciclo de vida estão ligados à fase de produção da célula, montagem do painel e componentes do sistema (BOS). Os indicadores mais críticos são a extracção de recursos, emissão de gases de efeito de estufa e a poluição da água e do solo. Em relação à extracção de matérias-primas, o silício é abundante, mas requer elevadas quantidades de energia na sua transformação.

Dentro dos tipos de tecnologia fotovoltaica, o silício monocristalino gera mais impactes ambientais comparado com o silício policristalino. Esta diferença está relacionada com o processo produtivo do silício monocristalino, um processo mais lento e com maior consumo de energia.

Na comparação da tecnologia fotovoltaica com outras fontes de energia, verificou-se que a tecnologia de gás natural apresenta mais impactes gerados nos indicadores extracção de água, extracção de recursos e emissão de gases de efeito de estufa; já a tecnologia hídrica gera mais impactes no indicador uso do solo. Nos indicadores poluição da água e solo e poluição do ar, a tecnologia fotovoltaica apresenta o valor mais elevado de todas as tecnologias.

A fonte de energia fotovoltaica apresenta a vantagem de ter uma produção mais estável e previsível durante o ano e de o seu horário de produção coincidir com as horas de maior consumo energético.

Palavras-chave: Tecnologia fotovoltaica; análise ciclo de vida; método Ecoblok; energia.

Abstract

It is unthinkable to live today without electricity. With the increase of climate change is critical to replace or reduce the reliance on fossil fuels betting on cleaner energy production and environmentally friendly technologies. Therefore, the renewable energies become a good alternative to this problem. The photovoltaic technology utilizes the solar energy for the production of electricity, presenting the advantage of not producing emissions during its operation and having a distributed type of installation, however, it raises concern around its life cycle. The main objective of this thesis is to analyze the life cycle of the photovoltaic technology in Portugal, and as a secondary objective compare photovoltaic technology with other sources of energy production also in Portugal.

From the environmental point of view, so as to be able to identify critical phases of the life cycle and compare the technologies Ecoblok method was used to provide performance indicators. After the analysis, it was found that the main effects on the life cycle are linked to the production phase of the cell, panel mount and system components (BOS). The most critical indicators are the extraction of resources, emission of greenhouse gases and pollution of water and soil. In relation to the removal of raw materials, the silicon is abundant, however, it requires high quantities of energy in its transformation.

Within the types of photovoltaic technology the monocrystalline silicon generates more environmental impacts in comparison to polycrystalline silicon. This difference is due to the slower process and with higher power consumption of the monocrystalline silicon.

Comparing the photovoltaic technology with other energy sources, it was found that the found that the natural gas technology presents more impacts in the water extraction, resource extraction and greenhouse gas emissions indicators; hydric technology generates more impacts on the land use. In the polluting emissions to air and polluting emissions to water and land indicator, the photovoltaic technology presents the highest value of all technologies. The photovoltaic source presents the advantage of having a more stable and predictable production during the year and its production hours coincide with the hours of higher energy consumption.

Keywords: Photovoltaic; life cycle analysis; Ecoblok method; energy.

Índice de matérias

1.	Introdução.....	1
1.1.	Enquadramento.....	1
1.2.	Objectivo	1
1.3.	Estrutura da dissertação.....	2
2.	Revisão da Literatura.....	3
2.1.	Sistema energético de Portugal	3
2.2.	Tecnologias fotovoltaicas	6
2.3.	Fundamentos de Análise de Ciclo de Vida	9
2.4.	Ciclo de vida da tecnologia fotovoltaica.....	13
2.5.	Revisão do estado de arte da análise ciclo de vida da tecnologia fotovoltaica	17
3.	Metodologia.....	21
3.1.	Abordagem geral	21
3.2.	Âmbito e objectivos da análise de ciclo de vida	21
3.3.	Inventário ciclo de vida e recolha de dados	22
3.4.	Comparação entre várias fontes de energia	27
3.5.	Avaliação desempenho ambiental	28
4.	Resultados	33
4.1.	Análise das fases de produção da tecnologia fotovoltaica	33
4.2.	Comparação da tecnologia fotovoltaica com outras fontes de electroprodução	42
5.	Conclusão	51
5.1.	Síntese	51
5.2.	Limitações.....	52
5.3.	Desenvolvimentos futuros	53
	Referências bibliográficas	55
A.	Anexos.....	57

Índice de figuras

Figura 2.1 - Evolução da dependência energética de Portugal, fonte: DGEG,2015.	3
Figura 2.2 - Evolução da produção de electricidade entre 1999 e 2004, (Fonte: APREN,2015).....	4
Figura 2.3 - Peso das fontes de produção de electricidade em Portugal em 2014. Fonte: APREN,2015	5
Figura 2.4- Produção anual GWh por região de Portugal, fonte DGEG,2015	6
Figura 2.5 - Médias anuais de horas equivalentes de produção em Portugal, fonte:DGEG,2015.....	6
Figura 2.6 - Tecnologias de células fotovoltaicas existentes, fonte: Proença, 2007	8
Figura 2.7 - Quadro de ACV, adaptado (ISO 14040, 2006).....	10
Figura 2.8 – Fases ciclo de vida do PV, fonte:(Fthenakis & Kim 2011).....	13
Figura 2.9 - Fluxo da extracção matéria-prima até instalação do sistema, adaptado (Fthenakis & Kim 2011).....	15
Figura 2.10 – Distribuição por peso dos constituintes do módulo PV, fonte:(Olson et al. 2013).	16
Figura 3.1 - Fluxos de entrada e saída das fases de ciclo vida da tecnologia fotovoltaica, fonte: adaptado Fthenakis,2011	22
Figura 4.1 – Indicador WA nas fases de produção da célula.	34
Figura 4.2 - Indicador RE nas fases de produção da célula.....	35
Figura 4.3 - Indicador LU nas fases de produção da célula.	36
Figura 4.4 - Indicador GH nas fases de produção da célula.	37
Figura 4.5 - Indicador PA nas fases de produção da célula.....	38
Figura 4.6 - Indicador PWL nas fases de produção da célula.	39
Figura 4.7 - Indicador DF nas fases de produção da célula.....	40
Figura 4.8 - Indicador WA para as fontes de electroprodução.	43
Figura 4.9 - Indicador RE para as fontes de electroprodução.	44
Figura 4.10 - Indicador LU para as fontes de electroprodução.	45
Figura 4.11 - Indicador GH para as fontes de electroprodução.....	46
Figura 4.12 - Indicador PA+DF para as fontes de electroprodução.	47
Figura 4.13 - Indicador PWL+DF para as fontes de electroprodução.....	48
Figura A.1 - Especificações do módulo em estudo. Fonte: OpenRenewables 2015.	57
Figura A.2 – Entradas e saídas processo de produção da célula, fonte: ecoinvent, 2009.....	58
Figura A.3 - Entradas e saídas processo de montagem do painel e instalação, fonte: ecoinvent, 2009.	59
Figura A.4 – Entradas e saídas produção estrutura de suporte, fonte:ecoinvent,2009.	60
Figura A.5 - Entradas e saídas produção inversor, fonte:ecoinvent,2009.	61
Figura A.6 - Entradas e saídas produção cabos eléctricos, fonte:ecoinvent,2009.....	62
Figura A.7 - Entradas e saídas extracção de silício, fonte:ecoinvent,2009.	62
Figura A.8 - Estimativa da produção anual de um sistema 1 kWp, fonte: PVGIS 2015.....	63

Índice de tabelas

Tabela 2-1 – Revisão de métodos, dados e indicadores utilizados na ACV do PV.	17
Tabela 3-1 – Três maiores exportadores matéria-prima e produtores mundiais, fonte:UN contrade, 2015; Statista, 2015;USGS, 2015.....	23
Tabela 3-2 – Quantidade necessária de silício.	23
Tabela 3-3 – Consumos por MW de módulos produzidos, fonte: OpenRenewables,2015.....	24
Tabela 3-4 - Códigos e valores da fase extracção matéria-prima.....	26
Tabela 3-5 - Códigos e valores da fase de produção da célula.....	26
Tabela 3-6 - Códigos e valores da fase de montagem do painel e instalação sistema.....	26
Tabela 3-7 - Códigos e valores da fase de produção de componentes BOS.	27
Tabela 3-8 - Códigos e valores da fase de reciclagem	27
Tabela 3-9 – Valores indicadores para varias fontes de energia por kWh, fonte:(Higino 2014)	28
Tabela 3-10 – Indicadores Ecoblok e critérios de cálculo.....	29
Tabela 4-1 – Valores totais dos indicadores no ciclo de vida do Si-c mono e Si-poli	33
Tabela 4-2 – Valor dos indicadores para cada fase da tecnologia Si-c poli.	33
Tabela 4-3 - Valor dos indicadores para cada fase da tecnologia Si-c mono.	34
Tabela 4-4 – Valores totais dos indicadores ciclo vida Si-c mono e Si-c poli com dioxinas incorporadas.	42
Tabela 4-5 – Valores dos indicadores para unidade funcional de 1 kWh	42
Tabela A-1 - Indicadores para os materiais usados na OpenRenewables por kWp.	64
Tabela A-2 - Factores equivalência usados pelo método Ecoblok.....	65

Lista de Acrónimos

ACV – Análise de Ciclo de Vida

ANREEE - Associação Nacional para o Registo de Equipamentos Eléctricos e Electrónicos

APREN – Associação Portuguesa de Energias Renováveis

BOS – Componentes balanço do sistema (Balance of system)

CdTe – Telureto de Cádmio

CV – Ciclo de vida

DGEG – Direcção Geral de Energia e Geologia

EDP - Energias de Portugal

EPBT – Tempo de retorno de energia

EPIA - European Photovoltaic Industry Association

ERP - Plataforma europeia de reciclagem

ERSE - Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos

e-Si- Silício eléctrico

EVA - Acetato-vinilo de etileno

GEE – Gases efeito de estufa

GWp – gigawatt pico

kWp - quilowatt pico, significa potência máxima obtida em condições ideais de 1000W/m² de irradiação, à temperatura de 25°C.

mg-Si – Silício metalúrgico

OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico

PET- Politereftalato de etileno

PRTR- Registo de Emissões e Transferências de Poluentes

PV – Fotovoltaica

PVGIS - Photovoltaic Geographical Information System

Si- Silício

REN - Redes Energéticas Nacionais

Si-c – Silício cristalino

Si-c mono – silício monocristalino

Si-c poli – Silício policristalino

Sog-Si – Silício solar

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Com o aumento do consumo de energia a nível mundial e consequentes preocupações com efeitos que os gases efeito de estufa (GEE) provocam no ambiente, torna-se necessário arranjar alternativas aos tradicionais meios de produção de energia que usam combustíveis fósseis. Estas alternativas passam por fornecer energia através de fontes de energia menos poluentes e sustentáveis. A utilização de fontes de energia renováveis é uma boa solução para reduzir as alterações climáticas, diminuir a dependência energética dos combustíveis fósseis e levar energia a pontos remotos.

Dentro das energias renováveis, a energia fotovoltaica (PV) é a uma das tecnologias que está a atingir a sua fase de maturidade. A tecnologia fotovoltaica usa a radiação solar para produção de energia e tem como principal vantagem não produzir emissões durante o seu tempo de vida. Nos últimos anos, ocorreu uma grande aposta a nível mundial nesta tecnologia como fonte de energia. Sendo uma tecnologia quase madura, ainda tem margem para desenvolvimento com o objectivo de aumentar a eficiência de conversão do PV, reduzir custos e matéria-prima associados aos processos produtivos e melhorar a eficiência energética e ambientais dos seus processos.

Embora o PV seja reconhecido como a tecnologia mais limpa na produção de electricidade, algumas pessoas argumentam que a energia consumida no seu ciclo de vida é superior à energia produzida durante a sua vida útil.(Peng, 2013)

Torna-se assim importante efectuar a análise de ciclo de vida (ACV) à tecnologia fotovoltaica de maneira a ser possível contabilizar os impactes ambientais gerados ao longo do ciclo e poder ser comparado com outras tecnologias.

1.2. Objectivo

Nesta dissertação pretende-se efectuar uma caracterização do desempenho ambiental da tecnologia fotovoltaica em Portugal, numa perspectiva de análise de ciclo de vida (ACV) e uma posterior comparação à tecnologia hídrica, tecnologia eólica e gás natural. Esta análise apoia-se em dados reais obtidos através de uma empresa portuguesa a trabalhar na área da construção de painéis fotovoltaicos.

1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada do seguinte modo:

Capítulo 1 – Introdução

Neste capítulo é feito um enquadramento e assinalados os objectivos principais do trabalho.

Capítulo 2 – Revisão da Literatura.

Neste capítulo foi realizado o enquadramento geral ao tema, abordando o sistema energético em Portugal, a tecnologia fotovoltaica, o método ACV e uma revisão do estado de arte do ACV da tecnologia fotovoltaica.

Capítulo 3 – Metodologia

Neste capítulo são descritas as fases do trabalho e o método EcoBlok, bem como os indicadores utilizados.

Capítulo 4 – Resultados

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados da análise.

Capítulo 5 – Conclusões

Por último, neste capítulo são enunciadas as principais conclusões do estudo.

2. Revisão da Literatura

2.1. Sistema energético de Portugal

O consumo energético mundial encontra-se em constante mudança devido às preocupações com as alterações climáticas, provocadas pelo aumento das emissões de GEE, por força da economia ligada à procura de energia.

Portugal, sendo um país com poucos recursos energéticos fósseis endógenos como petróleo, gás natural e carvão, que têm um peso bastante significativo no mix energético do país, está sujeito a uma elevada dependência energética exterior na ordem dos 80 e 90%. Com as propostas da União Europeia (EU), nomeadamente a Directiva 28/2009/CE, introduziu-se a obrigatoriedade dos países membros da EU submeterem um plano de promoção da utilização de energias provenientes de fontes renováveis. Outra importante Directiva referente à eficiência energética na União Europeia é a 32/2006/CE. Portugal apresentou, nos últimos anos, uma crescente aposta nas energias renováveis principalmente na eólica, permitindo baixar a sua dependência para níveis inferiores a 80%, apresentando, em 2014, o valor de 71% (figura 2.1). Contudo, estes valores ainda estão acima da dependência média da União Europeia, situada na ordem dos 53%, segundo dados de 2013.

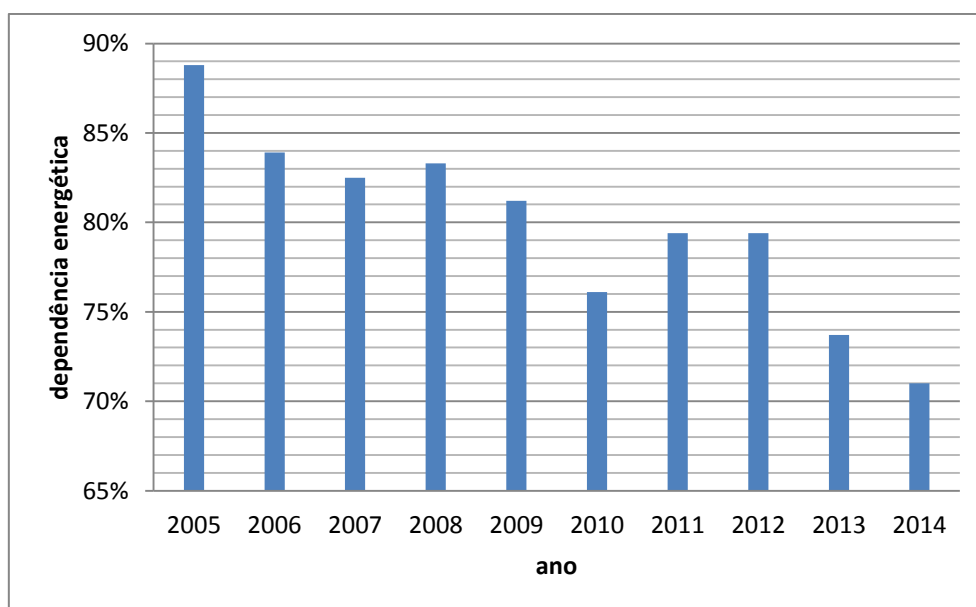


Figura 2.1 - Evolução da dependência energética de Portugal, fonte: DGEG,2015.

Face à escassez de recursos energéticos fósseis endógenos, Portugal começou a apostar nos seus recursos renováveis endógenos, contribuindo para a redução da dependência energética. Importa referir que em anos hidrológicos secos, a dependência energética aumenta em consequência da diminuição de água disponível para a produção de energia pelas centrais hídricas (DGEG, 2015).

Produção de energia em Portugal

Nos dias de hoje, a produção de electricidade tornou-se uma actividade completamente liberalizada, funcionando como um mercado livre de concorrência, possibilitando o aparecimento de vários comercializadores de energia e uma maior escolha para os consumidores (EDP, 2015).

A produção de electricidade é executada em dois regimes legais: regime ordinário (PRO) relativo à produção com base em fontes tradicionais não renováveis e em grandes centros electroprodutores hídricos, e o regime especial (PRE), relativo à cogeração e produção eléctrica a partir de fontes de energia renováveis (REN, 2015). Ao abrigo do Decreto-Lei 189/88 de 27 de Maio, considera-se uma PRE uma produção de energia eléctrica através da utilização de recursos endógenos renováveis (não entrando as grandes centrais hídricas), cogeração (produção combinada de calor e electricidade), (ERSE, 2015).

Há alguns anos atrás, a produção energética em Portugal era predominantemente de origem térmica, mas tem vindo a diminuir face à aposta na produção de energia, a partir de fontes renováveis, principalmente do aproveitamento solar fotovoltaico, parques eólicos, centrais mini- hídricas e centrais térmicas de combustão de biomassa ou gás natural (figura 2.2), (ERSE, 2015).

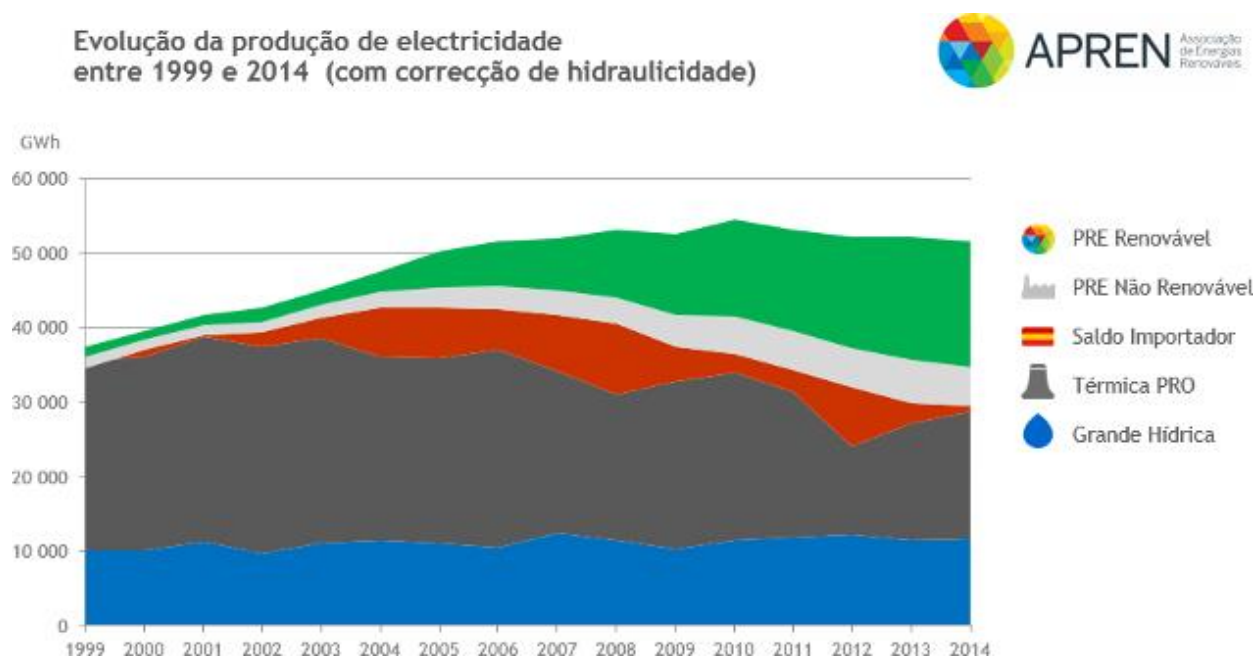


Figura 2.2 - Evolução da produção de electricidade entre 1999 e 2014, (Fonte: APREN,2015)

Em 2014, a contribuição da produção eléctrica renovável foi de 54,9%, sendo os maiores responsáveis por este resultado a grande hídrica, com 22,4% da produção, e dentro do sector das PRE, a produção eólica, com 23,2%, seguida da biomassa com 5,2%, as mini hídricas com 2,5%, a solar com 1,2% e, por fim, a geotérmica com 0,3% (figura 2.3), (APREN, 2014).

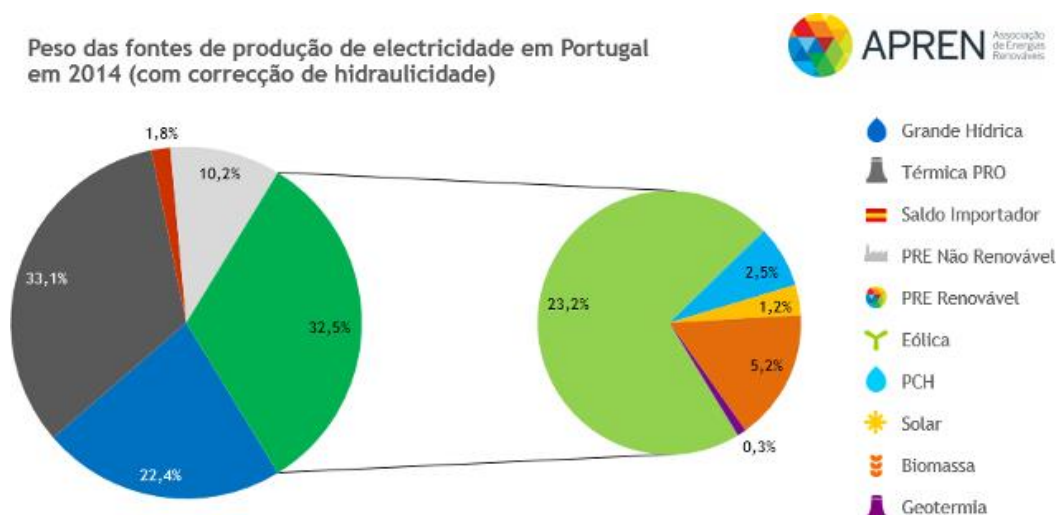


Figura 2.3 - Peso das fontes de produção de electricidade em Portugal em 2014. Fonte: APREN,2015

Produção de energia fotovoltaica em Portugal

A localização geográfica de Portugal é bastante favorável ao aproveitamento de energia solar, sendo um dos países europeus com maiores potencialidades neste sector. Portugal dispõe de um número médio anual de horas de sol compreendido entre 2200 e 3000 horas, no continente, e entre as 1700 e 2200 horas nos arquipélagos. Por sua vez a Alemanha dispõe anualmente de 1200 a 1700 horas, liderando a produção de energia fotovoltaica na Europa. (DGEG,2015) (Statista, 2014)

Em Portugal, desde 2006 a 2015, houve uma evolução da potência instalada residual de 3 MW, para 437 MW valores em Maio de 2015, fruto dos regimes bonificados para a produção de energia fotovoltaica e das produções de mini/microgeração (DGEG, 2015).

No ano de 2014, a energia eléctrica fotovoltaica registou o valor de 633 GWh produzidos. Observando os valores de 2015 (ano-móvel: Junho de 2014 a maio 2015), é possível constatar um aumento da produção para 718 GWh (figura 2.4) e um aumento de 85GWh face ao ano anterior, justificado pela entrada em funcionamento de nove centrais fotovoltaicas de concentração, totalizando uma potência de 13MW. A zona do Alentejo é responsável por 38% da produção fotovoltaica nacional, seguida da zona de Lisboa com 20% e zona Centro com 15%. É de notar a fraca produtividade na zona do Algarve que apresenta a segunda melhor média de horas equivalentes de produção (figura 2.5). (DGEG, 2015)

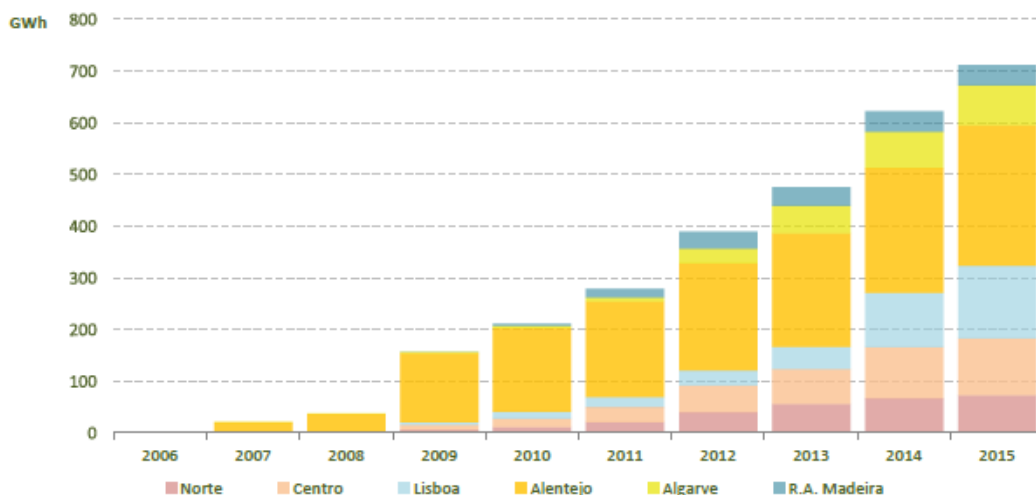


Figura 2.4- Produção anual GWh por região de Portugal, fonte DGEG,2015

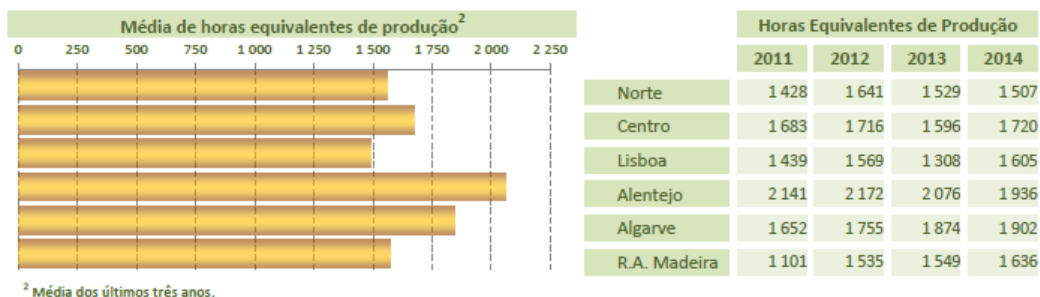


Figura 2.5 - Médias anuais de horas equivalentes de produção em Portugal, fonte:DGEG,2015

2.2. Tecnologias fotovoltaicas

O sistema fotovoltaico (PV) usa células para converter a radiação solar em electricidade. Uma célula é constituída por materiais semicondutores simples ou compostos com capacidade de converter a luz do sol em electricidade, tirando proveito de efeito fotovoltaico. O efeito fotovoltaico ocorre quando a radiação electromagnética associada a um feixe luminoso é convertida em energia eléctrica (corrente e tensão) ao incidir na superfície de uma junção semicondutora. A junção semicondutora mais comum é formada por duas camadas: camada tipo-p, onde existe um excesso de carga positiva e camada tipo-n com excesso de carga negativa, que, quando excitadas, criam um fluxo de corrente. O material mais usado no fabrico de células é o Silício (Si), um recurso bastante abundante. Para melhorar o rendimento das células procede-se à dopagem com recurso a boro (B) e a fósforo (P). As células são ligadas entre si em série e/ou paralelo, formando assim um módulo fotovoltaico (Martins, 2012).

Primeira geração

A primeira geração é caracterizada pela tecnologia das células de silício cristalino (Si-c), que actualmente representa 87% do mercado do PV (EPIA, 2015).

Esta geração integra o silício monocristalino (Si-c mono), policristalino (Si-c poli) e string ribbon. A diferença entre o silício Si-c mono e Si-c poli é a estrutura dos cristais: no Si-c mono a estrutura dos cristais tem de estar perfeitamente ordenada, no Si-c poli os cristais estão desordenados. O Si-c mono apresenta eficiências na ordem dos 16% a 24% e representa cerca de 30% do mercado, por sua vez, o Si-c poli apresenta eficiências na ordem dos 14% a 17% e representa cerca de 60% do mercado. O silício do tipo string ribbon, com uma eficiência de cerca de 18%, caracteriza-se pelo diferente crescimento dos lingotes, sendo utilizado um laser para os cortes verticais das bolachas de silício. Esta técnica permite que os custos diminuam devido à utilização eficiente da matéria-prima e não é necessário serrar e posterior ataque químico (Gonçalves, 2014).

As principais vantagens desta geração são a abundância de Si (SiO_2 – areia), o facto de ser uma tecnologia simples e bastante desenvolvida, de não provocar graves consequências para o meio ambiente, sendo a eficiência de conversão relativamente elevada, além de ter uma indústria bem estabelecida e de as células terem boa estabilidade e longo tempo de vida, nomeadamente entre 20 a 30 anos. A principal desvantagem diz respeito ao custo de purificação do silício (Martins, 2012).

Segunda geração

A segunda geração, caracterizada pela tecnologia de película fina (thin film) veio responder à necessidade de redução do consumo de silício e aposta em outras matérias-primas. Esta tecnologia consiste em depositar camadas ultra finas de material fotossensível em substratos de baixo custo (plástico, vidro, aço inoxidável). Devido ao seu reduzido peso é ideal para integrar telhados e fachadas de edifícios (Gonçalves 2014).

A principal tecnologia é a do silício amorfo, bastante usada em relógios, calculadoras ou na electrónica profissional. Esta apresenta eficiências de conversão na ordem dos 5% a 7%, custos de produção mais baixos, e apresenta uma gama de luminosidade mais alargada, sendo capaz de produzir iluminação difusa e em interiores. É também de realçar nesta tecnologia, as células de telureto de cádmio (CdTe), as células de CIS (cobre-indio-selénio) e CIGS (cobre-índio-gálio-selénio) (Proença, 2007).

Terceira geração

O principal objectivo desta geração é alcançar grandes eficiências com os mesmos custos de produção da primeira e segunda geração. Nesta categoria englobam-se as tecnologias células nanocristalinas, híbridas, dopadas com corantes, microcristalina e orgânicas. A maioria destas tecnologias ainda se encontra em fase de desenvolvimento. É ainda de salientar as células de arsenieto de gálio (GaAs), que apresentam um rendimento entre os 25% e os 30%. Estas células já são bastante usadas, mas apenas em casos especiais como concentradores fotovoltaicos e aplicações espaciais, devido ao seu custo elevado de produção (Gonçalves, 2014).

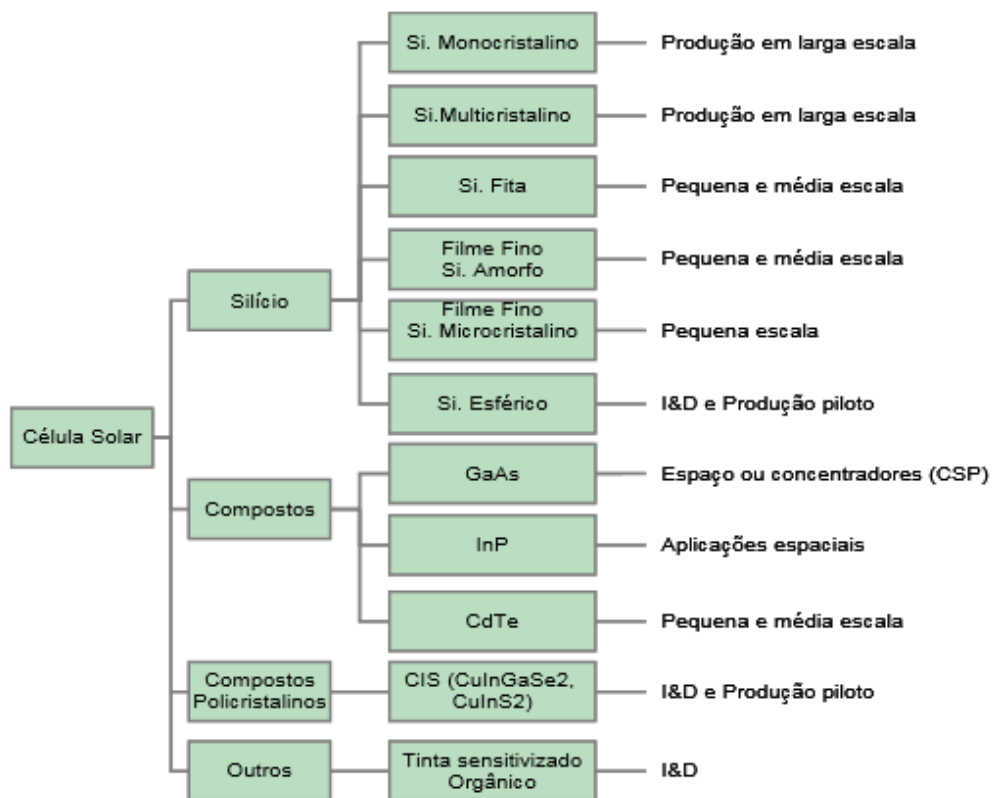


Figura 2.6 - Tecnologias de células fotovoltaicas existentes, fonte: Proença, 2007

Componentes

Os sistemas fotovoltaicos são compostos por módulos e por um conjunto de componentes designados por balance of system (BOS), nomeadamente inversores, baterias e componentes eléctricos e suporte dos painéis. O seu uso ou não uso depende do tipo de instalação efectuada.

Os inversores são responsáveis pela conversão da corrente contínua (DC) produzida pelos módulos para corrente alterna (AC), necessária para integrar na rede e para o uso da maioria dos electrodomésticos, ocorrendo perdas associadas a esta conversão. As baterias são usadas para armazenar energia produzida em excesso. Esta energia é usada quando não há produção por parte dos painéis. As mais utilizadas são as de chumbo-ácido, devido ao seu baixo custo, apresentando um tempo de vida na ordem dos 5 a 8 anos. Também podem ser usadas baterias de níquel-cádmio com

tempo de vida na ordem dos 10 a 15 anos, embora com custos mais elevados. Este constituinte é usado maioritariamente em sistemas autónomos, sendo o mais caro do sistema. Os controladores de carga permitem que não ocorram sobrecargas ou descargas totais na bateria e podem fornecer informações do sistema.

As instalações fotovoltaicas podem ser ligadas à rede (on-grid) onde o sistema está ligado à rede pública e a energia produzida é directamente injectada na rede eléctrica ou autónomas (off-grid), onde o sistema não está ligado à rede e a energia produzida não consumida é armazenada em baterias.

Ao instalar um sistema PV é necessário ter em conta alguns factores importantes como o ângulo de inclinação dos painéis, normalmente com um ângulo igual à latitude do local; a orientação, devendo os painéis estar sempre orientados para sul no hemisfério norte e para norte no hemisfério sul; e sombreamento, pois este afecta a produtividade do painel (Gonçalves, 2014) Martins, 2012).

O suporte para os painéis depende do tipo e local de instalação do sistema PV. Os sistemas podem ser implementados em suportes fixos ou suportes com seguidor solar. São utilizados os suportes fixos quando os sistemas são aplicados em telhados ou fachadas de edifício, coberturas ou em campo. Neste tipo de instalação, os painéis são instalados com o ângulo óptimo de produção em estruturas fixas. Os suportes com seguidor solar são implementados normalmente em campo ou propriedade aberta. Neste tipo de instalação dos painéis, estes são instalados numa estrutura com a capacidade de seguir o movimento do sol ao longo do dia aumentando a produção do sistema. Este tipo de instalação consegue captar mais 30% de radiação em comparação com os sistemas fixos (Gerbinet, 2014).

2.3. Fundamentos de Análise de Ciclo de Vida

A Análise de Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica que tem como principal objectivo avaliar vários aspectos relacionados com o desenvolvimento de um produto ou serviço e o seu potencial impacte durante a sua vida. Esta técnica engloba e avalia as diversas entradas (inputs) e saídas (output) e impactes ambientais de um sistema.

Esta ferramenta permite analisar potenciais impactes ambientais utilizando indicadores. A caracterização dos indicadores utilizados é muito extensa, dependendo da técnica que é utilizada, do âmbito e dos objectivos que se pretendem alcançar. A ACV tem a vantagem de poder ser facilmente alterada quando são encontrados novos dados científicos ou as tecnologias do estudo em causa são melhoradas (Varun, 2009) .

Com uma abordagem “cradle-to-grave”, a ACV tem início na extracção da matéria-prima e termina quando esta é devolvida à sua origem (aterro). Considerando os processos intermédios da transformação, produção e utilização, é possível estimar os impactes acumulados ao longo da cadeia. Assim é possível observar, numa perspectiva mais clara e precisa, as implicações reais associadas à criação de um produto ou processo a nível ambiental.

O actual quadro de regulamentação e directrizes para a realização de ACV é definido pelas normas ISO14040 e ISO 14044.

De acordo com a norma ISO 14040, a metodologia da técnica de ACV engloba quatro fases principais (figura 2.7), dispostas no seguinte formato (ISO 14040, 2006):

- a) Definição do âmbito e objectivo da análise a efectuar;
- b) Elaboração de um inventário dos processos envolvidos e respectivos fluxos de materiais e energia;
- c) Avaliação dos impactes ambientais;
- d) Interpretação dos resultados das fases de inventário e avaliação, considerando os objectivos estabelecidos.

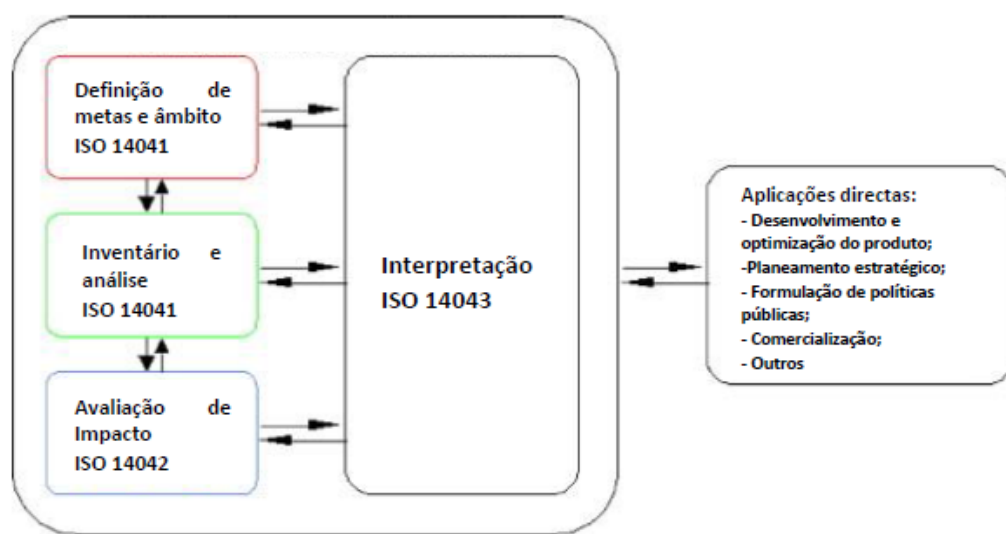


Figura 2.7 - Quadro de ACV, adaptado (ISO 14040, 2006).

Na definição do âmbito e objectivo deve-se documentar e justificar os objectivos do estudo de ACV, referindo o seu propósito e especificando as aplicações do resultado, as fronteiras temporais e espaciais, assim como os dados pretendidos. É importante ainda definir a metodologia de avaliação de impactes a ser implementada.

Na fase do inventário são especificadas as entradas (inputs) e saídas (outputs) do sistema considerado e é elaborado um modelo do ciclo de vida do mesmo. Estes fluxos incluem as emissões para o ar, resíduos, consumo ou depleção de energia e efluentes hídricos. Nesta fase ocorre o processamento dos dados, análise de resultados e se necessário, uma redefinição das fronteiras do sistema.

Na avaliação dos impactes procede-se à avaliação da magnitude e importância das pressões ambientais resultantes do ciclo de vida em estudo. Existem alguns elementos obrigatórios incluídos nesta etapa que são descritos em seguida:

- a) Selecção das categorias de impacte, indicadores de categoria e de modelos de caracterização;

- b) Classificação – atribuição dos resultados do inventário de ciclo de vida a categorias de impacto ambiental;
- c) Caracterização – cálculo dos indicadores de categoria (selecção de um “peso” a cada categoria, consoante o seu contributo para o efeito dessa categoria);
- d) Perfil ambiental do produto – soma dos resultados obtidos em cada substância no passo de caracterização, obtendo-se um valor único para cada categoria de indicadores;

Nesta fase é frequente o uso de programas/sistemas informáticos para processar os dados (Higino, 2014).

Os indicadores utilizados na ACV variam consoante a metodologia utilizada, sendo os mais utilizados os indicadores de impacto e indicadores de pressão. Os indicadores de impacto são mais adequados para uma avaliação rigorosa dos efeitos ambientais, contudo têm o inconveniente de a recolha de dados ser muito extensa, demorada e muito difíceis de padronizar, pois traduzem características específicas da envolvente. Os indicadores de pressão correspondem a aspectos ambientais, mas fáceis de medir e de padronizar, como o consumo de recursos naturais, emissões poluentes e outras acções que podem degradar o ambiente (Macedo, 2005).

Vantagens e limitações

A ACV é a metodologia mais adequada para identificar os impactes ambientais gerados entre os vários estágios do ciclo de vida.

Podem-se referir como principais vantagens:

- Desenvolver uma avaliação sistemática das consequências ambientais associadas a um dado produto;
- Analisar os balanços (ganho e perda) ambientais associados a um ou mais produtos/processos específicos, de modo a auxiliar a tomada de decisão;
- Quantificar as descargas ambientais de cada fase do ciclo de vida e identificar os processos que mais contribuem para os impactes;
- Avaliar os efeitos do consumo de materiais e descargas ambientais sobre os ecossistemas e saúde humana, a nível local, regional e global;
- Comparar os impactes ecológicos e na saúde humana entre dois ou mais produtos/processos rivais ou identificar os impactes de um produto ou processo específico;
- Identificar impactes em uma ou mais áreas ambientais específicas de interesse.

Como qualquer metodologia sujeita a limitações, esta não foge à regra, apresentando as seguintes limitações:

- A realização de uma ACV pode ser muito morosa e requerer elevada quantidade de dados;

- Dependendo do quão rigoroso é o estudo, a recolha e disponibilidade de alguns dados pode ser problemática, podendo pesar na fiabilidade dos resultados finais;
- Os acordos de confidencialidade a longo prazo que se estabelecem entre companhias, fornecedores e vendedores, podem representar um obstáculo de acesso a dados específicos;
- O estudo ACV não determina se o produto ou processo é mais caro ou funciona melhor;
- Na avaliação de impactes, a complexidade dos sistemas ambientais levou ao desenvolvimento de vários modelos de impactes, não existindo consenso que refere ao seguimento de apenas um modelo.
- A conversão dos resultados dos impactes num único resultado, na fase de interpretação do ciclo de vida, é sempre muito subjectiva, pois requer juízos de valor aplicados pelo administrador ou modelador do estudo.
- Falta de interesse por parte dos produtores e decisores políticos sobre a importância dos impactes ao longo do ciclo de vida de actividades e processos (Flôxo, 2012)(EPA, 2008).

Streamlined ACV

Dependendo da complexidade do objecto de estudo, uma ACV pode ser um processo bastante longo, complexo e exigente. As limitações associadas à elaboração deste tipo de análise conduziram à criação de uma abordagem que permitisse simplificar o processo, contornando problemáticas como o custo ou o tempo necessários na recolha de dados requeridos, denominada por *streamlined*. Esta abordagem preserva as características próprias de uma ACV limitando-se apenas a tornar todo o processo mais simples e aplicável (Higino, 2014).

Alguns dos métodos sugeridos para a simplificação (streamlining) da ACV incluem:

- A limitação ou eliminação de etapas do ciclo de vida – eliminar alguns dados a montante ou a jusante do sistema em estudo, encurta ou limita a quantidade de dados recolhidos;
- Selecção de impactes ambientais específicos – através desta abordagem é possível focar o estudo nos aspectos ambientais considerados mais relevantes, ou em que existem mais dados disponíveis e quantificáveis;
- Eliminação de parâmetros de inventário específicos – reduzir o âmbito do inventário também pode ser uma forma de facilitar a fase de recolha de dados;
- Limitação ou eliminação da fase de avaliação de impactes – muitos estudos de ACV não incluem a fase de avaliação de impactes, sendo mais correctamente denominadas por inventários de ciclo de vida. Esta abordagem é considerada como *streamlining* visto que a fase de inventário é apenas uma parte do instrumento da ACV;
- Utilizar dados tanto qualitativos como quantitativos – nesta abordagem, é recolhida informação qualitativa quando não se encontra disponível informação quantitativa. Os fluxogramas construídos para o estudo incluem os processos e materiais, mas não constituem

verdadeiros balanços de massa, visto que não incluem dados quantitativos em cada etapa do ciclo de vida;

- Utilizar dados de substituição – na eventual ausência de dados reais que permitam a continuidade do processo e uso de dados qualitativos e menos precisos;
- Limitação dos constituintes estudados. Alguns estudos de ACV eliminam os constituintes de um sistema que englobam menos de uma determinada percentagem do produto ou processo (Curran, 1996).

Unidade funcional

A unidade funcional tem como objectivo permitir quantificar o desempenho do produto ou do serviço ao executar a função associada, constituindo uma referência em relação à qual se realiza o inventário. Esta fornece uma referência quantitativa das entradas e saídas do sistema, permitindo que todos os processos, actividades ou serviços sejam analisados e comparados para uma mesma unidade.

A definição de uma unidade torna processos de comparação e análise de sistemas mais simplificada, por isso esta deve ser claramente definida e mensurável. Um sistema energético pode ser avaliado através de duas perspectivas: a realização de um serviço energético ou a produção de energia eléctrica (Higino, 2014).

2.4. Ciclo de vida da tecnologia fotovoltaica

O ciclo de vida da tecnologia fotovoltaica é constituído por várias etapas, desde a extracção da matéria-prima à sua deposição em aterro ou reciclagem, como mostra a figura 2.8.

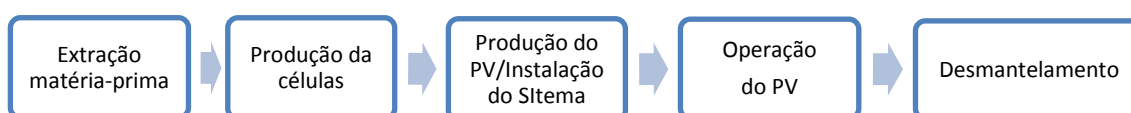


Figura 2.8 – Fases ciclo de vida do PV, fonte:(Fthenakis & Kim 2011).

O ciclo de vida inicia-se com a extracção de sílica, uma matéria-prima muito abundante na terra e maioritariamente extraída da areia.

De seguida vem a produção da célula. Nesta fase ocorre o maior consumo energético do ciclo de vida. A areia é colocada num forno de arco eléctrico, para que ocorra redução e se transforme em silício metalúrgico (mg-Si) com um grau de pureza de 98%, o que não é suficiente para produzir células fotovoltaicas. De seguida, ocorre a purificação do mg-Si dependendo do seu uso final, este é purificado recorrendo a diferentes métodos. Para a produção de silício electrolítico (e-Si) é utilizado o processo de Siemens. Este processo ocorre num reactor onde SiHCl_3 (triclóreto de silício) e hidrogénio são aquecidos a 1100-1200°C para reagirem. Na produção de Silício solar (sog-Si) usa-se

maioritariamente o processo de Siemens modificado onde se faz reagir silano (SiH_4) e hidrogénio, a temperaturas na ordem dos 800°C , consumindo menos energia. Após estes processos, o sog-Si e e-Si são derretidos e arrefecidos para formar os lingotes. O corte destes lingotes origina as bolachas de silício. As bolachas de Si-c poli podem ser directamente obtidas através do sog-Si, por outro lado, as bolachas de Si-c mono necessitam de passar pelo processo de Czochralski, onde o silício é fundido e extraído lentamente para formar um cristal único com a mesma orientação do cristal. Geralmente, as bolachas de silício são cortadas com as dimensões de $156*156 \text{ mm}^2$, sendo que a espessura para as Si-c mono é de $180\text{-}270 \mu\text{m}$ e para Si-c multi é de $180\text{-}240 \mu\text{m}$. Para se formar a célula, as bolachas de silício passam pelas seguintes etapas: lavagem, momento em que onde as bolachas são sujeitas a banhos químicos de maneira a remover fissuras microscópicas e marcas do corte; dopagem, que origina a junção p-n; o metalizar da face frontal e posterior para os electrões serem recolhidos; aplicação de um revestimento anti-reflexo na face frontal para aumentar a radiação e aumentar a eficiência e, por fim, uma verificação das características eléctricas e eficiência da célula.

Na Montagem do PV, as células são conectadas em cadeia com contactos de prata, alumínio ou cobre na parte frontal e posterior, através de uma evaporação a vácuo. Depois são incorporadas duas camadas de espuma vinílica acetinada (EVA), uma em cada lado para proteger dos elementos físicos durante a operação, de seguida é aplicada uma camada de vidro com baixo teor de ferro na face frontal e uma camada de tedlar na face posterior. O painel é finalmente moldado sobre pressão e calor e as conexões são isoladas. Por fim, são adicionadas molduras de alumínio para dar solidez e facilitar na instalação e alguns elementos BOS. Os painéis produzidos são enviados para os consumidores e posteriormente instalados com os BOS conforme a sua finalidade (Stoppato, 2008; Fthenakis & Kim, 2011; Peng, 2013)(Stoppato,2008).

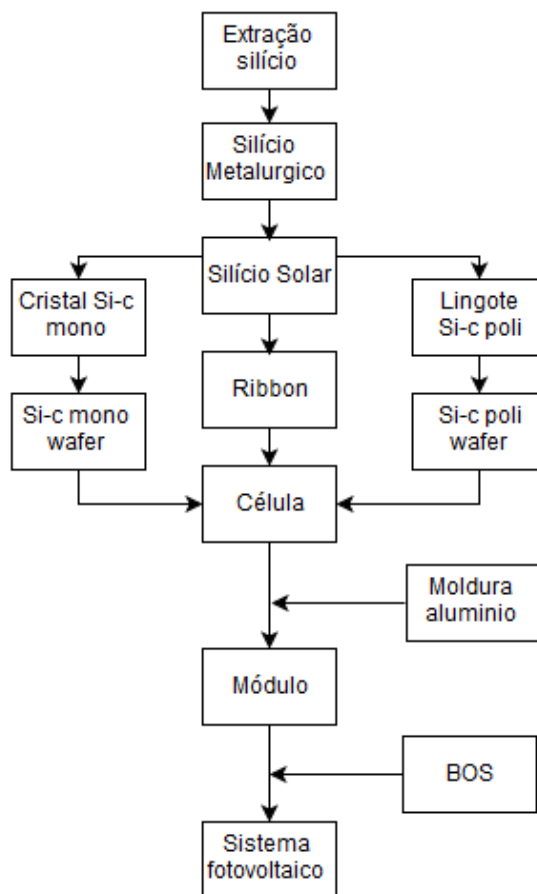


Figura 2.9 - Fluxo da extração matéria-prima até instalação do sistema, adaptado (Fthenakis & Kim 2011).

Durante a operação do PV com o tempo máximo 30 anos de funcionamento, é necessário proceder à manutenção casual do sistema, lavando os painéis e fazendo a revisão ao sistema eléctrico. Durante o seu funcionamento o PV não produz emissões poluentes. Nesta fase existem alguns parâmetros que podem afectar ACV, como por exemplo a performance electrónica do sistema, a irradiação do local, o tipo de instalação do sistema, a eficiência de conversão, o tempo de vida e a eficiência de produção de electricidade. Durante o tempo real de operação ocorrem outras perdas devido à degradação gradual das células PV, influências ambientais, orientação e ângulo do painel, sujidade do painel, sombreamento e mau funcionamento do inversor (figura 2.9), (Peng, 2013).

Por fim, o final do ciclo corresponde ao desmantelamento. Quando o painel chega ao fim-de-vida é recolhido e direccionado para entidades competentes na área de recolha de resíduos que procedem ao seu desmantelamento, enviando alguns componentes para reciclagem e os que não podem ser reciclados para aterro. A obrigatoriedade da reciclagem dos PV foi imposta pelo Decreto-Lei nº 67/2014, de 7 de Maio, na sequência da transposição da Directiva 2012/19/CE. No processo mais comum de reciclagem, 80% do painel é reaproveitado em peso. O processo inicia-se com a extração manual da moldura de alumínio e da caixa de junção. De seguida, o módulo é enviado para uma linha de reciclagem de vidro onde o vidro é separado das células fotovoltaicas. Neste processo são reciclados o cobre dos cabos, moldura de alumínio e o vidro (figura 2.10), (Olson, 2013).

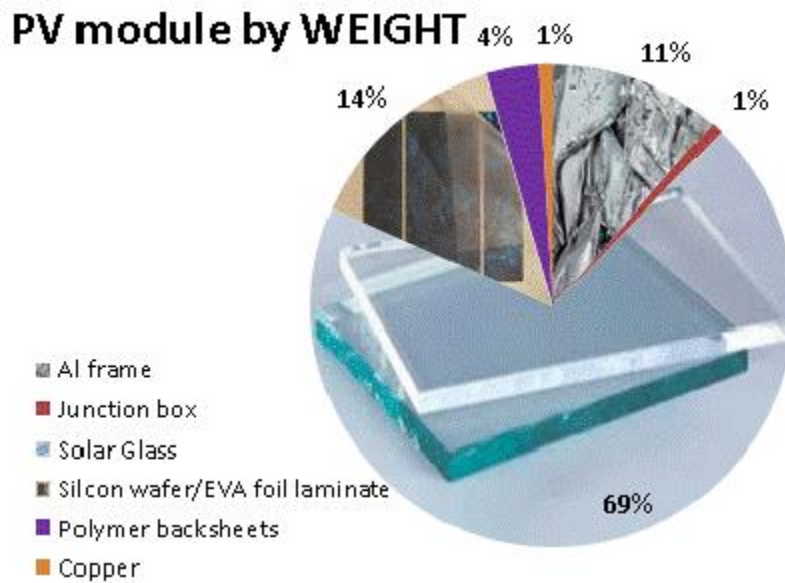


Figura 2.10 – Distribuição por peso dos constituintes do módulo PV, fonte:(Olson et al. 2013).

Num painel de 22,4 kg em que seja aplicado este tipo de reciclagem é possível reduzir, no perfil ciclo de vida, cerca de 16 kg CO₂ eq e cerca de 190 MJ de energia primária proveniente de recursos não renováveis (Fraunhofer, 2012).

Há outros métodos que estão a ser equacionados para que seja possível reciclar as bolachas de silício. Estes recorrem a tratamentos térmicos e químicos para tratar as bolachas de silício. Num dos métodos, o painel é submetido a pirolise para vaporizar o polímero de EVA a cerca de 500 ° C. De seguida, a célula solar é submetida a várias etapas de decapagem para remover os contactos de metal, o revestimento anti-reflexo. Outra abordagem é a dissolução química de EVA, utilizando-se o ácido o-diclorobenzeno em combinação com a irradiação de ultra-sons, que acelera o tempo de dissolução de 7 dias para 30 minutos (Olson, 2013).

2.5. Revisão do estado de arte da análise ciclo de vida da tecnologia fotovoltaica

Tabela 2-1 – Revisão de métodos, dados e indicadores utilizados na ACV do PV.

Autor	Data	Objectivos	Métodos/dados	Âmbito geográfico	Indicadores
Yang et al.	2015	ACV dos painéis multi-cristalinos produzidos na China considerando comércio internacional.	<ul style="list-style-type: none"> - Estudo considera painéis para aplicação no país e exportação; - Dados obtidos através RCEES 2012 e ecoinvent 2.1 database; - Software simapro 7.3; - Método usado CML2001. 	China	<ul style="list-style-type: none"> - Emissão GEE; - Recursos de matéria-prima; - Gases poluentes (ácidos); - Poluição água eutrofização; - Potencial de toxicidade humana; - Ecotoxicidade da água potável, água do mar e da terra; - Degradação camada do ozono; - Oxidação fotoquímica.
Gerbinet et al.	2014	Apresentar uma revisão precisa das várias ACV efectuadas à tecnologia fotovoltaica.	- Convencional ACV metodologia mais usada eco-indicator99 e CML2001.	Mundial	<ul style="list-style-type: none"> - Balanços de energia (payback time); - GEE; - Social e Custos.
Fthenakis et al.	2012	ACV dos painéis de silício monocristalino de alto rendimento.	<ul style="list-style-type: none"> - IEA task 12 guideline; - Dados ecoinvent; - Software sima pro. 	USA	<ul style="list-style-type: none"> - Balanço energia; - GEE.
Kreiger et al.	2013	ACV da reciclagem de silano na produção de silício amorfo.	<ul style="list-style-type: none"> - Software sima pro; - Base dados ecoinvent 2.2. 	USA	- GEE.
Varun et al.	2008	ACV das energias renováveis para sistemas produção de electricidade.	Não disponível	Não disponível	- GEE
Peng et al.	2013	Revisão sobre avaliação ciclo de vida dos 5 tipos de sistemas PV.	Não disponível	Mundial	<ul style="list-style-type: none"> - GEE; - Balanço de energia.
Sherwani et al.	2009	Revisão da ACV do silício amorfo, mono e policristalino para produção de painéis PV.	Não disponível	Mundial	<ul style="list-style-type: none"> - GEE; - EPBT.
Wender et al.	2014	ACV de tecnologias PV emergentes.	Não disponível	Não disponível	Não disponível
Fthenakis et al.	2011	Realizar ACV a sistemas PV.	Não disponível	Não disponível	-GEE e EPBT
Stoppato	2008	ACV da electricidade produzida por sistemas PV.	- Software Boustead model V5.0	Não disponível	- EPBT.
Kannan et al.	2005	ACV de um sistema PV de 2,7 kWp instalado em Singapura.	Não disponível	Singapura	<ul style="list-style-type: none"> - Balanço energia; - GEE.
Pacca et al.	2007	Identificar os parâmetros que vão afectar a performance do ciclo de vida das tecnologias e sistemas PV.	- Software simapro 6.0	Não disponível	<ul style="list-style-type: none"> - EPBT; - GEE; - Rácio de energia.
Zhong et al.	2011	ACV de um módulo fotovoltaico de silício policristalino e uma turbina eólica.	<ul style="list-style-type: none"> - Software simapro; - Base dados ecoinvent; - Metodologia eco-indicator99. Análise em 2 cenários: <ul style="list-style-type: none"> - Fim de vida em aterro; - Fim de vida reciclagem. 	Não disponível	<ul style="list-style-type: none"> - Alterações climáticas; - Radiação; - Camada do ozono; - Acidificação/eutrofização; - Ecotoxicidade; - Uso solo; - Uso minerais; - Combustíveis fósseis.

A China é a maior produtora de painéis fotovoltaicos desde 2007. Os painéis de silício policristalino são os mais produzidos neste país, contando em 2010 com uma produção 10 GWp, correspondente a 45% da produção mundial. Desta produção, 90% é exportada para a Europa e para a América do Norte. Com estas taxas de exportação origina-se uma separação geográfica entre o consumidor e a poluição emitida durante o processo de fabrico. Sendo a China bastante rica em matérias-primas, é mais afectada com impactes ambientais do que os países de importam estes recursos. Na produção dos PV, alguns dos processos consomem elevadas quantidades de energia, sendo que a poluição de GEE gerada está muito dependente do mix energético. Na China, 79% de energia é gerada através carvão (Yang, 2015).

A Sunpower produz painéis Si-c mono com 20,1% de eficiência. Esta eficiência foi conseguida inovando no designe da célula, nos materiais e no inventário energético. Uma melhoria na eficiência resulta numa maior produção de energia e, por conseguinte, numa pegada ambiental menor por kW produzido. Para estes painéis, o tempo de retorno de energia (EPBT), quando instalados nos Estados Unidos ou no sul da Europa, é apenas de 1,4 anos, enquanto o menor EPBT médio para sistemas Si-c é de aproximadamente 1,7 anos. Estes módulos são capazes de produzir mais 45% de electricidade do que os painéis Si-c com eficiência média na ordem dos 14% (Fthenakis, 2012).

O silício amorfo é a célula solar com menor impactes para o ambiente. No processo de fabrico destas células, 85% do silano usado é desperdiçado, mas com um ciclo de recuperação/ "reciclagem", estas perdas podem baixar para os 17%, resultando em poupanças energéticas na ordem dos 81,700 GJ e numa redução de GEE na ordem dos 4400 t CO₂ na produção de 1 GW de silício amorfo (Kreiger, 2013).

Na tecnologia PV, as células mais comuns são Si-c mono, Si-c poli, silício amorfo, CdTe thin film e CIS thin film. Destes cinco tipos de células, o CdTe apresenta a melhor performance ambiental a nível do EPBT e emissões de GEE devido às baixas necessidades energéticas no seu ciclo de vida e à alta eficiência de conversão na ordem dos 15,8%. Por seu turno, Si-c mono é a pior a nível ambiental, pois são necessárias grandes quantidades de energia no processo de produção da célula. A energia necessária para a produção de Si-c mono e Si-c poli tem vindo a diminuir ao longo dos anos. A energia por unidade de área de Si-c diminuiu gradualmente do valor de 10000 MJp/m² em 1990s, para menos de 3000 MJp/m² em 2010, com o rápido crescimento da indústria fotovoltaica e contínuo melhoramento nas tecnologias de produção da célula. As principais razões que contribuíram para esta redução são as seguintes:

- O aumento da eficiência do uso de silício, incluindo a redução da espessura das bolachas de silício e a diminuição de perdas no processo corte;
- Novos processos de cristalização que reduziram o consumo de energia na produção de Si-c mono;

- Substituição do processo padrão de purificação de silício de grau electrónico, por um processo dedicado de purificação de silício para a indústria fotovoltaica;

- Reciclagem e reutilização do silício.

Com o avançar da tecnologia e revisão CV, foram propostas novas medidas com objectivo de reduzir o consumo de energia e os impactes ambientais gerados na produção Si-c, sendo elas a :

- Utilização do processo de produção de silício para indústria fotovoltaica,

- Redução do silício consumido;

- Melhoria da eficiência energética e crescimento de lingotes;

- Reciclagem de resíduos Si-c;

- Melhoria da eficiência energética na produção da célula, montagem do painel e reciclagem dos módulos em fim de vida (Peng, 2013).

Segundo Wender (2014), a ACV para tecnologias PV emergentes apresenta quatro limitações:

- Base de dados da produção e emissões dependem de dados históricos de sectores maduros;

- Não envolvência das partes interessadas para informar as decisões de modelagem;

- Falta de dados quantitativos que descrevam o destino, transporte e toxicidade de substâncias novas;

- Existência de abordagens de interpretação de comparação a resultados de ACV com elevada incerteza, apresentando critérios não resolvidos.

Segundo Kannan (2006), a tecnologia PV é uma boa opção para a produção de energia. Contudo, a produção de painéis em larga escala pode criar impactes ambientais a nível da disponibilidade da matéria-prima e eliminação resíduos. A prata necessária na produção de painéis PV pode contribuir para a escassez dos recursos de prata. Para satisfazer 5% da produção mundial de electricidade através de painéis PV, seria necessário 30% da produção de prata. No fim de vida do painel são geradas quantidades substanciais de resíduos. O encapsulamento dos módulos dificulta a recuperação das bolachas de silício.

Os painéis PV em fim de vida podem ter dois destinos: 1) o módulo e BOS não são reciclados, nem incinerados e são colocados em aterro, 2) os componentes dos módulos e BOS são separados e reciclados. No cenário de aterro, a análise revela que os componentes BOS não geram impactes ambientais significativos. A maior parte dos impactes vêm da eliminação de resíduos de plástico em aterro sanitário. As células fotovoltaicas constituem a maior parte do módulo PV em termos de peso, sendo depositadas num aterro para resíduos inertes. No cenário de reciclagem os painéis são desmontados e os componentes seguem para reciclagem. O que não pode ser reciclado segue para aterro ou inceneração. Os maiores benefícios são a reciclagem do alumínio e do vidro, sendo que os plásticos também podem ser reciclados, reduzindo assim alguns impactes. Outro aspecto é o

reaproveitamento de minerais escassos. O destino no fim de vida pode influenciar os impactos ambientais, porém, o pior caso é quando o lixo é colocado em aterro. No caso da inceneração, o calor produzido pode ser utilizado para produzir energia. A reciclagem é o método mais eficiente para o ambiente, poupando energia e recursos naturais (Zhong, 2011).

Os painéis de silício são os mais estudados por serem os mais utilizados. A produção de energia usando sistemas PV está livre de gases efeito de estufa e consumo de combustíveis fósseis. Todavia, a energia consumida e as emissões produzidas na produção, transporte e desmantelamento do PV têm grande peso no ciclo de vida do PV. A principal matéria-prima da tecnologia PV é o silício, um material bastante abundante na terra.

Observando as ACV da tecnologia PV a transformação do silício e montagem do painel são as principais fontes de impactos ambientais. Estas duas fases produzem bastante poluição e emissões GEE devido ao elevado consumo de electricidade e vários tipos de matéria-prima. O mix energético do país onde ocorre cada fase do ciclo de vida tem um papel fundamental nas emissões de GEE. A tecnologia Si-c mono apresenta-se como a que mais impactos gera no ciclo de vida e a tecnologia CdTe filme fino como a que produz menos impactos.

A metodologia avaliação de impactos CML quantifica catorze indicadores e cerca de vinte e cinco categorias de impacto divididas em três grupos: A, B e C. O grupo A está presente em quase todos os estudos de ACV e compreende, por exemplo, categorias como o esgotamento de recursos abióticos, as alterações climáticas e a destruição da camada de ozono estratosférica. O grupo B inclui categorias adicionais que podem ser aplicadas, mediante o âmbito e objectivo da ACV e a disponibilidade de dados apropriados. Entre essas categorias encontram-se, por exemplo, os impactos da radiação ionizante, o ar fétido e a ecotoxicidade dos sedimentos em água doce e salgada. O grupo C abrange categorias em que não é proposto nenhum método de caracterização para este modelo, mas que podem ser incluídas mediante a existência de métodos alternativos. Entre estas categorias encontram-se, por exemplo, o esgotamento de recursos bióticos e a água fétida.

A metodologia Eco-indicator tem como objectivo apresentar um instrumento simples e de fácil utilização em que os aspectos ambientais podem ser integrados no design do processo. Não é indicado para comparações públicas de produtos concorrentes face ao seu desempenho ambiental, nem para a condução de marketing ou a rotulagem ambiental. O seu propósito é o desenvolvimento de produtos melhores e mais limpos. Este modelo considera três categorias: esgotamento de recursos, saúde pública e qualidade dos ecossistemas.

3. Metodologia

3.1. Abordagem geral

Para a execução desta dissertação, primariamente, foi efectuada uma revisão bibliográfica com o objectivo de aprofundar conhecimentos e obter o suporte científico necessário sobre a energia fotovoltaica, o seu ciclo de vida, a metodologia de ACV e o método Ecoblok. Foram analisados diversos documentos científicos o mais actualis possível.

Numa segunda fase, foram efectuados contactos com empresas do sector de produção de painéis fotovoltaicos em Portugal, na perspectiva da aquisição de dados reais para o estudo em curso, sendo que apenas a OpenRenewables se mostrou disponível para colaborar com o estudo.

Numa terceira fase, fundamentou-se o inventário de ciclo de vida do PV. Neste ponto elaborou-se a cadeia de processos com base em artigos científicos e foi utilizada a base de dados ecoinvent para perceber as necessidades de cada processo. Averiguou-se a possível origem das matérias-primas e principais produtores de material fotovoltaico a nível mundial.

Numa quarta fase, foi aplicado o método Ecoblok para se adquirir os indicadores de desempenho necessários para avaliar o ciclo de vida do PV e ser possível comparar a tecnologia PV com outras tecnologias.

3.2. Âmbito e objectivos da análise de ciclo de vida

A realização desta ACV tem como objectivo avaliar o desempenho ambiental da tecnologia fotovoltaica em Portugal. Com esta análise é possível comparar esta tecnologia com outras formas de electroprodução.

A fronteira do sistema engloba os processos desde a extracção da matéria-prima até ao fim de vida dos painéis.

As unidades funcionais do estudo serão a produção de 1 kWp* de painéis fotovoltaicos e 1 kWh de electricidade produzida.

Na avaliação de impactes é aplicado o método EcoBlok, que tem como objectivo avaliar o desempenho ambiental de um produto, projecto ou organização, através de um conjunto de indicadores de desempenho ambiental, que são de fácil compreensão e recolha de informação. Os indicadores adoptados são do tipo pressão. Segundo a OCDE, estes indicadores caracterizam as pressões sobre os sistemas ambientais e podem ser traduzidos por indicadores de emissão de contaminantes, eficiência tecnológica, intervenção no território e de impacte ambiental.

* kWp - quilowatt pico, significa potência máxima obtida em condições ideais de 1000W/m² de irradiação, à temperatura de 25°C.

3.3. Inventário ciclo de vida e recolha de dados

Os painéis fotovoltaicos em estudo são de 250 Wp para a tecnologia Si-c mono e Si-c poli (anexo1).

Recorreu-se à base de dados Ecoinvent para fornecer dados dos inventários do ciclo de vida do PV. Esta base de dados foi desenvolvida pelo Swiss Centre for Life Cycle Inventorie em parceria com diversas entidades e inclui processos/dados frequentemente necessários para estudos de ACV.

O diagrama conceptual foi estruturado com base no artigo de Fthenakis & Kim, 2011.

Diagrama conceptual da tecnologia fotovoltaica

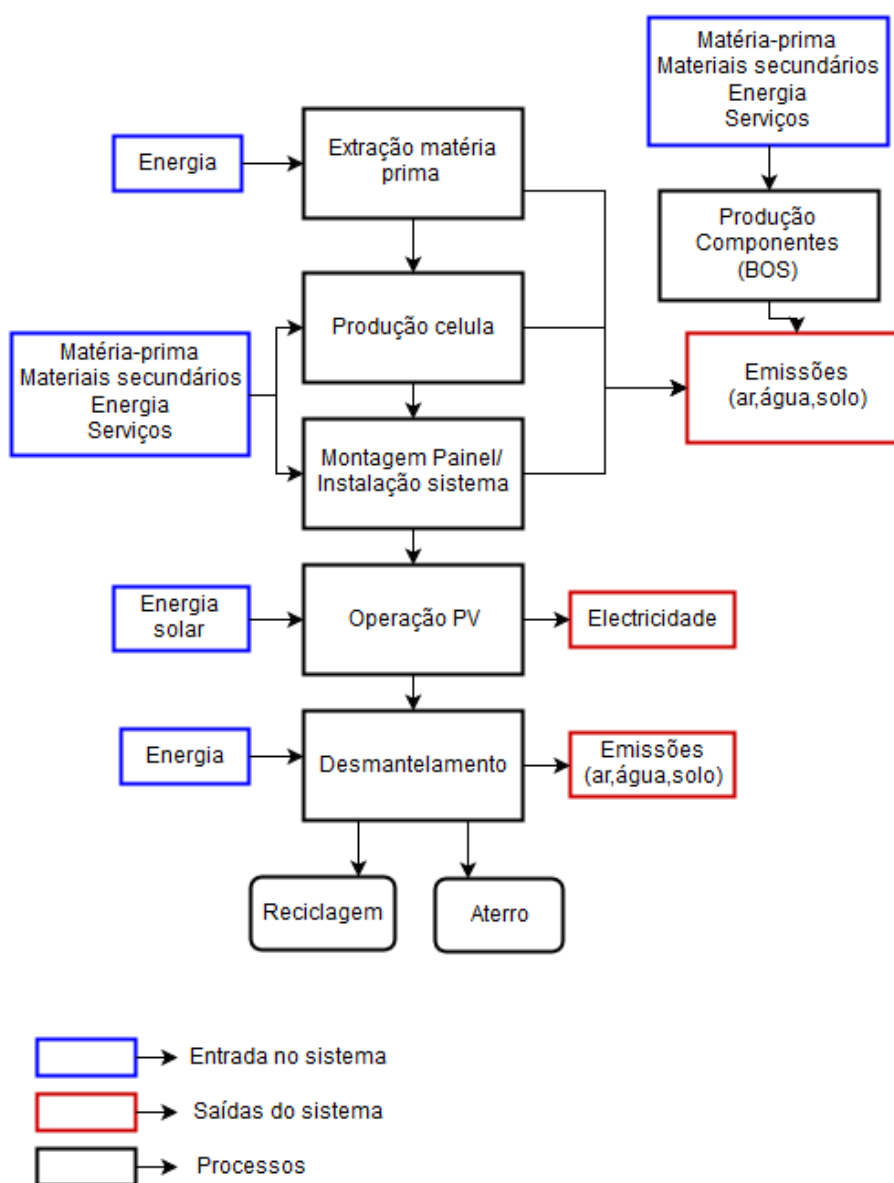


Figura 3.1 - Fluxos de entrada e saída das fases de ciclo vida da tecnologia fotovoltaica, fonte: adaptado Fthenakis,2011

Extracção de matéria-prima

Relativamente às principais matérias-primas, procurou-se localizar as principais fontes de extracção e processamento. (Tabela 3-1)

Tabela 3-1 – Três maiores exportadores matéria-prima e produtores mundiais, fonte:UN contrade, 2015; Statista, 2015;USGS, 2015

Matéria-prima	Maiores exploradores de matéria-prima	Maiores transformadores mundiais
Silício	USA – 45,5% Itália – 9,9% Turquia - 9%	China – 65% Rússia – 9,1% Noruega – 4,8%
Bauxite	Austrália – 29% Brasil – 15% Guiné – 5%	-
Cobre	Chile - 33% Peru - 15% Austrália – 10%	China – 34% Japão – 19% Índia – 12%
Alumínio	-	China-32% Rússia- 8.6% Canadá – 8.8%
Prata	México – 18% China – 16% Peru – 14%	-

Para a modelação desta fase apenas se considerou a extracção de silício. Recorreu-se à base de dadosecoinvent utilizando o inventário “sílica sand, at plant”. Este processo inclui a matéria-prima "sand, at plant", uma quantidade adicional de energia para secar e transportar areia (Kellenberger, 2007).

Para obter a quantidade necessária de kg de silício (tabela 3-2) verificou-se, nos processos doecoinvent, as necessidades de Si em cada processo, desde a montagem do painel até ao silício metalúrgico. De acordo com os relatórios doecoinvent são necessários 2,7 kg de silício para produzir 1 kg de mg-Si (Jungbluth, 2009).

Tabela 3-2 – Quantidade necessária de silício.

Tecnologia	kg silício
Si-c mono	36,5
Si-c poli	39,5

Produção da célula

Neste ponto, decidiu-se analisar as células fotovoltaicas monocristalinas e policristalinas. O modo de produção dos dois tipos de células é diferente na formação dos cristais.

Para a modelação recorreu-se à base de dados do ecoinvent, utilizando os inventários “photovoltaic cell, single-Si, at plant” e “photovoltaic cell, multi-Si, at plant”, a unidade de medida é m² de célula PV. Estes processos incluem as fases desde a produção silício metalúrgico até à produção da célula e a infra-estrutura da fábrica das células PV (Jungbluth, 2009).

Segundo os relatórios do ecoinvent para 1 m² de painel PV, é necessário 0,932 m² de células. Os painéis em estudo têm uma área total de ≈6,6 m² sendo necessárias 6,1 m² de células.

O transporte de matéria-prima é feito essencialmente por meio marítimo e terrestre. As emissões produzidas nas deslocações estão incorporadas no processo de produção da célula.

Montagem do painel e instalação do sistema

Foi efectuado o contacto com empresas a laborar no sector da tecnologia fotovoltaica, em Portugal, com o objectivo de adquirir dados reais e credíveis para fundamentar esta fase. Apenas a OpenRenewables se disponibilizou para fornecer os dados necessários.

A tabela 3-3 apresenta os consumos da OpenRenewables na montagem dos painéis.

Tabela 3-3 – Consumos por MW de módulos produzidos, fonte: OpenRenewables,2015.

	Consumo
Electricidade	61390 kWh/MW
Água	189,3 m ³ /MW
Materiais	Consumo
Cobre	885 kg/MW
Plásticos	9773 kg/MW
Madeira	4899 kg/MW
Papel e cartão	2297 kg/MW
Silício	147 kg/MW
Vidro	62886 kg/MW
Alumínio	11464 kg/MW

As células utilizadas têm origem na Alemanha e na China. A infra-estrutura afecta à fábrica da OpenRenewables ocupa uma área de 3750m².

Para a modelação recorreu-se à base de dados do ecoinvent utilizando o processo “photovoltaic panel, single-Si, at plant”. Este engloba os consumos de materiais para produzir o

módulo fotovoltaico e a infra-estrutura da fábrica de produção de módulos. Com os dados fornecidos foi possível modificar alguns valores da base de dados utilizada e adicionar processos em falta.

Para a aquisição dos dados alteraram-se os valores relativos à tabela 3-3, à área ocupada pela fábrica de painéis e foram adicionados os processos de processamento do alumínio (anodização, produção das molduras, produção folha de alumínio), papel e cartão usados no acondicionamento dos painéis, película de plástico e paletes. Os restantes dados foram alterados tendo em conta os m² de painel em estudo e os dados padrão necessários por m² de painel produzido. (Jungbluth, 2009)

Do peso total dos plásticos, 55% corresponde a EVA, 40% a PET e 5% a película plástica.

No peso total do papel e cartão, 65% corresponde ao cartão e 35% a papel.

Operação dos sistemas fotovoltaicos

A manutenção dos painéis PV, durante a sua operação, passa pela limpeza dos painéis e verificação dos sistemas eléctricos. Neste caso não foram considerados valores para esta fase, por ainda não existirem dados fundamentados e se considerar que os gastos com a limpeza são menos de 1% da pegada do ciclo de vida do PV.

Produção de componentes BOS

Para a produção de componentes balance of system (BOS) teve-se por base um sistema a ser instalado no topo de um edifício, com ligação à rede eléctrica.

Na modelação deste ponto recorreu-se à base de dados do ecoinvent utilizando os inventários “slanted-roof construction, mounted, on roof”, “Inverter, 500 W, at plant” e “electric installation, photovoltaic plant, at plant”.

Para os inversores foram consideradas quatro unidades. Este valor teve em conta o tempo de vida dos inversores, 15 anos em média, e o tempo de vida do sistema fotovoltaico, entre 25 a 30 anos, e a potência instalada.

Para a estrutura, a unidade medida é de m² de painéis instalados, sendo necessários ≈6.6m² de estrutura.

Na instalação eléctrica, o valor de referência do ecoinvent tem em conta um sistema instalado de 3kWp. Como neste processo a unidade é 1 unidade, considerou-se 0,7 unidades para o sistema em estudo. Como a matriz fotovoltaica é menor é necessário menos quantidade de cabo eléctrico.

Desmantelamento (reciclagem e aterro)

Segundo os dados fornecidos pela OpenRenewables, a empresa está registada como produtor na Associação Nacional para o Registo de Equipamentos Eléctricos e Electrónicos (ANREEE), tendo contratado a gestão dos painéis em fim de vida à ERP-Portugal. Existindo ainda pouca informação disponível sobre o real destino de todos os componentes do painel PV, foi considerado que apenas o

que vai para aterro fica no ciclo de vida do painel. A pegada dos materiais reciclados vai ser contabilizada no ciclo de vida dos novos produtos.

Para a modelação recorreu-se à base de dados doecoinvent, utilizando os processos deposição de plásticos não reciclados para aterro ou inceneração e deposição dos restantes constituintes que não são reciclados em aterro e transporte dos painéis.

Foram considerados para a obtenção dos valores, os plásticos usados no painel PV e 20% do peso dos painéis em kg.

Modelação em Ecoblok

Para se obter os resultados foi modelado o ciclo de vida da tecnologia fotovoltaica na ferramenta Ecoblok. Foram utilizados os códigos e os valores “quantidade” presentes na tabela 3-4, 3-5, 3-6, 3-7 e 3-8 para a modelação de cada fase do ciclo de vida. Em algumas fases foi necessário decompor o processo para se conseguir aplicar os dados reais adquiridos e adicionar processos em falta.

Tabela 3-4 - Códigos e valores da fase extracção matéria-prima.

Extracção de matéria-prima		
Código	Quantidade	Tipo Tecnologia
479	36,5 kg	Si-c mono
	39,5 kg	Si-c poli

Tabela 3-5 - Códigos e valores da fase de produção da célula.

Produção da célula		
Código	Quantidade	Tipo Tecnologia
6827	6,1 m ²	Si-c mono
6828	6,1 m ²	Si-c poli

Tabela 3-6 - Códigos e valores da fase de montagem do painel e instalação sistema.

Montagem do painel e instalação sistema							
Código	Quantidade	Código	Quantidade	Código	Quantidade	Código	Quantidade
660	61,39 kWh	1815	1,232 kg	6656	0,05338 kg	8312	11,46 kg
1792	2,62E-5 unidade	1819	5,375 kg	1943	10,56 tkm	1158	2,831 m ²
2288	189,3 kg	1827	3,909 kg	2103	0,1968 kg	1698	1,493 kg
813	62,89 kg	6844	0,7214 kg	2118	0,7214 kg	1732	0,8040 kg
812	62,89 kg	324	0,8001 kg	2230	11,08 kg	2526	0,05 unidade
1178	0,885 kg	363	0,08526 kg	2064	0,01056 kg	1067	0,05745 kg
1074	0,885 kg	423	0,01417 kg	2274	0,1397 m ³	416	0,01056 kg
1121	0,00107 kg	1812	0,01076 kg	1850	0,4887 kg	1171	11,46 kg

Para o código 1792 é necessário alterar a área ocupada pela fábrica em “Occupation, industrial area, built up” para 7942 . Os códigos a sublinhado foram modificados com base na tabela 3-3.

Tabela 3-7 - Códigos e valores da fase de produção de componentes BOS.

Produção de componentes BOS							
Código	Quantidade	Código	Quantidade	Código	Quantidade	Código	Quantidade
6851	4 unidade	1829	0,00918 kg	1174	9,84 kg	2038	0,00918 kg
1774	0,7 unidade	1837	0,0460 kg	1943	1,48 tkm	2039	0,0460 kg
1058	18,6 kg	1154	9,84 kg	1947	2,85 tkm	-	-
1690	0,872 kg	1169	18,6 kg	2105	0,872 kg	-	-

Tabela 3-8 - Códigos e valores da fase de reciclagem

Reciclagem			
Código	Quantidade	Código	Quantidade
22156	0,264 kg	2039	0,046 kg
2214	0,06 kg	2071	12,32 kg
2111	12,58 kg	7303	2,32 tkm
2038	0,0092 kg	-	-

Nos valores em que não foi possível recolher dados reais, foi necessário recorrer aos valores padrão do anexo 2 e adaptar ao caso estudado.

3.4. Comparação entre várias fontes de energia

Para ser possível comparar a fonte de energia PV com outras fontes é necessário transformar os valores dos indicadores de 1 kWp para 1 kWh.

Foi estimada a produção de um sistema de 1kWp no seu tempo de vida médio de 25 anos. Teve-se em conta perdas associadas ao sistema e perdas da potência nominal dos painéis ao longo dos anos. Para estimar a produção anual recorreu-se ao PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System). Este software faculta um inventário dos recursos de energia solar (irradiação) e avaliação da produção de electricidade a partir de sistemas PV, na Europa, África e no Sudoeste Asiático.

A estimativa para a produção foi de 1630 kWh/ano (anexo 3) para um sistema fixo instalado na zona da Costa da Caparica. No fim de vida da instalação, os painéis terão produzido 33214 kWh, tendo em conta uma perda da potência nominal do painel de 1%, a partir do quinto ano e atingindo, no máximo, 20% de perdas da potência nominal. De seguida dividiu-se os valores dos totais dos indicadores pela energia produzida durante a operação dos painéis, para obter o indicador por kWh.

Os dados referentes à tecnologia eólica, hídrica e gás natural foram retirados da dissertação “Indicadores de desempenho ambiental do sector eléctrico em Portugal” de Gonçalo Higinio. A tabela 3-9 apresenta os valores dos indicadores das fontes de energia (Higinio, 2014).

Tabela 3-9 – Valores indicadores para varias fontes de energia por kWh, fonte:(Higinio 2014)

Indicador		Hídrica	Eólica	Gás natural
WA	m³eq/kWh	0,00013	0,00013	0,0030
RE	kg eq/kWh	0,060	0,025	0,35
LU	m².a/kWh	0,22	0,010	0,0065
GH	kg CO₂ eq/kWh	0,0090	0,0094	0,52
PA + DF	kg No_x eq / kWh	0,0020	0,035	0,087
PWL	kg N eq/kWh	0,0020	0,013	0,016

Os pressupostos utilizados para obter os valores da tecnologia hídrica têm em conta as actividades inerentes à construção dos aproveitamentos hidroeléctricos, o transporte de materiais provenientes de estradas públicas ou caminhos-de-ferro directamente para o local de construção e um período útil de exploração de 150 anos.

Para a tecnologia eólica os pressupostos utilizados têm em conta os diferentes períodos de tempo de vida dos vários componentes de uma turbina eólica, esta foi dividida em partes móveis (pás e rotor) e partes fixas (torre e fundações). A estimativa do período de vida das partes móveis é de 20 anos e a das partes fixas é de 40 anos.

Na tecnologia de gás natural os pressupostos utilizados têm em conta os processos, desde a extracção do gás natural até ser consumido pela central de gás natural (Higinio, 2014).

Para que a comparação seja correcta foi tido em conta o peso do indicador furanos e dioxinas, em conjunto com o do indicador PA no PV. Os dados de eólica, hídrica e gás natural usados foram produzidos com um indicador único PA, que englobava as dioxinas e furanos.

3.5. Avaliação desempenho ambiental

Para avaliação do desempenho foi usado o método Ecoblok (Joanaz, 2010). O método assenta num conjunto de sete indicadores expressos em unidades facilmente reconhecíveis e de acordo com o modelo DPSIR, sendo os seguintes:

- Extracção de água (WA);
- Extracção de recursos (RE);
- Uso do solo (LU);
- Emissão de GEE (GH);

- Poluição da água e do solo (PWL);
- Poluição do ar (PA)
- Dioxinas e furanos (DF)

Cada indicador é calculado a partir de um conjunto de variáveis ponderado por factores de equivalência (f_{eq}), que expressam o significado ambiental de cada variável.

Os indicadores são obtidos pela seguinte equação:

$$I = \sum Q_i * f_{eq_i} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

I representa o indicador expresso em unidades equivalentes;

Q_i representa uma medida de uma quantidade física de variável i;

f_{eq_i} representa um factor de equivalência adimensional para uma variável i.

Tabela 3-10 – Indicadores Ecoblok e critérios de cálculo.

Indicador Ecoblok	Definição	Unidades de medida típicas		Critérios para factores de equivalência
		Produtos (bens ou serviços)	Organizações/comunidades	
Extracção de água	Água captada a partir de fontes naturais	L/unidade de produto	m ³ /ano	Intensidade da exploração dos recursos hídricos
Extracção de recursos	Recursos minerais ou biológicos extraídos	kg /unidade de produto	t/ano	Renovabilidade e disponibilidade dos materiais
Uso de solo	Área de ocupação	m ² .ano/unidade de produto	ha	Valor ecológico e social do território
Emissão de GEE	GEE libertados para a atmosfera	kg CO ₂ eq/unidade de produto	t CO ₂ eq/ano	Potencial de aquecimento global
Poluição do ar	Emissão de poluentes para o ar (excepto GEE)	g NO ₂ /unidade de produto	kg NO _x /ano	Toxicidade ou perigosidade equivalente
Poluição da água e do solo	Emissão de poluentes em meio hídrico	g N/unidade de produto	kg N/ano	
Dioxinas e furanos	Emissão de Dioxinas e furanos	µg TCDD/unidade de produto	mg TCDD/ano	

Extracção de água (WA)

O indicador extracção de água representa a água consumida proveniente de diversas fontes. Este depende de dois factores: factor de equivalência (f_{eq}) que representa a intensidade de uso do recurso e da quantidade de água captada de um recurso natural. O f_{eq} é obtido através da seguinte equação:

$$f_{eq} = \frac{Q_{extraido}}{Q_{sustentável}} \quad (\text{Equação 2})$$

onde,

$Q_{extraido}$ - extracção total de agua de recurso (hm^3 /ano)

$Q_{sustentável}$ – caudal utilizável por forma a garantir a sustentabilidade do recurso em termos ambientais hm^3 /ano.

Se o valor de f_{eq} for superior a 1 a extracção passa o limite sustentável de exploração. Quando a informação é insuficiente ou desconhecida deve-se usar o padrão OCDE, que considera a captação acima de 10% da quantidade de água disponível ambientalmente insustentável.

Extracção de recursos (RE)

O indicador de recursos representa a extracção de matérias-primas a partir da natureza, excluindo a água. Depende de dois factores: f_{eq} duração do stock e grau de renovabilidade e da quantidade de matéria-prima removida do local de extracção primário. O f_{eq} deste indicador engloba a abundância e renovabilidade dos recursos, controlando/penalizando os recursos mais escassos da seguinte forma:

- $f_{eq} = 1$: recursos com um período estimado de duração de stock igual ou superior a 100anos;
- $f_{eq} = 0$: recursos reciclados ou reutilizados
- $f_{eq} = \frac{100}{duração\ stock(anos)}$: recursos com período estimado de duração do stock inferior a 100 anos;

Para qualquer recurso, a duração do stock depende de factores como tecnologia, mercado, preço, procura e formação de novos recursos.

Uso do solo (LU)

O solo não é consumido por actividades económicas mas a sua apropriação para determinada utilização pode degradá-lo ao ponto de o inviabilizar para outros usos. Este indicador tem em atenção f_{eq} intensidade do uso do solo e a área de solo ocupado por determinada actividade. O f_{eq} é obtido pela seguinte equação:

$$f_{eq} = 1 - C_{CP} - C_{OH} - C_{PA} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

C_{BP} – coeficiente de biodiversidade e património. Pode variar entre 0 (áreas sem estatuto de conservação) e 0,5 (reserva integral ou património mundial)

C_{OH} – coeficiente de ocupação de solo. Pode variar entre -4 (espaço edificado, solo destruído ou terreno impermeabilizado) e 0,5 (espaço silvestre)

C_{PA} – coeficiente d práticas agrícolas. Pode variar entre -2 (lavra perpendicular às curvas de nível) e 0,2 (agricultura biológica)

Os critérios de avaliação do f_{eq} são os seguintes:

- $0 < f_{eq} < 1$: Solo prestador de serviços ambientais ou sociais, classificado como área protegida
- $f_{eq} = 1$: Solo para espaços agrícolas sustentáveis
- $1 < f_{eq} < 4$: Uso do solo insustentável e degradação do solo.
- $f_{eq} = 4$: Solo destruído, com qualidade fraca ou antes de 1972
- $4 < f_{eq} < 10$: Solo de elevada qualidade destruído recentemente

Emissão de GEE (GH)

A emissão de GEE está relacionada geralmente com o consumo de energia. Este indicador depende da quantidade de GEE emitida para a atmosfera e f_{eq} baseia-se no potencial de aquecimento global de casa gás, estimado através das directrizes do IPCC, sendo expresso em CO_2 eq. O poluente incluído na análise deste indicador é o dióxido de carbono (CO_2).

Poluição da água e solo (PWL), poluição do Ar (PA) e Dioxinas e furanos (DF)

O indicador inclui emissões tóxicas e ecotóxicas para o ar, água e solo. A selecção dos poluentes deste indicador é baseada segundo a lista de PRTR que teve origem em UNECE (2003). Este regulamento fornece a lista de poluentes e a base para o cálculo dos factores de equivalência (f_{eq}), utilizando limiares de emissão. Os factores de equivalência são calculados dividindo um limiar de referência pelo limiar de cada poluente, reflectindo assim a perigosidade da substância em causa. Os poluentes de referência utilizados pelo método Ecoblok são os óxidos de azoto (NO_x) para as emissões atmosféricas, o azoto total (N) para água e solo e 2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-dioxina (TCDD) para DF. Quanto mais elevado for o f_{eq} maior o perigo associado ao poluente. Pode ser calculado mediante a seguinte equação:

$$f_{eqij} = \frac{RT_{REFi}}{RT_{ij}} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

F_{eqij} representa o factor de equivalência para o poluente j, indicador i (i=PWL ou PA ou DF);

RT_{REFi} representa o limiar de emissão para o poluente de referência do indicador i;

R_{Tij} representa o limiar de emissão para o poluente i, indicador j

4. Resultados

4.1. Análise das fases de produção da tecnologia fotovoltaica

Numa perspectiva geral sobre o ciclo de vida do PV observa-se que a tecnologia Si-c mono apresenta valores mais elevados nos indicadores do que o Si-c poli (tabela4-1).

Tabela 4-1 – Valores totais dos indicadores no ciclo de vida do Si-c mono e Si-poli

<i>Indicador</i>		<i>Si-mono</i>	<i>Si-poli</i>
WA	m ³ eq/kWp	43,0	28,0
RE	t eq/kWp	1,75	1,53
LU	m ² .a/kWp	144	136
GH	t CO ₂ eq/kWp	1,76	1,50
PA	t No _x eq/kWp	0,0739	0,0713
PWL	t N eq/kWp	1,40	1,28
DF	mg TCDD/kWp	4,01	3,99

De seguida são apresentados, nas tabelas 4-2 e 4-3, os valores de cada indicador para cada fase da produção do PV, de maneira a ser possível identificar as fases mais problemáticas do ciclo de vida.

Tabela 4-2 – Valor dos indicadores para cada fase da tecnologia Si-c poli.

	WA(m ³ eq / kWp)	RE (t eq. / kWp)	LU (m ² .a eq / kWp)	GH (t CO ₂ eq / kWp)	PA (t NO _x eq / kWp)	PWL (t N eq / kWp)	DF (mg TCDD /kWp)
Extracção matéria-prima	0,038	0,028	0,059	0,00053	0,000010	0,000026	0,00037
Produção da célula	18	0,67	49	0,72	0,013	0,21	2,4
Produção dos componentes BOS	4,5	0,50	51	0,49	0,051	0,94	0,64
Montagem painéis / instalação sistema	5,0	0,32	36	0,25	0,0076	0,13	0,98
Desmantelamento	0,021	0,0032	0,11	0,039	0,00011	1,6E-06	0,00065

Tabela 4-3 - Valor dos indicadores para cada fase da tecnologia Si-c mono.

	WA (m ³ eq / kWp)	RE (teq./kWp)	LU (m ² .a eq / kWp)	GH (t CO ₂ eq/kWp)	PA (t NO _x eq/kWp)	PWL (t N eq/kWp)	DF (mg TCDD /kWp)
Extracção matéria-prima	0,033	0,024	0,052	0,00047	8,4E-06	0,000023	0,00032
Produção da célula	33	0,90	56	0,98	0,016	0,33	2,4
Produção dos componentes BOS	4,5	0,50	51	0,49	0,051	0,94	0,64
Montagem painéis / instalação sistema	5,0	0,32	36	0,25	0,0076	0,13	0,98
Desmantelamento	0,021	0,0032	0,11	0,039	0,00011	1,6E-06	0,00065

Extracção de água (WA)

No indicador extracção de água, a produção da célula apresenta a pegada mais elevada, seguida da montagem do painel e instalação.

Para a produção da célula, a tecnologia de Si-c mono apresenta um valor mais elevado 33 m³ eq/kWp em relação à tecnologia Si-c poli com 18 m³ eq/kWp. Esta diferença é justificada pelo diferente processo de formação dos lingotes de Si-c. A água consumida é maioritariamente utilizada para o arrefecimento no processo de transformação do Si e no corte dos lingotes.

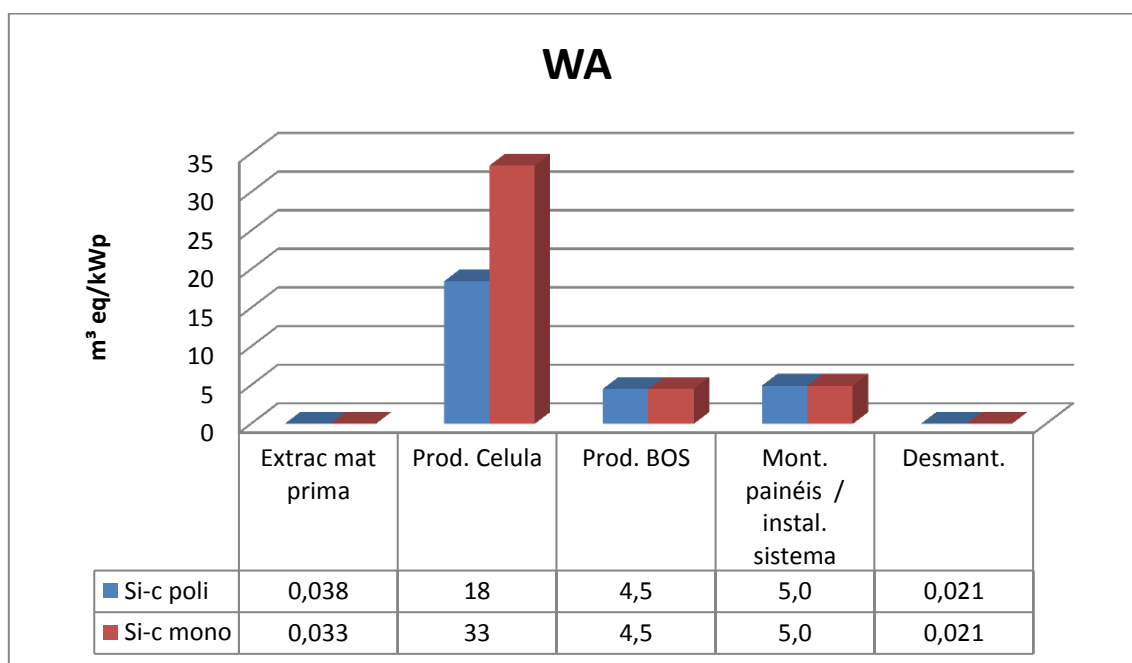


Figura 4.1 – Indicador WA nas fases de produção da célula.

Extracção de recursos (RE)

No indicador extracção de recursos, a produção da célula e produção dos BOS apresentam os valores mais elevados durante o ciclo de vida.

Na produção da célula, a tecnologia Si-c mono apresenta um valor mais elevado 0,90 t eq/kWp em relação aos 0,67 t eq/kWp do Si-c poli. Em ambas é utilizado o silício como principal constituinte da célula. Segundo a bibliografia consultada, esta etapa é a mais energética do ciclo de vida, necessitando de grandes quantidades de combustível.

Na produção dos BOS é necessário ter em conta como principais recursos o alumínio, usado para a estrutura de suporte dos painéis e o cobre, utilizado na parte eléctrica do sistema. Estes materiais requerem energia para a sua transformação.

O processo montagem dos painéis e instalação do sistema apresenta uma pegada de 3,2 t eq/kWp. Para a montagem do painel é possível detalhar os recursos com um peso mais importante, pois foram fornecidos dados dos consumos de matéria-prima na fábrica da OpenRenewables. Os três recursos com maior pegada neste ponto são: o vidro com 0,15 t eq/kWp, 1 m² de painel leva em média 10kg de vidro, seguido do alumínio, com 0,05 t eq/kWp, que é usado para moldura dos painéis, e os plásticos, com 0,036 t eq/kWp, usados para isolar as células e fortalecer a parte posterior do painel.

Na fase de extracção de matérias-primas, o valor para Si-c poli 0,028 t eq/kWp é mais elevado do que Si-c mono com 0,024 t eq/kWp. No Si-c poli são necessárias maiores quantidades de silício, uma vez que ocorrem mais processos desde a fundição até à produção das bolachas de silício. A cada processo estão associadas perdas de silício.

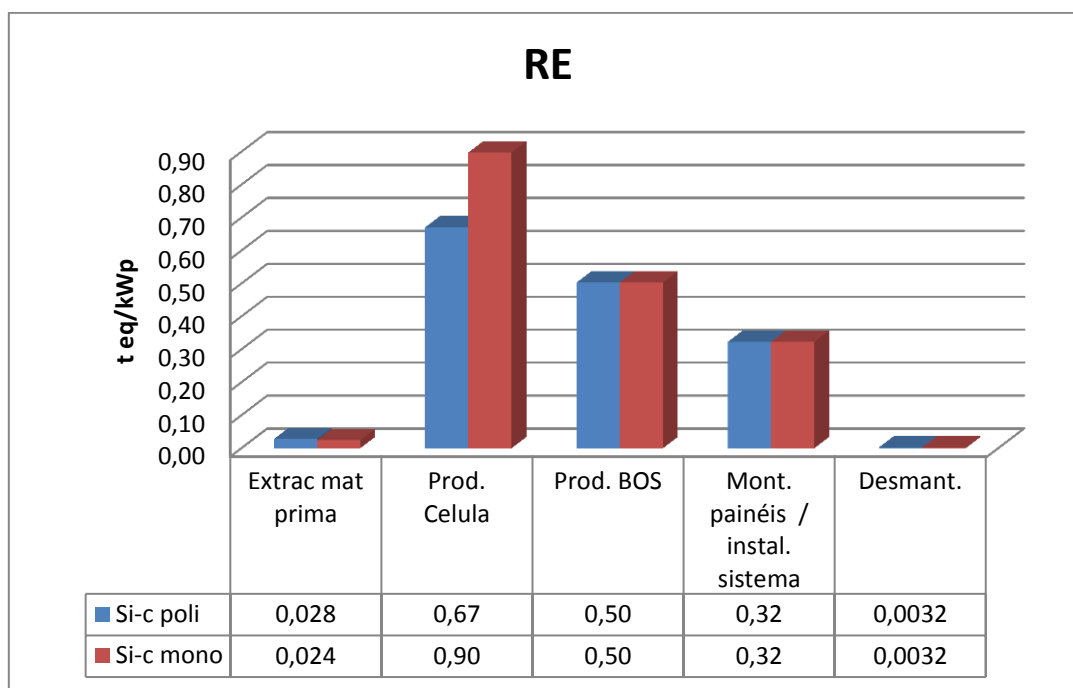


Figura 4.2 - Indicador RE nas fases de produção da célula.

Uso do solo (LU)

No indicador uso do solo, observa-se que a produção da célula Si-c mono apresenta o valor mais elevado, com 56 m².a eq/kWp, seguida da produção dos BOS com 51 m².a eq/kWp e Si-c poli com 49 m².a eq/kWp.

Estes valores estão ligados à ocupação de terreno pelas fábricas. As fábricas com taxas de produção baixas em relação ao terreno ocupado apresentam valores mais elevados de LU. Alguns dos recursos usados como o cobre, bauxite ou prata ocupam grandes áreas de exploração, sendo necessário por vezes movimentar e extrair grandes quantidades de material para obter uma pequena quantidade de recursos.

Na extracção de matéria-prima, o principal constituinte do painel apresenta um valor bastante baixo 0,059 m².a eq/kWp para Si-c poli e 0,052m².a eq/kWp para Si-c mono. Na exploração de silício (areia) quase a totalidade do material extraído é usado.

Neste ponto não é contabilizado o LU para operação do painel, pois o sistema foi instalado no telhado de um edifício e considerou-se que não houve ocupação de solo. Contudo, se o sistema for aplicado directamente no solo, faz sentido a contabilização desta fase no indicador LU.

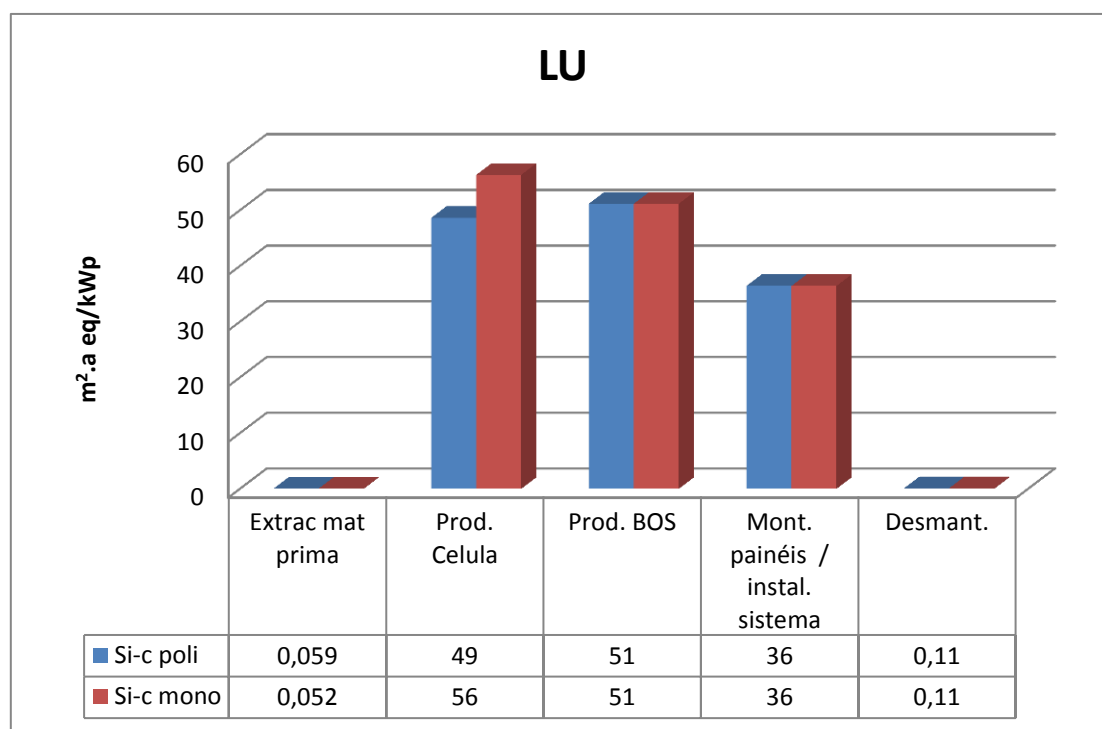


Figura 4.3 - Indicador LU nas fases de produção da célula.

Emissão de GEE (GH)

Com os resultados obtidos para este indicador observa-se que a produção da célula o Si-c mono apresenta valores mais elevados 0,98 t CO₂ eq/kWp do que o Si-c poli 0,72 t CO₂ eq/kWp. Esta diferença é justificada pelo diferente processo produtivo dos painéis. O processo de Czochralski é mais lento e consome mais energia do que o processo de siemens modificado. Segundo a bibliografia, esta fase é a mais energética do ciclo de vida da tecnologia fotovoltaica.

Na produção dos BOS, a manufactura do alumínio e cabos eléctricos são os principais contribuintes para o índice.

Para a montagem dos painéis e instalação do sistema contribuem para o valor do índice a manufactura do alumínio e vidro e a electricidade consumida.

No geral, em todas estas etapas, o factor que mais influencia este indicador é o mix energético de cada país. Quanto maior o consumo de combustíveis fósseis maior será o seu peso.

É de referir que o transporte de materiais entre as fases do ciclo de vida promove o aumento deste indicador, sendo alguns desses materiais transportados ao longo de grandes distâncias. As emissões geradas no transporte estão englobadas em cada fase do ciclo de vida.

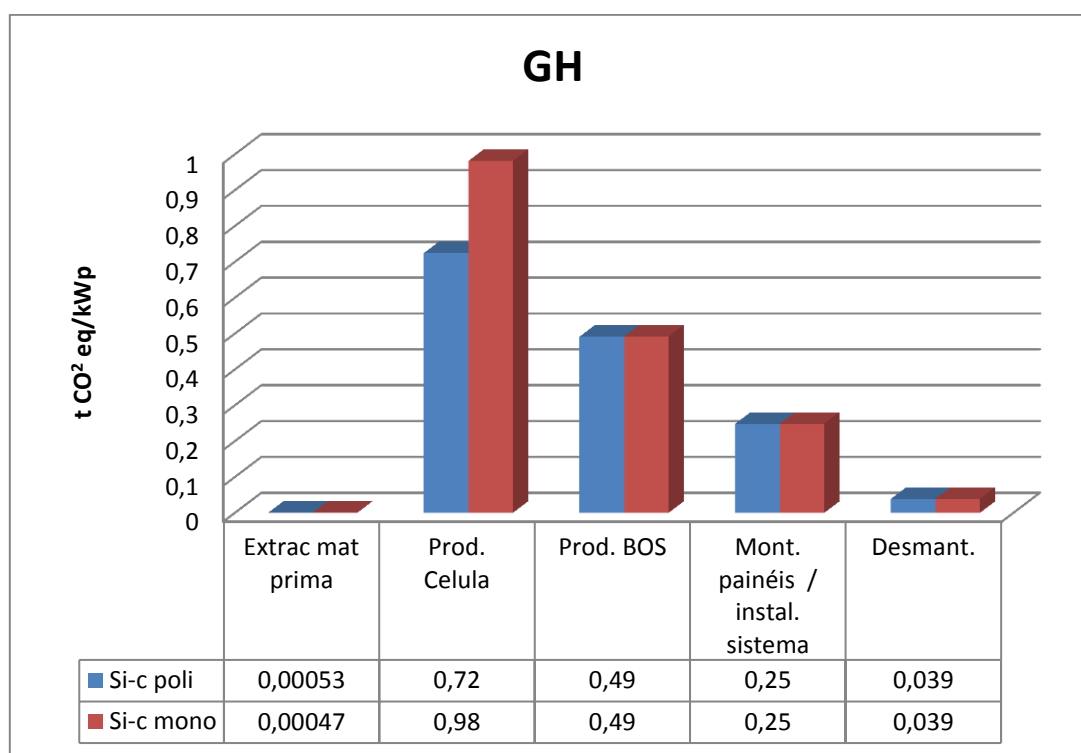


Figura 4.4 - Indicador GH nas fases de produção da célula.

Poluição do ar (PA)

Neste ponto os resultados mostram que a produção de BOS apresenta o valor mais elevado com 0,051 t NO_x eq/kWp. Estas emissões podem estar relacionadas com a produção do inversor devido aos processos de soldagem dos componentes, produção dos cabos eléctricos e do alumínio.

Na montagem de painéis e instalação do sistema, o valor de 0,0076 t NO_x eq/kWp está relacionado com a soldadura das células com o cobre.

A produção da célula apresenta o valor de 0,013 t NO_x eq/kWp para Si-c poli e 0,016 t NO_x eq/kWp para Si-c mono. Estes valores são provenientes da queima de metais pesados na produção da célula, tais como o níquel, o mercúrio e o crómio.

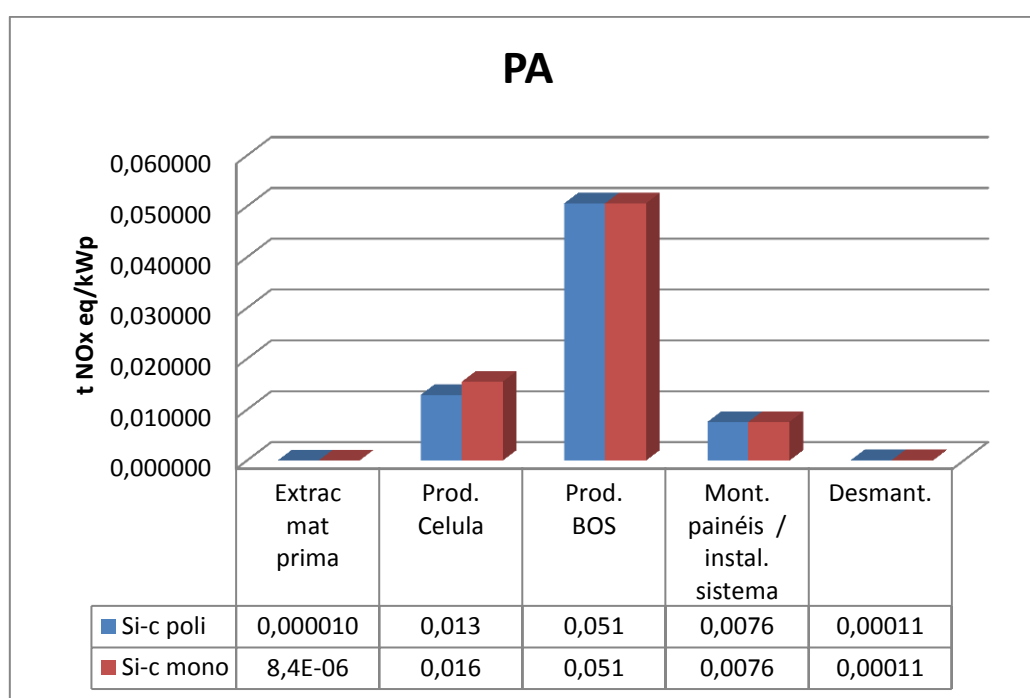


Figura 4.5 - Indicador PA nas fases de produção da célula.

Poluição de água e solo (PWL)

Os resultados indicam que a produção dos BOS é a que mais influencia o indicador, com o valor de 0,94 t N eq/kWp. Este valor está directamente ligado à quantidade de cobre usado. A mineração do cobre é um processo extremamente poluidor da água e solo.

Na Produção da célula, o Si-c mono apresenta valores mais elevados - 0,33 t N eq/kWp comparativamente com o Si-c poli 0,21 t N eq/kWp. Durante o corte dos lingotes pode ocorrer a contaminação da água com metais pesados, como por exemplo o mercúrio e o níquel.

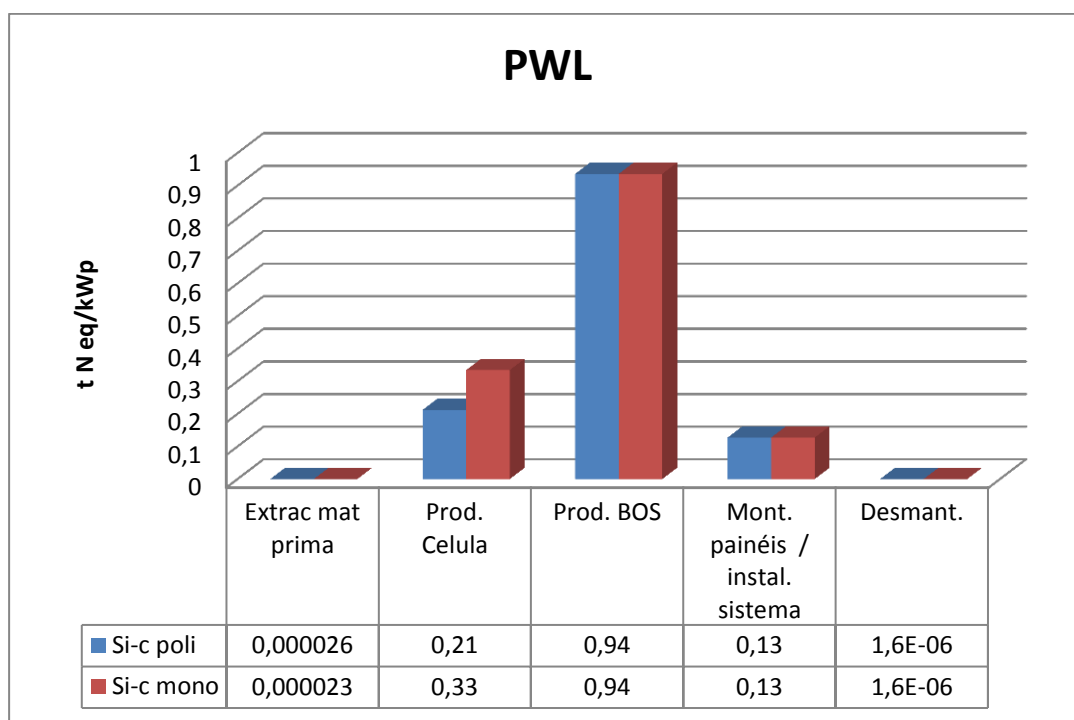


Figura 4.6 - Indicador PWL nas fases de produção da célula.

Dioxinas e furanos (DF)

Os resultados indicam que a produção da célula é a que mais influencia o indicador, com 2,4 mg TCDD eq/kWp, seguido da produção dos BOS com 0,98 mg TCDD eq/kWp e da montagem do painel e instalação do sistema com 0,64 mg TCDD eq/kWp.

A emissão de dioxinas e furanos para o ar está relacionada com os processos metalúrgicos ocorridos no ciclo de vida, nomeadamente o processamento do silício, alumínio, cobre e vidro.

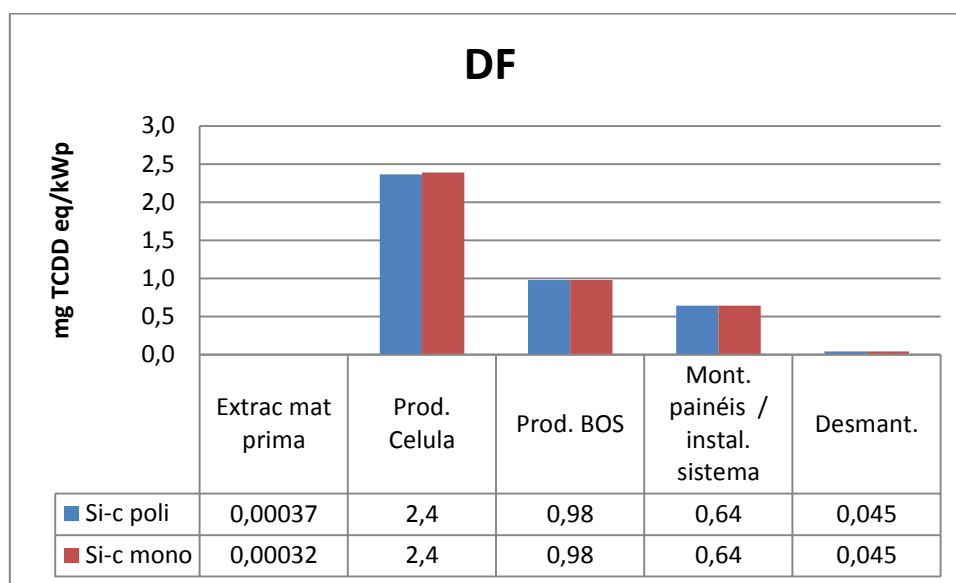


Figura 4.7 - Indicador DF nas fases de produção da célula.

Discussão geral das fases de produção da tecnologia fotovoltaica

Das fases de ciclo de vida da tecnologia fotovoltaica observa-se que a produção da célula e a produção de componentes BOS são as fases com maior peso na maioria dos indicadores. Na produção da célula o resultado já era esperado, pois, segundo a bibliografia, esta fase requer grandes quantidades de energia e matéria-prima. Na produção dos componentes BOS a extracção e transformação da matéria-prima, nomeadamente o cobre, é a principal responsável pelos impactos gerados.

Os resultados mostram que a tecnologia de Si-c mono gera mais impactes durante o seu ciclo de vida do que a tecnologia Si-c poli. Embora Si-c mono gere mais impactes durante o ciclo de vida é importante referir que esta tecnologia tem eficiências de conversão superiores à tecnologia Si-c poli, ou seja, com a mesma área de célula consegue produzir mais energia. No fim de vida da célula, a energia produzida pela tecnologia Si-c mono vai ser superior à tecnologia Si-c poli.

4.2. Comparação da tecnologia fotovoltaica com outras fontes de electroprodução

Neste ponto é efectuada a comparação da tecnologia fotovoltaica com a tecnologia hídrica, eólica e o gás natural. Nesta comparação, os valores de DF estão englobados nos indicadores PA e PWL. Os novos valores dos indicadores estão presentes na tabela 4-4.

Tabela 4-4 – Valores totais dos indicadores ciclo vida Si-c mono e Si-c poli com dioxinas incorporadas.

<i>Indicador</i>		<i>Si-mono</i>	<i>Si-poli</i>
WA	m ³ eq/kWp	43,0	28,0
RE	t eq/kWp	1,75	1,53
LU	m ² .a/kWp	144	136
GH	t CO ₂ eq/kWp	1,76	1,50
PA + DF	t No _x eq/kWp	4,09	4,06
PWL	t N eq/kWp	1,44	1,32

Após estimar a produção total de 33214 kWh durante o tempo de vida dos painéis, foi possível passar da unidade funcional de 1 kWp para 1kWh, dividindo os valores da tabela 4-4 pela produção total. Os indicadores para a nova unidade funcional estão presentes na tabela 4-5.

Tabela 4-5 – Valores dos indicadores para unidade funcional de 1 kWh

<i>Indicador</i>		<i>Si-mono</i>	<i>Si-poli</i>
WA	m ³ eq/kWh	0,0013	0,00084
RE	kg eq/kWh	0,053	0,046
LU	m ² .a/kWh	0,0043	0,0041
GH	kg CO ₂ eq/kWh	0,053	0,045
PA + DF	kg No _x eq/kWh	0,12	0,12
PWL	t N eq/kWh	0,043	0,040

Extracção de água

No indicador consumo de água, a fonte de gás natural apresenta os valores mais elevados, 0,0030 m³ eq/kWh, seguido da tecnologia de Si-c mono, com 0,0013 m³ eq/kWh

As tecnologias Si-c mono e Si-c poli necessitam deste recurso, principalmente na fase de produção da célula, para o arrefecimento das caldeiras.

Para o gás natural, o consumo de água é usado para arrefecer os grupos geradores. Embora a água utilizada seja devolvida à sua origem, durante o circuito de arrefecimento ocorrem fugas de água e vapor.

Neste indicador o eólico apresenta o valor mais baixo.

Embora o valor da hídrica seja baixo, é necessário ter em atenção os índices de evaporação nas barragens/albufeiras.

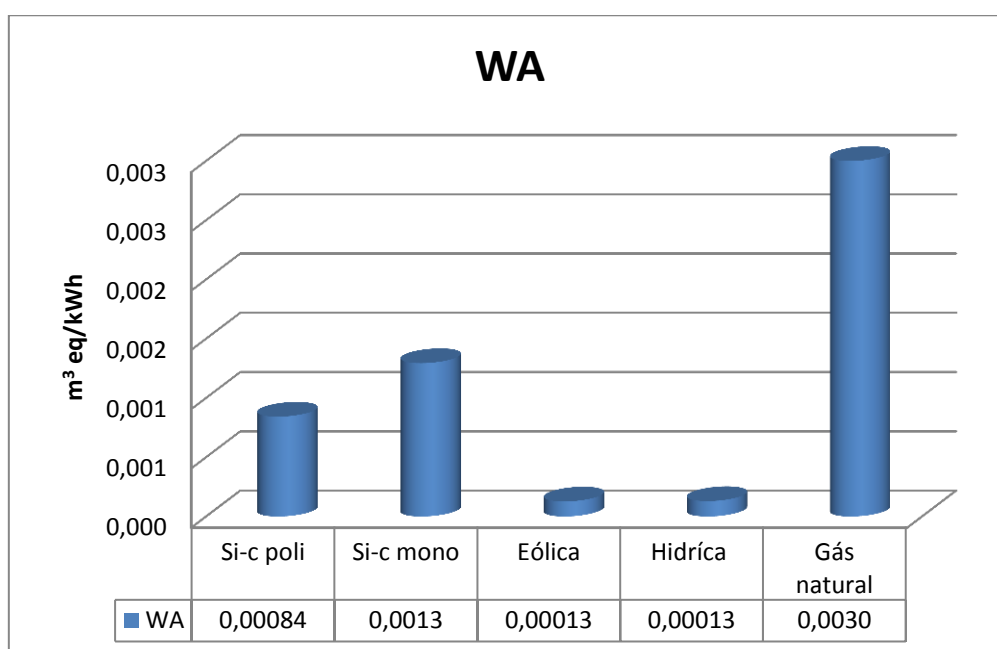


Figura 4.8 - Indicador WA para as fontes de electroprodução.

Extracção de recursos (RE)

Na extracção de recursos, a fonte de energia de gás natural apresenta novamente os valores mais elevados, 0,35 kg eq/kWh, seguido da hídrica, com 0,060 kg eq/kWh.

Na fonte de energia hídrica, a construção das albufeiras ou barragens requer grandes quantidades de material como cimento e aço, que são processados a partir de areia e rocha.

Para o gás natural, este valor está relacionado com a exploração de gás natural necessário para satisfazer a produção de energia.

A eólica apresenta novamente o valor mais baixo.

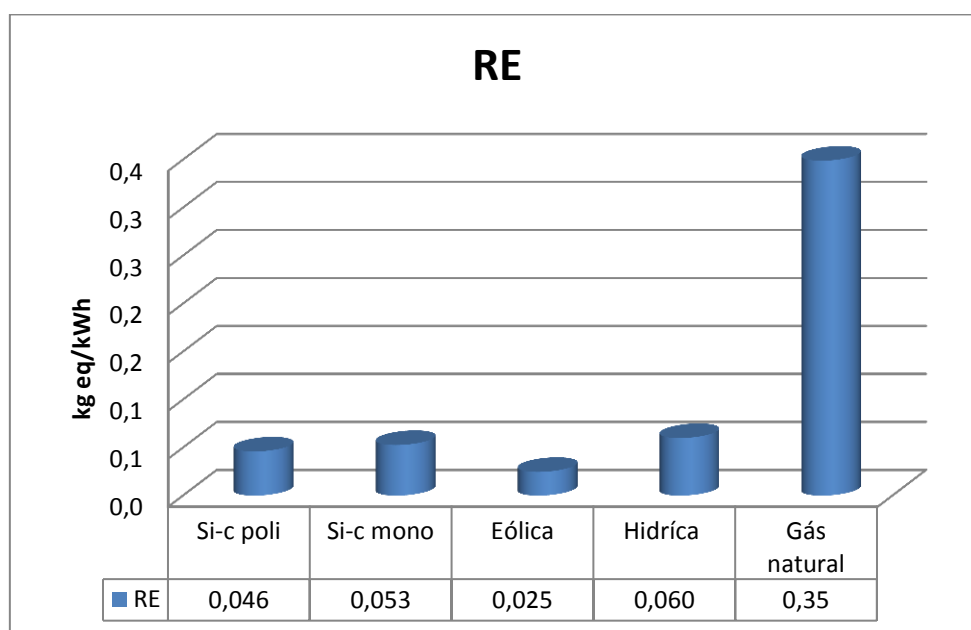


Figura 4.9 - Indicador RE para as fontes de electroprodução.

Uso do solo (LU)

No uso do solo, a hídrica apresenta o valor mais elevado, 0,22 m².a eq/kWh, seguido da eólica com 0,010 m².a eq/kWh.

Na hídrica, este valor está relacionado com a elevada área ocupada pelas barragens.

Na eólica, as fundações para a torre eólica são as principais responsáveis para este indicador.

A tecnologia fotovoltaica apresenta os valores mais baixos. A maioria dos sistemas PV encontra-se instalada no topo ou fachada de edifícios.

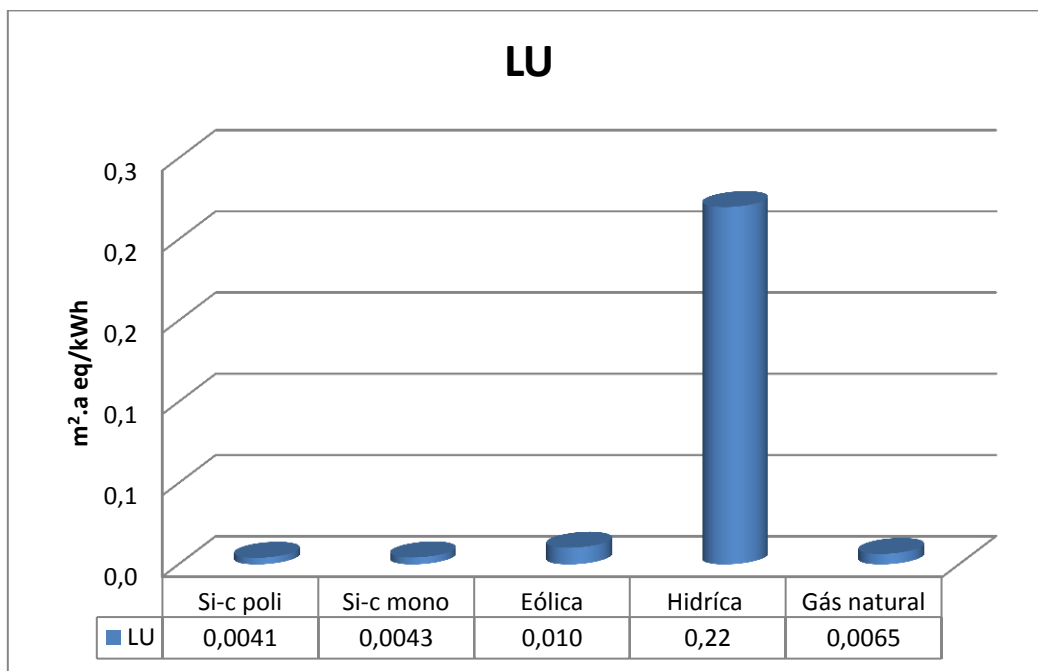


Figura 4.10 - Indicador LU para as fontes de electroprodução.

Emissão de GEE (GH)

As fontes de energia PV e eólica e hídrica apresentam a vantagem de não consumirem combustíveis fósseis durante a sua operação, reduzindo a produção global de CO₂.

O gás natural apresenta o valor mais elevado, com 0,52 kg CO₂ eq/kWh. Este valor está directamente ligado à queima de gás natural durante a operação da central.

Para a tecnologia Si-c mono e Si-c poli são necessárias grandes quantidades de energia para a produção da célula.

Nas restantes fontes as emissões de GEE estão ligadas à energia consumida na fase de produção e consumo combustível no transporte.

A eólica apresenta o valor mais baixo.

Na tecnologia hídrica, segundo estudos, as barragens em albufeira situadas em regiões de climas quente/moderado podem ser responsáveis pela libertação de 104 milhões de toneladas de metano (CH₄) por ano. A matéria orgânica e biomassa no fundo da barragem, proveniente da flora e fauna que vivem e morrem, vão sofrer um processo de fermentação microbológica. Os níveis de emissões podem variar, dependendo do ecossistema envolvente, da profundidade ou das condições de operação da barragem (Lima, 2007).

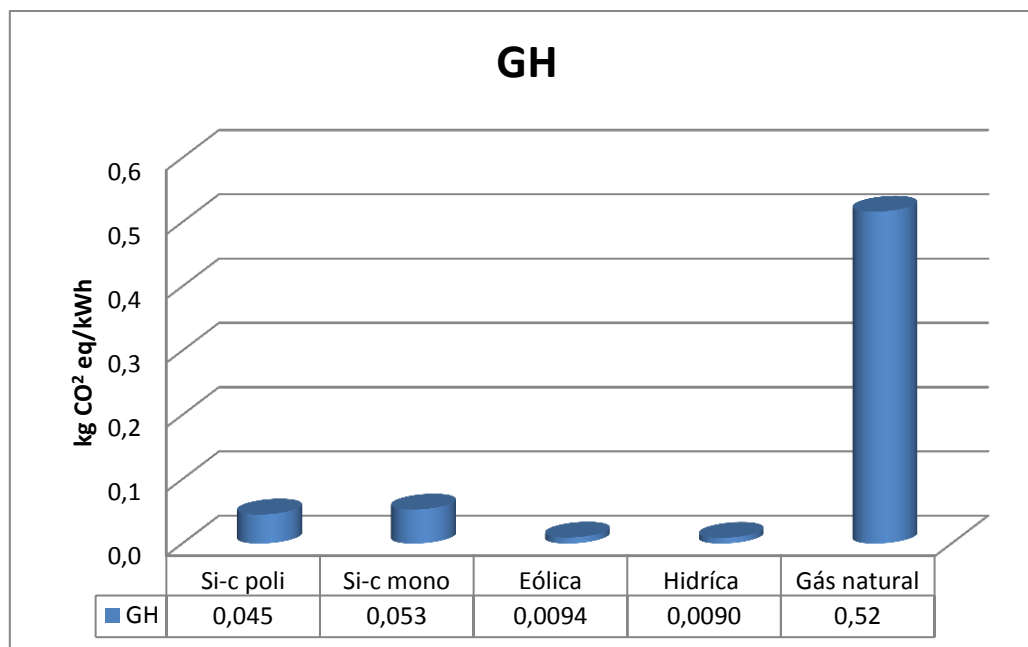


Figura 4.11 - Indicador GH para as fontes de electroprodução.

Poluição ar (PA) e Dioxinas e furanos (DF)

Relativamente à poluição do ar, a tecnologia fotovoltaica apresenta o valor mais elevado, 0,12 kg NO_x eq/kWh, seguido da tecnologia de gás natural, com kg NO_x eq/kWh.

Para a tecnologia fotovoltaica, os principais impactes estão associados à extracção do cobre, produção do alumínio e soldaduras efectuadas nos processos.

A eólica apresenta o valor mais baixo.

Em todos tipos de tecnologia ocorre o processamento de metais que origina consequentemente emissão de dioxinas e furanos. Estes geram graves problemas para a saúde pública, apresentando propriedades cancerígenas. Dado o seu perigo, o factor de equivalência na metodologia Ecoblok é muito elevado. Apesar de correcto, o factor de equivalência vai-se sobrepor aos outros poluentes do ar influenciando os resultados finais.

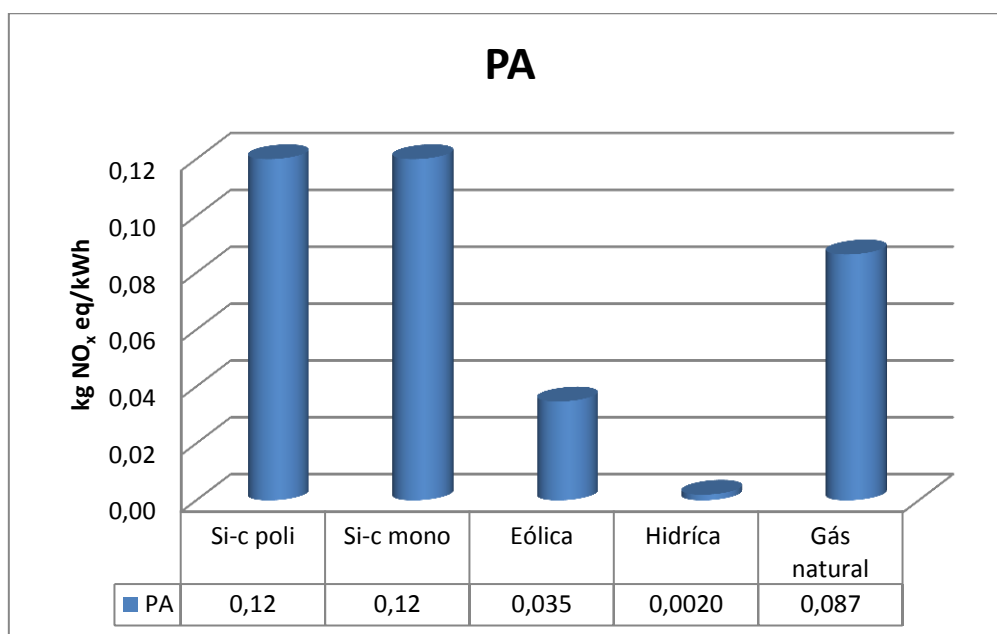


Figura 4.12 - Indicador PA+DF para as fontes de electroprodução.

Poluição de água e solo (PWL) e Dioxinas e furanos (DF)

Quanto à poluição da água, a tecnologia fotovoltaica apresenta o valor mais elevado, 0,043 kg N eq/kWh, seguido da tecnologia de gás natural com 0,016 kg N eq/kWh.

Os impactos da tecnologia de gás natural estão associados às águas devolvidas às massas de águas, estas estão alteradas em termos de temperatura, proporcionando condições ideais para fenómenos de eutrofização. Para impedir o crescimento de comunidades de organismos nas tubagens do circuito de água de refrigeração, são adicionadas substâncias às massas de água, como por exemplo o cloro.

Os impactos da tecnologia fotovoltaica estão associados maioritariamente à extracção mineira e metalurgia do cobre.

A tecnologia hídrica apresenta o valor mais baixo.

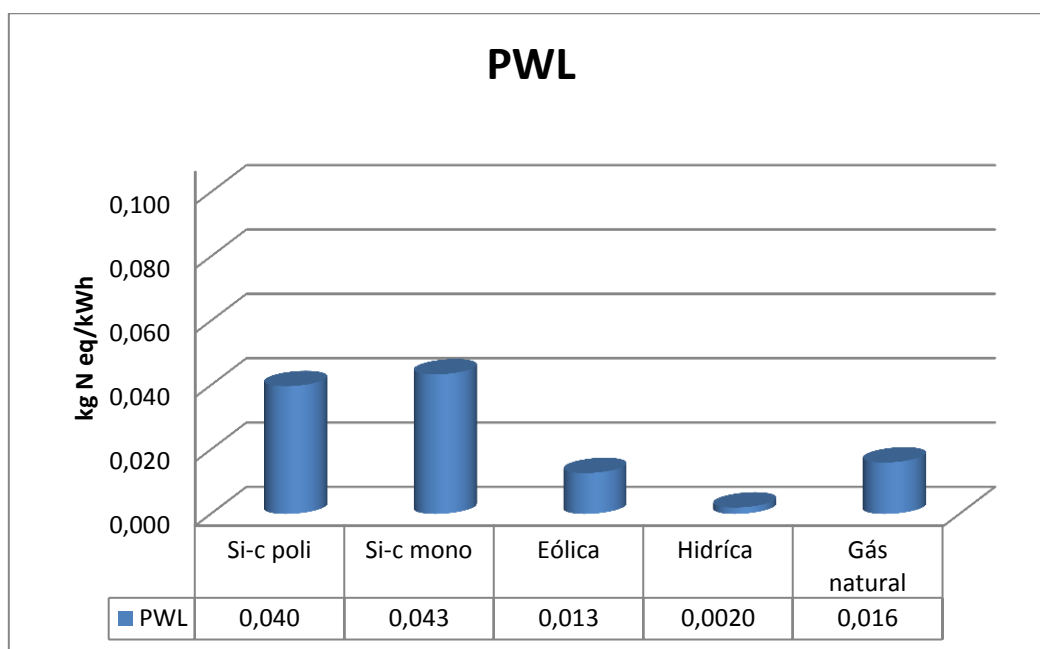


Figura 4.13 - Indicador PWL+DF para as fontes de electroprodução.

Discussão geral da comparação das tecnologias de electroprodução

Comparando as quatro fontes de electroprodução, a tecnologia de gás natural apresenta-se como a que mais impactes gera. Este resultado já era esperado por se tratar de uma fonte de energia consumidora de combustíveis de origem fóssil. Contrariamente, a tecnologia eólica apresenta-se como a tecnologia que menos impactes gera.

Para o funcionamento da tecnologia de gás natural é necessária a constante exploração e consumo de gás natural. Uma vez que se trata de um combustível de origem fóssil, o seu consumo vai produzir grandes quantidades de GEE.

A energia hídrica apresenta como principal desvantagem a grande área ocupada pelas massas de água, que origina uma mudança drástica nos ecossistemas e geografia local.

Embora a tecnologia fotovoltaica não se apresente como a que gera menos impactes, algumas medidas podem ser implementadas com o objectivo de reduzi-los, como por exemplo melhorar a eficiência energética das fases do ciclo de vida, melhorar os processos de produção da célula fotovoltaica, reduzir o consumo de matéria-prima, reciclar e reutilizar o silício e, ainda, reciclar os painéis em fim de vida.

5. Conclusão

5.1. Síntese

Após os estudos concretizados nesta dissertação, pôde-se concluir que o principal objectivo foi cumprido, permitindo afirmar que as fases mais problemáticas no ciclo de vida da tecnologia fotovoltaica são a produção da célula e a produção dos componentes BOS. O segundo objectivo permitiu identificar a fonte de energia eólica como a que menos impactes gera na maioria dos indicadores.

Na fase de operação, o PV tem a vantagem de não apresentar quaisquer emissões de poluentes. Durante a operação do sistema, os impactes provocados com a manutenção foram considerados mínimos ou praticamente inexistentes, para o caso em estudo. Porém, no caso de grandes centrais fotovoltaicas a manutenção poderá ter impactes significativos.

Quanto ao processo de reciclagem, ainda se encontram em desenvolvimento métodos capazes de recuperar as bolachas de silício, que giram menos impactes ambientais, consumam menos energia e sejam economicamente viáveis.

O principal produtor da tecnologia fotovoltaica é a China, que representa cerca de 45% do mercado mundial, principalmente no policristalino. Com esta influência no mercado, é necessário ter em atenção que o mix energético deste país é baseado essencialmente em combustíveis fósseis, sendo que 79% da energia produzida provém do carvão. Este aspecto vai influenciar negativamente o ciclo de vida da tecnologia fotovoltaica no indicador de emissão de GEE.

Os indicadores mais relevantes na análise ciclo vida da produção do painel são a extracção de recursos, a emissão de GEE e a poluição da água e solo. O indicador extracção de recursos (RE) está ligado à necessidade de matéria-prima para os painéis e ao consumo de energia, a emissão de GEE (GH) é derivada do mix energético do país e do transporte de mercadorias entre locais. Por sua vez, a poluição da água e solo (PWL) é negativamente influenciada pela exploração mineira e pela metalurgia do cobre.

Dos dois tipos de tecnologia fotovoltaica estudada, o Si-c mono apresenta-se como a tecnologia que gera mais impactes no seu ciclo de vida. O processo de formação do cristal monocristalino através do processo de Czochralski é um processo lento e com grande consumo energético.

Com base na comparação estabelecida entre as quatro fontes de electroprodução, é possível constatar que a fonte de energia de gás natural apresenta-se como a tecnologia que gera mais impactes, por kWh produzido, tendo os valores mais elevados nos indicadores WA, RE e GH. Já a fonte de energia eólica apresenta-se como a tecnologia que gera menos impactes por kWh. A fonte de energia fotovoltaica apresenta o valor mais elevado nos indicadores PA e PWL, estando o mesmo relacionado

com o processamento do silício, alumínio e cobre. Por sua vez, a fonte de energia hídrica apresenta o valor mais elevado no indicador LU, devido às grandes áreas ocupadas pelas barragens e albufeiras.

O método aplicado só avalia impactes indirectos, não tendo em conta os impactes locais gerados pela instalação concentrada dos parques eólicos.

As aplicações de sistemas PV podem ser bastante vantajosas, uma vez que a sua produção de energia diária corresponde ao horário laboral de muitas empresas. Quando aplicados, estes sistemas revelam ser uma boa opção para reduzir as despesas com o consumo de energia e melhorar a pegada do ciclo de vida de um produto.

Comparando a tecnologia PV com as tecnologias eólica e hídrica, o PV oferece a vantagem de ter uma produção mais estável e previsível, de produzir energia mesmo com o céu nublado e de poder ser aplicado em qualquer lugar que receba irradiação e que seja livre de sombras. A tecnologia eólica, por outro lado, requer condições mais específicas para a sua instalação, necessitando de estudos prévios mais aprofundados no local. Produz mais energia durante a noite, altura de menor consumo energético, e o aerogerador só consegue produzir energia num certo intervalo de velocidades do vento. O vento é um recurso instável que nunca permite saber quando começa e acaba. No que concerne à tecnologia hídrica, esta só pode ser implementada em sítios específicos e a quantidade de energia produzida está dependente da precipitação anual.

O método Ecoblok mostrou-se uma ferramenta simples, clara e abrangente, capaz de fornecer dados concretos para uma análise de impactes segundo uma perspectiva de ACV. Os indicadores foram calculados com base nos processos doecoinvent, complementados com os dados fornecidos pela OpenRenewables.

Embora a tecnologia fotovoltaica não seja a fonte de produção com menor pegada ambiental, pode-se afirmar que é uma boa solução para ajudar a reduzir a dependência energética do país, descentralizar a produção de energia e reduzir o consumo energético das empresas. Os impactes gerados durante o seu ciclo de vida são compensados, em parte, com a redução da emissão de GEE ao longo do seu tempo de vida.

5.2. Limitações

O desenvolvimento da dissertação foi condicionado pela dificuldade na aquisição de dados para alguns processos. Existe ainda algum secretismo atinente à área de produção do PV e algum receio das empresas em colaborarem com estudos de análise de ciclo de vida. A falta de dados leva à utilização de bases que, por vezes, estão desactualizadas e apresentam valores aproximados com alguma margem de erro em relação ao valor real.

5.3. Desenvolvimentos futuros

Para desenvolvimento futuro, seria interessante não só o uso de energias de fonte renovável durante a produção do painel, com o objectivo de melhorar a pegada do ciclo de vida da tecnologia fotovoltaica, como também estudar os impactes gerados pela reciclagem dos painéis, dado que o destino final e o processo de tratamento dos módulos fotovoltaicos ainda não se encontram totalmente esclarecidos.

Seria igualmente pertinente tentar obter dados mais rigorosos no que diz respeito tanto ao processamento do silício, como à aquisição dos componentes BOS e ainda obter dados das emissões de dioxinas e furanos, de modo a ser possível quantificar e padronizar o seu peso no indicador de poluição do ar.

Referências bibliográficas

- APREN, apren.pt. Available at: <http://www.apren.pt/pt/dados-tecnicos-3/dados-nacionais-2/producao-2/a-producao-de-electricidade-em-portugal-2/1-2/peso-das-fontes-de-producao-de-electricidade-em-portugal-em-2013-c/-correcao-de-hidraulicidade/> [Accessed October 13, 2015].
- Curran, M.A., 1996. *Environmental life-cycle assessment*,
- DGEG, 2015. Renováveis estatísticas rápidas maio 2015.
- EPA, 2008. Life Cycle Assessment: Principles and Practice. *Vasa*, (May), p.88. Available at: <http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>.
- ERSE, Portal ERSE - Produção. Available at: <http://www.erse.pt/pt/electricidade/actividadesdosector/producao/Paginas/default.aspx> [Accessed October 15, 2015].
- Flôxo, M., 2012. *Maria João Flôxo Contente de Sousa Avaliação do desempenho ambiental do sector agrícola em Portugal*. FCT-UNL.
- Fraunhofer IBP, Ibp, F. & Engineering, C., 2012. Life Cycle Assessment (LCA) screening of the Maltha recycling process for Si-PV modules. , (June), pp.1–2.
- Fthenakis, V. et al., 2012. Life cycle analysis of high-performance monocrystalline silicon photovoltaic systems: Energy payback times and net energy production value. *27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, pp.4667–4672.
- Fthenakis, V.M. & Kim, H.C., 2011. Photovoltaics: Life-cycle analyses. *Solar Energy*, 85(8), pp.1609–1628. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.002>.
- Gerbinet, S., Belboom, S. & Léonard, A., 2014. Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, pp.747–753. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.043>.
- Gonçalves, S., 2014. *Vanessa Catarina de Sousa Gonçalves O caminho para a viabilidade económica e ambiental da energia fotovoltaica*. FCT-UNL.
- Higino, N., 2014. *Gonçalo Nobre Higino Indicadores de Desempenho Ambiental do Sector Eléctrico em Portugal*. FCT-UNL.
- ISO 14040, 2006. The principles and framework for life cycle assessment (LCA).
- ISO 14044, 2006. Requirements and guidelines for life cycle assessment (LCA).
- Joanaz, J. et al., 2010. EcoBlok – a label to transfer standard environmental information along the product chain.
- Jungbluth, N. et al., 2009. Ecoinvent v2.2 Photovoltaics. , (6).
- Kannan, R. et al., 2006. Life cycle assessment study of solar PV systems: An example of a 2.7 kWp distributed solar PV system in Singapore. *Solar Energy*, 80(5), pp.555–563.
- Kellenberger, D. et al., 2007. Part II Cement Products and Processes. *ecoinvent report No. 7*, (7), pp.1–57.
- Kreiger, M. a., Shonnard, D.R. & Pearce, J.M., 2013. Life cycle analysis of silane recycling in amorphous silicon-based solar photovoltaic manufacturing. *Resources, Conservation and Recycling*, 70, pp.44–49. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.10.002>.
- Lima, I.B.T. et al., 2007. Methane Emissions from Large Dams as Renewable Energy Resources: A Developing Nation Perspective. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 13(2), pp.193–206. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s11027-007-9086-5>.

- Macedo, L., Sobral, N. & Melo, J.J. de, 2005. Guia EcoBlock.
- Martins, R., Ferreira, I. & Fortunato, E., 2012. Materiais e dispositivos fotovoltaicos. , pp.1–38.
- Olson, C. et al., 2013. Current and Future Priorities for Mass and Material in Silicon Pv Module Recycling. *EUPVSEC, Paris*, pp.1–5.
- Pacca, S., Sivaraman, D. & Keoleian, G. a., 2007. Parameters affecting the life cycle performance of PV technologies and systems. *Energy Policy*, 35(6), pp.3316–3326.
- Peng, J., Lu, L. & Yang, H., 2013. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, pp.255–274. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.035>.
- Proença, E.D.R.B., 2007. A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM PORTUGAL - Estado-da-Arte e Perspectivas de Desenvolvimento.
- REN, REN - O Setor Elétrico. Available at: http://www.ren.pt/pt-PT/o_que_fazemos/eletricidade/o_setor_eletrico/#1 [Accessed October 15, 2015].
- Sherwani, a. F., Usmani, J. a. & Varun, 2010. Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), pp.540–544.
- Statista, 2014. • Cumulative solar PV capacity in European countries 2014 | Ranking. Available at: <http://www.statista.com/statistics/280256/cumulative-solar-pv-capacity-in-european-countries/> [Accessed September 9, 2015].
- Statista, 2015. • Major countries in silicon production 2014 | Forecast. Available at: <http://www.statista.com/statistics/268108/world-silicon-production-by-country/> [Accessed September 16, 2015].
- Stoppato, a., 2008. Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation. *Energy*, 33(2), pp.224–232.
- UN contrade, 2015. UN Comtrade | International Trade Statistics Database. Available at: <http://comtrade.un.org/> [Accessed September 16, 2015].
- USGS, 2015. USGS Minerals Information: Mineral Commodity Summaries. Available at: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/> [Accessed September 15, 2015].
- Varun, Bhat, I.K. & Prakash, R., 2009. LCA of renewable energy for electricity generation systems-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(5), pp.1067–1073.
- Wender, B.A. et al., 2014. Illustrating Anticipatory Life Cycle Assessment for Emerging Photovoltaic Technologies. , 2014.
- Yang, D. et al., 2015. Life-cycle assessment of China’s multi-crystalline silicon photovoltaic modules considering international trade. *Journal of Cleaner Production*, 94, pp.35–45. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652615001079>.
- Zhong, Z.W., Song, B. & Loh, P.E., 2011. LCAs of a polycrystalline photovoltaic module and a wind turbine. *Renewable Energy*, 36(8), pp.2227–2237. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2011.01.021>.

A. Anexos

Anexo1 – Especificações do módulo em estudo.

Especificações comuns a todos os modelos

Comprimento (L)	[mm]	1659.5 ±3
Largura (W)	[mm]	988 ±3
Altura (H)	[mm]	40 ±1
Peso	[Kg]	22 ±5%
Tipo Conector		MC4 (TE SolarLok)
Diodos de Bypass		3
Carga estática Máx.		5400 Pa
Comprimento do Cabo (C)	[mm]	1000 / 1000 ±10
Secção do Cabo	[mm ²]	4
Classe de Protecção		II
Technologie		Silício Policristalino
Gama de temperatura de operação	°C	-10 ≤ T ≤ +45
α (Isc)	(Isc) [%/K]	0.0435
β (Voc)	(Voc) [%/K]	-0.3292
Γ (Pmpp)	(Pmpp) [%/K]	-0.4459

A redução na eficiência de 1.000 para 200 W/m² é cerca de 1%.



Equipamento Eléctrico. Instalação reservada a profissionais qualificados. Esta especificação não dispensa a leitura e compreensão dos respectivos manuais



PID Tested !



Componentes de Qualidade

60 Células de 6 polegadas, policristalinas de alta qualidade. Robusto perfil de alumínio anodizado. Vidro de 4 milímetros de espessura, de elevada transmissão energética. Baixo coeficiente de correção de temperatura, permitindo potências mais elevadas a altas temperaturas.

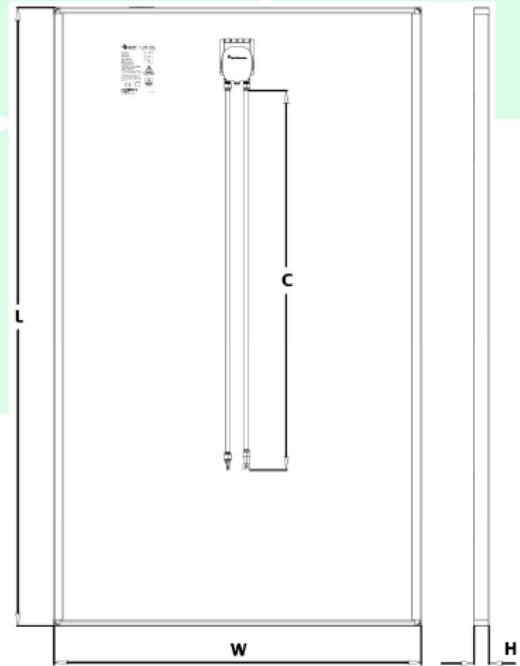


Figura A.1 - Especificações do módulo em estudo. Fonte: OpenRenewables 2015.

Anexo 2 - Processos ecoinvent utilizados na modelação.

	Name	Location	Infrastru cturePro	Unit	photovoltaic	photovoltaic	photovoltaic	Standard deviat	GeneralComment
					cell, single-Si, at plant	cell, multi-Si, at plant	cell, ribbon-Si, at plant		
	Location InfrastructureProcess Unit				RER 0 m2	RER 0 m2	RER 0 m2		
resource, in water technosphere	Water, cooling, unspecified natural origin electricity, medium voltage, production UCTE, at grnd	-	-	m3	9.99E-1	9.99E-1	9.99E-1	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
	natural gas, burned in industrial furnace low-NOx >100kW	UCTE	0	kWh	3.02E+1	3.02E+1	3.02E+1	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
infrastructure	light fuel oil, burned in industrial furnace 1MW, non- modulating	RER	0	MJ	1.16E+0	1.16E+0	1.16E+0	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
	photovoltaic cell factory	DE	1	unit	4.00E-7	4.00E-7	4.00E-7	3.00	(1,2,1,1,1,3); estimation with company data
wafers	single-Si wafer, photovoltaics, at plant	RER	0	m2	1.06E+0	-	-	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, 6% losses
	multi-Si wafer, at plant	RER	0	m2	-	1.06E+0	-	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, 6% losses
materials	multi-Si wafer, ribbon, at plant	RER	0	m2	-	-	1.08E+0	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, 7% losses
	metallization paste, front side, at plant	RER	0	kg	7.40E-3	7.40E-3	7.40E-3	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for electric contacts
chemicals	metallization paste, back side, at plant	RER	0	kg	4.93E-3	4.93E-3	4.93E-3	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for electric contacts
	metallization paste, back side, aluminium, at plant	RER	0	kg	7.19E-2	7.19E-2	7.19E-2	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for electric contacts
gases	ammonia, liquid, at regional storehouse	RER	0	kg	6.74E-3	6.74E-3	6.74E-3	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for de-oxidation (1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for emitter formation, I.e.
	phosphoric acid, fertiliser grade, 70% in H2O, at plant	GLO	0	kg	7.67E-3	7.67E-3	7.67E-3	1.07	Ferro FX99-014; hazardous components 1-5% P2O5, 40-90% organic chemicals.
packaging	phosphoryl chloride, at plant	RER	0	kg	1.59E-3	1.59E-3	1.59E-3	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, POCl3 for emitter formation (1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, tetraisopropyltitanate (TPT,
	titanium dioxide, production mix, at plant	RER	0	kg	1.42E-6	1.42E-6	1.42E-6	1.07	a titanium precursor) for titanium dioxide antireflection coating deposition
transport	ethanol from ethylene, at plant	RER	0	kg	6.41E-4	6.41E-4	6.41E-4	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for cleaning
	isopropanol, at plant	RER	0	kg	7.89E-2	7.89E-2	7.89E-2	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for cleaning
emission air, high population density	solvents, organic, unspecified, at plant	GLO	0	kg	1.43E-3	1.43E-3	1.43E-3	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for cleaning
	silicone product, at plant	RER	0	kg	1.21E-3	1.21E-3	1.21E-3	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, silane (SiH4) for silicon nitride deposition
wastewater	sodium silicate, spray powder 80%, at plant	RER	0	kg	7.48E-2	7.48E-2	7.48E-2	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007
	calcium chloride, CaCl2, at regional storage	CH	0	kg	2.16E-2	2.16E-2	2.16E-2	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007
infrastructure	acetic acid, 98% in H2O, at plant	RER	0	kg	2.83E-3	2.83E-3	2.83E-3	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for cleaning
	hydrochloric acid, 30% in H2O, at plant	RER	0	kg	4.56E-2	4.56E-2	4.56E-2	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for surface etching
gases	hydrogen fluoride, at plant	GLO	0	kg	3.77E-2	3.77E-2	3.77E-2	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for etching phosphor glass
	nitric acid, 50% in H2O, at plant	RER	0	kg	2.67E-2	2.67E-2	2.67E-2	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for etching phosphor glass
packaging	sodium hydroxide, 50% in H2O, production mix, at plant	RER	0	kg	1.57E-1	1.57E-1	1.57E-1	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, for etching and cleaning
	argon, liquid, at plant	RER	0	kg	2.57E-2	2.57E-2	2.57E-2	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
transport	oxygen, liquid, at plant	RER	0	kg	1.02E-1	1.02E-1	1.02E-1	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, diffusion
	nitrogen, liquid, at plant	RER	0	kg	1.85E+0	1.85E+0	1.85E+0	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, diffusion and damage etching
infrastructure	tetrafluoroethylene, at plant	RER	0	kg	3.16E-3	3.16E-3	3.16E-3	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, aggregate value for different fluorinated source gases
	polystyrene, expandable, at plant	RER	0	kg	4.07E-4	4.07E-4	4.07E-4	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, packaging
wastewater	transport, transoceanic freight ship	OCE	0	tkm	3.06E-2	3.06E-2	3.06E-2	2.09	(4,5,na,na,na,na); 20% of wafer production from overseas, 10000km
	transport, lorry >16t, fleet average	RER	0	tkm	2.75E-1	2.74E-1	2.74E-1	2.09	(4,5,na,na,na,na); Standard distance 100km, 500km for wafers
infrastructure	transport, freight, rail	RER	0	tkm	1.52E+0	1.52E+0	1.52E+0	2.09	(4,5,na,na,na,na); Standard distance 600km
	water, completely softened, at plant	RER	0	kg	1.37E+2	1.37E+2	1.37E+2	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
infrastructure	treatment, PV cell production effluent, to wastewater treatment, class 3	CH	0	m3	2.17E-1	2.17E-1	2.17E-1	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data, mix of neutral, alkaline and acid solution and organic waste
	disposal, waste, Si waferprod., inorg. 9.4% water, to residual material landfill	CH	0	kg	2.76E-1	2.76E-1	2.76E-1	1.07	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
emission air, high population density	Heat, waste	-	-	MJ	1.09E+2	1.09E+2	1.09E+2	1.07	(1,2,1,1,1,3); Calculation
	Aluminum	-	-	kg	7.73E-4	7.73E-4	7.73E-4	5.00	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
emission air, high population density	Ethane, hexafluoro-, HFC-116	-	-	kg	1.19E-4	1.19E-4	1.19E-4	1.51	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, calculated as 50% of CO2- eq for FC-gases
	Hydrogen chloride	-	-	kg	2.66E-4	2.66E-4	2.66E-4	1.51	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
emission air, high population density	Hydrogen fluoride	-	-	kg	4.85E-6	4.85E-6	4.85E-6	1.51	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
	Lead	-	-	kg	7.73E-4	7.73E-4	7.73E-4	5.00	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
emission air, high population density	NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	-	-	kg	1.94E-1	1.94E-1	1.94E-1	1.51	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
	Nitrogen oxides	-	-	kg	5.00E-5	5.00E-5	5.00E-5	1.81	(3,4,3,3,1,5); Hagedorn 1992, due to nitric acid use (1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, calculated as 50% of CO2- eq for FC-gases
emission air, high population density	Methane, tetrafluoro-, R-14	-	-	kg	2.48E-4	2.48E-4	2.48E-4	1.51	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, calculated as 50% of CO2- eq for FC-gases
	Particulates, <2.5 um	-	-	kg	2.66E-3	2.66E-3	2.66E-3	3.00	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
emission air, high population density	Silicon	-	-	kg	7.27E-5	7.27E-5	7.27E-5	5.00	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
	Silver	-	-	kg	7.73E-4	7.73E-4	7.73E-4	5.00	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
emission air, high population density	Sodium	-	-	kg	4.85E-5	4.85E-5	4.85E-5	5.00	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
	Tin	-	-	kg	7.73E-4	7.73E-4	7.73E-4	5.00	(1,2,1,1,1,3); de Wild 2007, company data
emission air, high population density	weight, cell	-	-	kg	0.015	0.014	0.014		
	weight, materials	-	-	kg	2.53	2.53	2.53		

Figura A.2 – Entradas e saídas processo de produção da célula, fonte: ecoinvent, 2009.

	Name	Location	Infrastructure	Process	Unit	photovoltaic	photovoltaic	Uncertainty	Standard	Deviation	GeneralComment	de Wild 2007,
						laminata, single-Si, at plant	panel, single- Si, at plant					RER 2005
	Location					1	1					m2
	InfrastructureProcess					m2	m2					
technosphere	electricity, medium voltage, production UCTE, at grid	UCTE	0	kWh	4.71E+0	4.71E+0	1	1.14			(3,3,1,1,1,3); calculated mean figure of 3 companies	6.83E+0
	natural gas, burned in industrial furnace low-NOx > 100kW	RER	0	MJ	5.41E+0	5.41E+0	1	1.14			(3,3,1,1,1,3); calculated mean figure of 3 companies	-
infrastructure	photovoltaic panel factory	GLO	1	unit	4.00E-6	4.00E-6	1	3.02			(1,4,1,3,1,3); Literature	
	tap water, at user	RER	0	kg	2.13E+1	2.13E+1	1	1.13			(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, glass rinsing and general use	2.13E+1
	tempering, flat glass	RER	0	kg	1.01E+1	1.01E+1	1	1.13			(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007	
	wire drawing, copper	RER	0	kg	1.13E-1	1.13E-1	1	1.13			(1,4,1,3,1,3); estimation for use of copper wires	
cells	photovoltaic cell, single-Si, at plant	RER	0	m2	9.32E-1	9.32E-1	1	1.13			(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, Estimation 60 cells a 1.56dm2 +2% cell loss	9.32E-1
	photovoltaic cell, multi-Si, at plant	RER	0	m2	-	-	1	1.13			(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, Estimation 60 cells a 1.56dm2 +2% cell loss	9.32E-1
	photovoltaic cell, ribbon-Si, at plant	RER	0	m2	-	-	1	1.13			(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, Estimation 60 cells a 1.56dm2 +2% cell loss	9.32E-1
materials	aluminium alloy, AlMg3, at plant	RER	0	kg	-	2.63E+0	1	1.13			(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, profile for frame	2.63E+0
	nickel, 99.5%, at plant	GLO	0	kg	1.63E-4	1.63E-4	1	1.13			(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, plating on interconnect ribbons	1.63E-4
	brazing solder, cadmium free, at plant	RER	0	kg	8.76E-3	8.76E-3	1	1.13			(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, Sn plating on interconnect/terminal ribbons	8.76E-3
	solar glass, low-iron, at regional storage	RER	0	kg	1.01E+1	1.01E+1	1	1.24			(3,2-4 mm for different producers), 1% losses, density 2.5 g/cm3	1.01E+1
	copper, at regional storage	RER	0	kg	1.13E-1	1.13E-1	1	1.13			(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, copper ribbons for cell interconnection	1.13E-1
	glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulding, at plant	RER	0	kg	1.88E-1	1.88E-1	1	1.13			(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, polyphenylenoxid for junction box	1.88E-1
	ethylvinylacetate, foil, at plant	RER	0	kg	1.00E+0	1.00E+0	1	1.13			(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, EVA consumption 0.96 kg/m2, 6% more than glass area	1.00E+0
	polyvinylfluoride film, at plant	US	0	kg	1.10E-1	1.10E-1	1	1.13			(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, back foil, for solar cell module, 350 micron thickness: 2x37 micron polyvinyl fluoride, 250 micron polyethylene terephthalate; 0.488 g/m2, 7% cutting loss	1.10E-1
	polyethylene terephthalate, granulate, amorphous, at plant	RER	0	kg	3.73E-1	3.73E-1	1	1.13			(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, back foil, for solar cell module, 350 micron thickness: 2x37 micron polyvinyl fluoride, 250 micron polyethylene terephthalate; 0.488 g/m2, 7% cutting loss	3.73E-1
	silicone product, at plant	RER	0	kg	1.22E-1	1.22E-1	1	1.13			(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, kit to attach frame and junction box and for diaphragm of laminator	1.22E-1
auxiliary materials	acetone, liquid, at plant	RER	0	kg	1.30E-2	1.30E-2	1	1.13			(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, cleaning fluid	1.30E-2
	methanol, at regional storage	CH	0	kg	2.16E-3	2.16E-3	1	1.13			(1,4,1,3,1,3); GSS 2001, auxiliary material	
	vinyl acetate, at plant	RER	0	kg	1.64E-3	1.64E-3	1	1.13			(1,4,1,3,1,3); GSS 2001, ethylacetate, auxiliary material	
	lubricating oil, at plant	RER	0	kg	1.61E-3	1.61E-3	1	1.13			(1,4,1,3,1,3); GSS 2001, auxiliary material	
	corrugated board, mixed fibre, single wall, at plant	RER	0	kg	1.10E+0	1.10E+0	1	1.13			(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, packaging estimation	1.10E+0
	1-propanol, at plant	RER	0	kg	8.14E-3	8.14E-3	1	1.13			(1,4,1,3,1,3); de Wild 2007, soldering flux, 95% propanol	8.14E-3
transport	transport, lorry >16t, fleet average	RER	0	tkm	1.35E+0	1.61E+0	1	2.09			(4,5,na,na,na,na); Standard distance 100km, cells 500km	
	transport, freight, rail	RER	0	tkm	7.87E+0	9.45E+0	1	2.09			(4,5,na,na,na,na); Standard distance 600km	
disposal	disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to municipal incineration	CH	0	kg	3.00E-2	3.00E-2	1	1.13			(1,4,1,3,1,3); Alsema (personal communication) 2007, production waste	3.00E-2
	disposal, polyvinylfluoride, 0.2% water, to municipal incineration	CH	0	kg	1.10E-1	1.10E-1	1	1.13			(1,4,1,3,1,3); Calculation, including disposal of the panel after life time	
	disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to municipal incineration	CH	0	kg	1.69E+0	1.69E+0	1	1.13			(1,4,1,3,1,3); Calculation, including disposal of the panel after life time	7.51E-2
	disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration	CH	0	kg	1.61E-3	1.61E-3	1	1.13			(1,4,1,3,1,3); Calculation, oil used during production	
	treatment, sewage, from residence, to wastewater treatment, class 2	CH	0	m3	2.13E-2	2.13E-2	1	1.13			(1,4,1,3,1,3); Calculation, water use	
emission air	Heat, waste	-	-	MJ	1.70E+1	1.70E+1	1	1.29			(3,4,3,3,1,5); Calculation, electricity use	
	total weight			kg	12.0	14.6						14.7
	Disposal			kg	1.8	1.8						0.1

Figura A.3 - Entradas e saídas processo de montagem do painel e instalação, fonte: ecoinvent, 2009.

	Name	Location	Infrastructur	Unit	slanted-roof construction, mounted, on roof
					RER
	Location				1
	InfrastructureProcess				m2
	Unit				
technosphere	aluminium, production mix, wrought alloy, at plant	RER	0	kg	2.84E+0
	corrugated board, mixed fibre, single wall, at plant	RER	0	kg	1.33E-1
	polyethylene, HDPE, granulate, at plant	RER	0	kg	1.40E-3
	polystyrene, high impact, HIPS, at plant	RER	0	kg	7.02E-3
	polyurethane, flexible foam, at plant	RER	0	kg	-
	synthetic rubber, at plant	RER	0	kg	-
	steel, low-alloyed, at plant	RER	0	kg	1.50E+0
	gravel, unspecified, at mine	CH	0	kg	-
	section bar extrusion, aluminium	RER	0	kg	3.03E+0
	sheet rolling, steel	RER	0	kg	1.50E+0
section bar rolling, steel	RER	0	kg	-	
transport	transport, lorry >16t, fleet average	RER	0	tkm	2.25E-1
	transport, freight, rail	RER	0	tkm	1.50E+0
	transport, van <3.5t	RER	0	tkm	4.34E-1
disposal	disposal, packaging cardboard, 19.6% water, to municipal incineration	CH	0	kg	1.33E-1
	disposal, building, polyethylene/polypropylene products, to final disposal	CH	0	kg	1.40E-3
	disposal, building, polystyrene isolation, flame-retardant, to final disposal	CH	0	kg	7.02E-3
product	facade construction, mounted, at building	RER	1	m2	0
	facade construction, integrated, at building	RER	1	m2	0
	flat roof construction, on roof	RER	1	m2	0
	slanted-roof construction, mounted, on roof	RER	1	m2	1.00E+0
	slanted-roof construction, integrated, on roof	RER	1	m2	-
information	total weight, materials			kg	4.5
	total weight, structure			kg	4.3
	panel area			m2	1.0
	minimum weight, construction			kg	1.0
	maximum, construction			kg	20.0
	number, examples			1	35
	mean, construction, 2008, weighted with the installed capacity			kg	4.5
	standard deviation			kg	1.2
	correction factor			%	1.54
	mean, construction, 2007, ecoinvent v2.0			kg	4.0
mean, construction, 2003, ecoinvent v1.0			kg	4.4	

Figura A.4 – Entradas e saídas produção estrutura de suporte, fonte:ecoinvent,2009.

	Name	Location	InfrastructurePr	ocess	Unit	inverter, 500W, at plant
	Location InfrastructureProcess Unit					RER 1 unit
product	inverter, 500W, at plant	RER	1	unit		1.00E+0
product	inverter, 2500W, at plant	RER	1	unit		0
technosphere	electricity, medium voltage, production UCTE, at grid	UCTE	0	kWh		4.24E+0
	aluminium, production mix, cast alloy, at plant	RER	0	kg		6.82E-1
	copper, at regional storage	RER	0	kg		2.00E-3
	steel, low-alloyed, at plant	RER	0	kg		7.80E-2
	acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer, ABS, at plant	RER	0	kg		1.48E-1
	polycarbonate, at plant	RER	0	kg		6.80E-2
	polyethylene, HDPE, granulate, at plant	RER	0	kg		1.40E-2
	styrene-acrylonitrile copolymer, SAN, at plant	RER	0	kg		2.00E-3
	polyvinylchloride, at regional storage	RER	0	kg		2.00E-3
electronical components	printed wiring board, through-hole, at plant	GLO	0	m2		5.96E-2
	transformer, high voltage use, at plant	GLO	0	kg		3.10E-1
	connector, clamp connection, at plant	GLO	0	kg		5.00E-2
	inductor, ring core choke type, at plant	GLO	0	kg		7.40E-2
	integrated circuit, IC, logic type, at plant	GLO	0	kg		6.00E-3
	transistor, wired, small size, through-hole mounting, at plant	GLO	0	kg		8.00E-3
	diode, glass-, through-hole mounting, at plant	GLO	0	kg		1.00E-2
	capacitor, film, through-hole mounting, at plant	GLO	0	kg		7.20E-2
	capacitor, electrolyte type, > 2cm height, at plant	GLO	0	kg		5.40E-2
	capacitor, Tantalum-, through-hole mounting, at plant	GLO	0	kg		4.80E-3
processing	resistor, metal film type, through-hole mounting, at plant	GLO	0	kg		1.00E-3
	sheet rolling, steel	RER	0	kg		7.80E-2
	wire drawing, copper	RER	0	kg		2.00E-3
	section bar extrusion, aluminium	RER	0	kg		6.82E-1
infrastructure	metal working factory	RER	1	unit		1.04E-9
packaging	corrugated board, mixed fibre, single wall, at plant	RER	0	kg		1.12E+0
	polystyrene foam slab, at plant	RER	0	kg		1.30E-1
	fleece, polyethylene, at plant	RER	0	kg		3.00E-2
transport	transport, lorry > 16t, fleet average	RER	0	tkm		3.66E-1
	transport, freight, rail	RER	0	tkm		1.89E+0
	transport, transoceanic freight ship	OCE	0	tkm		8.09E+0
emission air, high pop. dens.	Heat, waste	-	-	MJ		1.53E+1
disposal	disposal, packaging cardboard, 19.6% water, to municipal incineration	CH	0	kg		1.12E+0
	disposal, polystyrene, 0.2% water, to municipal incineration	CH	0	kg		1.32E-1
	disposal, polyethylene, 0.4% water, to municipal incineration	CH	0	kg		3.00E-2
	disposal, plastic, industr. electronics, 15.3% water, to municipal incineration	CH	0	kg		2.30E-1
	disposal, treatment of printed wiring boards	GLO	0	kg		6.90E-1

Figura A.5 - Entradas e saídas produção inversor, fonte:ecoinvent,2009.

	Name	Location	Infrastructure	Process	Unit	
	Location	Infrastructure	Process	Unit		
product technosphere	electric installation, photovoltaic plant, at plant	CH	1	unit		1.00E+0
	copper, at regional storage	RER	0	kg		1.47E+1
	brass, at plant	CH	0	kg		2.00E-2
	zinc, primary, at regional storage	RER	0	kg		4.00E-2
	steel, low-alloyed, at plant	RER	0	kg		8.60E-1
	nylon 6, at plant	RER	0	kg		2.30E-1
	polyethylene, HDPE, granulate, at plant	RER	0	kg		1.76E+1
	polyvinylchloride, bulk polymerised, at plant	RER	0	kg		2.13E+0
	polycarbonate, at plant	RER	0	kg		2.00E-1
	epoxy resin, liquid, at plant	RER	0	kg		2.00E-3
manufacturing transport	wire drawing, copper	RER	0	kg		1.47E+1
	transport, lorry 20-28t, fleet average	CH	0	tkm		2.15E+0
disposal	transport, freight, rail	CH	0	tkm		1.34E+1
	disposal, plastic, industr. electronics, 15.3% water, to municipal incineration	CH	0	kg		2.02E+1
	disposal, building, electric wiring, to final disposal	CH	0	kg		6.00E-2
	total weight			kg		35.8

Figura A.6 - Entradas e saídas produção cabos eléctricos, fonte:ecoinvent,2009.

General Flow information				Representation in ecoinvent 2000						
Input	Process Name	Output	Remarks	Category	Sub-category	Infrastructure	Location	Modul name in ecoinvent 2000	Mean value	Unit
sand, at mine	silica sand	silica sand		construction materials	additives	No	CH	sand, at mine	1.04E+00	kg
heating energy			for drying of sand from 5 to 1% of water	oil	heating systems	No	CH	heat, light fuel oil, at industrial furnace 1MW	2.00E-01	MJ
					construction materials	additives	No	DE	silica sand, at plant	1.00E+00

Figura A.7 - Entradas e saídas extracção de silício, fonte:ecoinvent,2009.

Anexo 3 – Estimativa da produção anual de um sistema 1 kWp

Performance of Grid-connected PV

PVGIS estimates of solar electricity generation

Location: 38°39'45" North, 9°12'19" West, Elevation: 95 m a.s.l.,
Solar radiation database used: PVGIS-CMSAF

Nominal power of the PV system: 1.0 kW (crystalline silicon)

Estimated losses due to temperature and low irradiance: 10.9% (using local ambient temperature)

Estimated loss due to angular reflectance effects: 2.5%

Other losses (cables, inverter etc.): 14.0%

Combined PV system losses: 25.3%

Fixed system: inclination=34 deg., orientation=0 deg.				
Month	Ed	Em	Hd	Hm
Jan	3.11	96.3	3.94	122
Feb	3.99	112	5.14	144
Mar	4.77	148	6.27	195
Apr	4.95	148	6.60	198
May	5.17	160	6.95	216
Jun	5.21	156	7.17	215
Jul	5.35	166	7.45	231
Aug	5.34	166	7.46	231
Sep	5.00	150	6.90	207
Oct	4.25	132	5.69	176
Nov	3.39	102	4.43	133
Dec	2.92	90.6	3.75	116
Year	4.46	136	5.98	182
Total for year		1630		2180

Ed: Average daily electricity production from the given system (kWh)

Em: Average monthly electricity production from the given system (kWh)

Hd: Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m²)

Hm: Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m²)

PVGIS (c) European Communities, 2001-2012

Reproduction is authorised, provided the source is acknowledged.

<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

Figura A.8 - Estimativa da produção anual de um sistema 1 kWp, fonte: PVGIS 2015.

Anexo 4 – Resultados da ACV para 1 kWp

Tabela A-1 - Indicadores para os materiais usados na OpenRenewables por kWp.

	WA (m ³ eq)	RE (kg eq.)	LU (m ² .a eq)	GH (kg CO ₂ eq)	PA (kg N _{ox} eq)	PWL (kg N eq)	DF (µg TCDD eq)
Alumínio	2,81	50,1	3,43	56,0	1,25	21,3	639
Cartão/papel	0,0762	3,08	11,7	2,35	0,0479	0,547	250
Cobre	0,0555	4,70	0,720	2,08	3,03	49,8	2,03
Vidro	0,707	146	4,13	83,2	1,34	7,05	49,1
Plásticos	0,295	35,9	1,74	25,1	0,350	4,35	24,1
Madeira	0,00382	0,663	4,25	0,303	0,0129	0,227	0,165
Electricidade	0,292	25,8	2,33	38,5	0,614	5,44	5,94
Água	0,214	0,131	0,0160	0,0591	0,000830	0,0249	0,00804

Anexo 5 – Factores equivalência método EcoBlok

Tabela A-2 - Factores equivalência usados pelo método Ecoblok.

f_{eq} GEE	
CO ₂	1,00
CH ₄	23,0
N ₂ O	296
f_{eq} WA	
Portugal	1,20
Alemanha	2,50
China	1,80
f_{eq} RE	
Bauxite; Alumínio	1,00
Cobre	3,09
Ferro; Aço	1,56
Mercúrio	1,46
Prata	7,22
Chumbo	4,70
Lítio	1,00
Areias	4
níquel	2,26
f_{eq} PWL	
Compostos orgânicos halogenados (AOX)	50
Arsénio total (As)	10000
Benzeno	250
Cádmio total (Cd)	10000
Crómio total (Cr)	1000
Cobre total (Cu)	1000
Mercúrio total (Hg)	50000
Níquel total (Ni)	2500
Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos	10000
f_{eq} DF	
PCDD+PCDF (dioxinas + furanos)	10 ⁸
f_{eq} PA	
NH ₃	10
Arsénio total (As)	5000
Benzeno	100
Hexaclorobenzeno (HCB)	10000
Cádmio total (Cd)	10000
Monóxido de carbono (CO)	0,2
Crómio total (Cr)	1000
Cobre total (Cu)	1000