

# Sustentabilidade de aerogeradores urbanos

Alexandra Filipa Rodrigues Dantas

Orientador: Professor Doutor Luís Manuel Frólen Ribeiro

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto  
Politécnico de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Energias  
Renováveis e Eficiência Energética

Dezembro 2014

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto  
Politécnico de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Energias  
Renováveis e Eficiência Energética ”

Orientador: Professor Doutor Luís Manuel Frólén Ribeiro

# Agradecimentos

Agradeço o apoio da equipa Enhanced WT pela paciência e ajuda constante demonstrada ao longo deste ano de trabalho: Prof. Doutor Luís Ribeiro, Prof. Doutor Carlos Costa, Prof. Mestre Jacinta Costa, Prof. Doutor Jorge Alves, Mestre Jorge Paulo, Mestre Duarte Freitas e Eng.Lino Maia.

Agradeço também à ajuda prestada pelo Prof. Mestre João Rocha.

Agradeço ainda o apoio dos meus colegas do Mestrado de Energias Renováveis e Eficiência Energética.

Finalmente, agradeço à minha mãe pois sem ela nada disto seria possível.

# Resumo

Esta dissertação encontra-se inserida no projeto Enhanced WT e baseia-se na avaliação dos índices de sustentabilidade de aerogeradores urbanos. A primeira avaliação é a de um aerogerador urbano, a segunda de um aerogerador com um Convergente-Divergente acoplado em alumínio, a terceira de um aerogerador com um Convergente-Divergente em fibra de vidro, a quarta de um aerogerador com um Convergente-Divergente em cortiça e finalmente a de um aerogerador com Convergente-Divergente e pás em cortiça e cuja torre é em madeira ou cartão.

Com esta dissertação pretende-se avaliar qual o melhor sistema de modo a ser mais produtivo e mais sustentável, para tal foi utilizado o software Gabi 6.0 Education.

Através das modelações dos sistemas em cima mencionados, obteve-se os valores de Potencial de Aquecimento Global em que um aerogerador urbano apresenta emissões de 75.8 kg de CO<sub>2 eq.</sub>, um aerogerador com o Convergente-Divergente em alumínio de 148.24 kg CO<sub>2 eq.</sub>, um aerogerador com Convergente-Divergente em resina reforçada com fibra de vidro de 109.51 kg CO<sub>2 eq.</sub>, um aerogerador com Convergente-Divergente em cortiça e resina com 88.17 kg CO<sub>2 eq.</sub> e por último um aerogerador cuja torre em metal foi substituída por uma em madeira, pás e CD em cortiça de 46.67 kg CO<sub>2 eq.</sub>

Com este estudo entendeu-se que a sustentabilidade não passa apenas pela eficiência e novas tecnologias mas também no voltar um pouco às matérias-primas.

Palavras-chave: Aerogeradores urbanos. Energia eólica. Convergente-Divergente. Sustentabilidade. Cortiça.

# Abstract

This thesis is inserted on Enhanced WT project, and it is based on the assessment of sustainability indexes of urban wind turbines. The first evaluation is an urban wind turbine, the second one a wind turbine with a Convergent-Divergent aluminum attached, the third one a wind turbine with a Convergent-Divergent fiberglass, the fourth one a wind turbine with a Convergent-Divergent in cork and finally a wind turbine with Convergent-Divergent and blades in cork and whose tower is of wood or cardboard.

This thesis, intended to evaluate what the best system to be more productive and more sustainable, for that it was used Gabi 6.0 Education software.

Through modeling systems listed above, there was obtained the Global Warming Potential values which a urban wind turbine presents 75.8 kg CO<sub>2</sub> eq. of emissions, a wind turbine with an aluminium Convergent-Divergent 148.24 kg CO<sub>2</sub> eq., a wind turbine with a resin reinforced with fiberglass Convergent-Divergent 109.51 kg CO<sub>2</sub> eq., a wind turbine with a cork and resine Convergent-Divergent 88.17 kg CO<sub>2</sub> eq. and for last a wind turbine tower in which metal has been replaced by wood, and cork and resina blades and CD with a GWP of 46.67 kg CO<sub>2</sub> eq.

This study demonstrates that sustainability is not just efficiency and new technologies but it is back a bit to raw materials.

Keyword: Urban wind turbines. Wind Energy. Convergent-Divergent. Sustainability. Cork.

# Conteúdo

<b>I</b>	<b>Sustentabilidade</b>	<b>11</b>
<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>12</b>
1.1	Design para a sustentabilidade [D4s]	14
1.1.1	Estratégias para o aumento da sustentabilidade	15
1.2	Guia da sustentabilidade	15
1.3	Metodologias de cálculo da sustentabilidade	16
1.3.1	Método TRACI	17
1.3.2	Método CML 2001	17
1.3.3	Método Ecoindicator 99	18
1.3.4	Método ReCiPe	18
1.3.5	Método ILCD recommendation	18
1.3.6	Indicadores de sustentabilidade	18
1.3.6.1	Consumo de energia primária	18
1.3.6.2	Categorias de desperdícios	19
<b>2</b>	<b>Caso de estudo - Enhanced WT</b>	<b>23</b>
2.1	Avaliação Ciclo de Vida (LCA) simplificado	24
2.2	Simulação em Gabi Software	25
2.2.1	Avaliação Ciclo de Vida (LCA)	26
2.2.1.1	Aerogerador sem CD	26
2.2.1.2	Aerogerador com CD em alumínio	30
2.2.1.3	Aerogerador com CD em resina epoxy reforçada com fibra de vidro	31
2.2.1.4	Aerogerador com CD em cortiça e resina	32
2.2.1.5	Aerogerador com CD e pás em cortiça e resina e torre em madeira	33
2.2.2	Apresentação dos resultados	34

CONTEÚDO	6
2.2.2.1 Aerogerador sem CD . . . . .	34
2.2.2.2 Aerogerador com CD em alumínio . . . . .	36
2.2.2.3 Aerogerador com CD em resina epoxy e fibra de vidro . . . . .	37
2.2.2.4 Aerogerador com CD em cortiça e resina . . . . .	38
2.2.2.5 Aerogerador com torre em madeira, CD e pás em resina e cortiça . . . . .	39
2.2.3 Comparação dos resultados entre os sistemas . . . . .	40
2.2.3.1 Potencial de aquecimento global - GWP . . . . .	41
2.2.3.2 Potencial de acidificação - AP . . . . .	42
2.2.3.3 Eco-toxicidade . . . . .	42
2.2.3.4 Potencial de eutrofização . . . . .	43
2.2.3.5 Potencial destruição do Ozono . . . . .	44
2.2.3.6 Potencial toxicidade humana . . . . .	45
2.2.4 Comparação com modelo . . . . .	46
2.2.5 Conclusões . . . . .	48

## II Enhanced WT 50

### 3 Integração da dissertação no projecto 51

3.1 Trabalho desenvolvido . . . . .	52
3.1.1 Reuniões Enhanced WT . . . . .	52
3.1.2 Museu da electricidade em SolidWorks . . . . .	52
3.1.3 Montagem do aerogerador no terreno . . . . .	54
3.1.3.1 Montagem do primeiro protótipo (alumínio) . . . . .	54
3.1.3.2 Montagem do segundo protótipo (fibra de vidro e resina) . . . . .	58
3.1.3.3 Montagem do leme . . . . .	62
3.1.4 Realização dos modelos a escala reduzida . . . . .	66

# Lista de Figuras

2.1	Aerogerador Enhanced WT . . . . .	24
2.2	Diagrama LCA simplificado . . . . .	25
2.3	Modelação da torre de um aerogerador . . . . .	28
2.4	Fase final do ciclo de vida do aerogerador . . . . .	30
2.5	Modelação CD em alumínio . . . . .	31
2.6	Modelação CD em resina reforçada com fibra de vidro . . . . .	32
2.7	CD em cortiça . . . . .	33
2.8	Potencial aquecimento global de um aerogerador . . . . .	35
2.9	GWP aerogerador sem cd e sem reciclagem de metais . . . . .	36
2.10	GWP aerogerador com CD em alumínio . . . . .	37
2.11	GWP do aerogerador com CD em fibra de vidro e em resina . . . . .	38
2.12	GWP do aerogerador com CD em cortiça e resina . . . . .	39
2.13	GWP do aerogerador com torre em madeira, CD e pás em cortiça e resina . . . . .	40
2.14	GWP dos diversos sistemas . . . . .	41
2.15	AP dos diversos sistemas . . . . .	42
2.16	Eco-toxicidade dos diversos sistemas . . . . .	43
2.17	EP dos diversos sistemas . . . . .	44
2.18	ODP dos diversos sistemas . . . . .	45
2.19	Toxicidade humana dos diversos sistemas . . . . .	46
2.20	Modelação Ciclo de Vida de Clips de metal para folhas de papel . . . . .	47
2.21	GWP de clips . . . . .	47
3.1	Museu da electricidade via satélite . . . . .	53
3.2	Modelação 3D em SolidWorks do Museu da Eletricidade . . . . .	53
3.3	Simulação escoamento do vento no museu da eletricidade . . . . .	54
3.4	Protótipo em alumínio no laboratório . . . . .	55

3.5	Protótipo de alumínio no terreno . . . . .	56
3.6	Elevação da torre com o protótipo em alumínio . . . . .	56
3.7	Protótipo em alumínio montado . . . . .	57
3.8	Protótipo 2 . . . . .	58
3.9	Preparação do protótipo 2 no local . . . . .	59
3.10	Elevação da torre com o protótipo 2 . . . . .	60
3.11	Segundo protótipo instalado . . . . .	61
3.12	Alterações no protótipo . . . . .	62
3.13	Colocação do leme . . . . .	63
3.14	Elevação do protótipo com o leme . . . . .	64
3.15	Protótipo alterado e com leme colocado . . . . .	65
3.16	Molde para os modelos . . . . .	66
3.17	Molde com fibra de vidra e resina . . . . .	67
3.18	Peças após separação do molde . . . . .	68
3.19	Peças cortadas . . . . .	69
3.20	Modelo à escala . . . . .	70

# Lista de Tabelas

2.1	Materiais de um aerogerador . . . . .	27
2.2	Peso e materiais do Rotor . . . . .	27
2.3	Peso e materiais da Nacelle . . . . .	27
2.4	Materiais CD em resina reforçada fibra de vidro . . . . .	31
2.5	Quantidade de materiais do CD . . . . .	32

# Nomenclature

AETP	Potencial Eco-Toxicidade Aquática
AP	Potencial de acidificação
CD	Convergente-Divergente
D4S	Design for Sustainability
EP	Potencial da eutrofização
EPA	Agência da Protecção do Ambiente dos Estados Unidos da América
ESTIG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança
GWP	Potencial aquecimento global
HRM	Manutenção dos Recursos Humanos
HTP	Avaliação do Potencial de Toxicidade Humana
HTP	Avaliação do Potencial de Toxicidade Humana
ILCD	Internacional Reference Life Cycle Data System
ISO	International Organization for Standardization
LCA	Life Cycle Assessements
ODP	Potencial destruição do Ozono
POCP	Potencial de criação fotoquímica de Ozono
TETP	Potencial de Eco-Toxicidade Terrestre
TRACI	Toll for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts

Parte I

Sustentabilidade

# Capítulo 1

## Introdução

Cada vez mais, é frequente existir a preocupação da obtenção da independência total/parcial da produção de energia nos países desenvolvidos, para tal tem se observado um aumento/incentivo ao uso de energias renováveis. A energia eólica tem sido uma das grandes apostas no que toca à produção de eletricidade, uma vez que é uma energia limpa obtida a partir de um recurso renovável – o vento.

O uso do vento como fonte de energia já vem da antiguidade, desde a navegação dos barcos à vela e dos moinhos. Entre o século XIX e XX, a primeira vez em que foi gerada eletricidade foi através de um moinho com 12kW, contudo devido ao baixo preço dos combustíveis fósseis, a energia do vento deixou de ser tão utilizada.

Em 1973 com a crise internacional do petróleo conduziu-se novamente a uma reutilização em massa das energias renováveis, estando a energia eólica entre essas[10].

Com o avanço da tecnologia, a produção descentralizada ganhou um novo papel na produção de energia, tendo uma tendência para crescer uma vez que se pretende cada vez mais obter independência energética dando ao consumidor um papel mais ativo, deixando de ser apenas consumidor mas passando a ser consumidor-produtor. A produção descentralizada permite ainda reduzir as perdas nas redes de distribuição.

Os aerogeradores permitem ao consumidor, agora também produtor, produzir a sua própria energia e enviá-la para a rede de distribuição. Contudo as turbinas urbanas são ainda de pequenas potências tendo em conta que em áreas urbanas os perfis de vento são inferiores.

Ao contrário de outros recursos não renováveis, os aerogeradores não necessitam de combustíveis fósseis para produzirem eletricidade. Contudo a ausência de necessidade de combustíveis fósseis por si só não garantem um bom desempenho

ambiental uma vez que numa perspetiva integrada, as entradas de energia e de emissões ocorrem durante todo o ciclo de vida, desde a extração das matérias-primas para a sua construção até aos resíduos do aerogerador no final da seu ciclo de vida.

O uso dos recursos e as emissões geradas durante o ciclo de vida de um aerogerador podem ser quantificadas utilizando a avaliação do ciclo de vida (LCA). Os estudos de avaliação podem ser recursos importantíssimos no que toca a encontrar soluções para a redução dos impactos da tecnologia no ambiente [3].

Pretende-se neste trabalho, identificar quais as oportunidades para reduzir os recursos e emissões em aerogeradores urbanos.

Ao longo deste trabalho serão discutidas as estratégias a optar para o aumento da sustentabilidade seguindo metodologias de cálculo.

Esta dissertação encontra-se dividida em duas partes:

Sendo a primeira o estudo do aerogerador Enhanced WT onde o principal objetivo será aliar maior produção com maior sustentabilidade. Durante o estudo, pretende-se efectuar cinco simulações diferentes de modo a delinear-se qual o caminho a tomar para a sustentabilidade de um produto, estas são: Aerogerador sem Convergente-Divergente (CD), aerogerador com CD em alumínio, aerogerador com CD em resina epoxy reforçada com fibra de vidro, aerogerador com CD em cortiça e fibra de vidro e por último aerogerador com CD e pás em cortiça e torre em madeira. Pretende-se após as simulações comparar os sistemas em estudo entre si e com um outro sistema aleatório, como é o caso de um simples clip para papel.

Na segunda parte deste trabalho relata-se o trabalho integrado no projeto Enhanced WT, como é o caso das reuniões, simulação 3D do Museu da Electricidade em Lisboa, montagens do aerogerador e ainda a realização de modelos à escala.

Sustentabilidade é um conceito que define ações e atividades humanas que visam colmatar as necessidades atuais dos seres humanos sem o comprometer das futuras gerações. Sendo assim, a sustentabilidade suporta o desenvolvimento económico e material sem agredir o meio ambiente, usando para tal os recursos naturais de forma eficiente para que estes se mantenham, garantindo assim o desenvolvimento sustentável.

Existem diversas formas de quantificar a sustentabilidade e serão exploradas nas próximas secções 1.1 a 1.3.

## 1.1 Design para a sustentabilidade [D4s]

Para um produto ser sustentável deverá ter um número de interesses ligados às pessoas, planeta e lucro, sendo assim é necessário seguir um número de critérios de sustentabilidade para a sua avaliação.

O D4S (Design for Sustainability) é um instrumento de avaliação de critérios de sustentabilidade que se baseia no conceito de EcoDesign e de Design para o ambiente. Neste instrumento é necessário centrar as estratégias de inovação das empresas nas preocupações ambientais e sociais como elementos chaves na estratégia de inovação. Deverá-se, segundo o D4S, procurar fazer um produto verde tentando conduzi-lo ao máximo às necessidades dos consumidores de uma perspectiva ambiental e ter em atenção os critérios sociais e ambientais integrados no processo de desenvolvimento do produto mitigando os impactos do produto. O D4S reforça ainda que, para que um negócio seja competitivo, deve direccionar-se para a sustentabilidade, sendo que a sustentabilidade vai muito além de fazer um produto verde.

A avaliação do índice de sustentabilidade concentra-se no estudo de uma matriz baseada no ciclo de vida do produto em que entram em consideração a extração, processamento e fornecimento dos materiais e da energia necessária para o produto, a produção e distribuição do produto, o uso, reutilização e reciclagem do mesmo. No cálculo da matriz, é necessário ter em consideração as matérias primas utilizadas para o produto, definir os materiais não-renováveis, os materiais em vias de extinção, a produção de emissões durante a sua produção e a incompatibilidade ou ineficiência do uso em todas as fases do ciclo de vida. Outro parâmetro a ter em atenção é o consumo de energia, entenda-se combustíveis e electricidade, durante todo o ciclo de vida, ou seja, durante a produção, transporte, utilização, manutenção e restabelecimento do produto. Por fim, o último parâmetro a ser analisado é a manutenção dos recursos humanos (HRM), seleccionando as actividades necessárias de modo a melhorar o HRM, tais como a segurança e limpeza do local de trabalho, cuidados de saúde prestados aos empregados, política da empresa, formação e treino dos empregados.

Após a conclusão desta matriz é possível assinalar os impactos maiores de sustentabilidade do produto e desenvolver estratégias através do desenvolvimento de procedimentos adequados. [22]

### 1.1.1 Estratégias para o aumento da sustentabilidade

Na estratégia para a sustentabilidade do produto é necessário observar todo o ciclo de vida e atuar ao longo do mesmo como será relatado ao longo deste capítulo.

Uma das primeiras preocupações a focar é a seleção de materiais de baixo impacto, ou seja, optar por materiais limpos, renováveis, de baixo conteúdo energético, reciclados, recicláveis e de impacto social positivo, assegurando ainda a redução dos materiais utilizados tanto no seu peso como no volume.

É necessário ainda a otimização das técnicas de produção procurando técnicas alternativas, menos passos para a sua produção, menos energia utilizada e mais limpa, menos desperdícios, menos materiais utilizados neste processo, segurança e limpeza do espaço de trabalho; a otimização dos sistemas de distribuição com embalagens menores, limpos e reutilizáveis.

A redução dos impactos durante o uso do produto passará também pelo uso de energias limpas, menores necessidades de consumo, consúmiveis limpos, suporte saudável e valores sociais.

No seguimento da aplicação e adoção de estratégias é necessário ainda a otimização do tempo de vida inicial e do sistema no fim de vida. Para a otimização do tempo de vida inicial deverá ter se em conta a possível reabilitação e duração do produto, manutenção e reparação mais facilitada, a possibilidade de estruturar o produto por módulos, relação forte entre a produção e a utilização, favorecimento da manutenção local e dos sistemas de serviços enquanto para a otimização do sistema no fim de vida conta com a reutilização do produto, remanufatura e remodelação do mesmo, reciclagem dos materiais e inceneração segura.[22]

## 1.2 Guia da sustentabilidade

Para a otimização da sustentabilidade de um produto é possível seguir-se um conjunto de regras, sendo estas as seguintes:

- Design Procedentes- encontrar e comentar designs anteriores que originaram a ideia do produto;
- Produtos secundários - listar os materiais utilizados, relações e impactos associados, fontes de energia que irão ser utilizadas, outros produtos necessários, definir a relação consumidor/produto e outras possíveis utilizações;
- Justificação do porquê do produto;

- Projecto vida útil - definir e minimizar os materiais que necessitam de um uso intensivo de energia na sua utilização;
- “Design limpo” - aplicação de materiais apropriados, conferindo a qualidade, transporte e suas propriedades;
- Detalhes de manufacturação - dos próprios materiais, do fornecimento e transporte, bem como da montagem do produto, tendo em conta o recurso, origem, produtor, possível reciclagem e fontes de energia envolvidas nestes processos;
- Design do produto - ter em conta a relação produto, utilização e utilizador;
- Detalhes de distribuição - determinação dos custos ambientais, distribuidores, montagem e os materiais de empacotamento utilizados;
- Retalho e gestão da vida-útil - estabelecimento do ponto de venda, sistemas de suporte para o fim de vida útil do equipamento, aspectos do material, suporte técnico, reparações, reduções dos impactos dos materiais publicitários, como por exemplo utilizar um website onde exista o suporte, venda e instruções.

Seguindo estas etapas torna-se mais fácil realizar a análise de sustentabilidade dos produtos.[22]

### 1.3 Metodologias de cálculo da sustentabilidade

Para o cálculo dos Índices de Sustentabilidade podem ser utilizados diversos métodos de cálculo em que todos se incidem na Avaliação do Ciclo de Vida (LCA).

A Organização Internacional de Normalização, conhecida como International Organization for Standardization (ISO), criou duas normas a ISO 14040 e a ISO 14044, definindo assim o LCA como a compilação e avaliação das entradas e saídas e dos impactos ambientais de um sistema ou produto durante o seu tempo de vida.

O LCA é utilizado principalmente para:

- Identificar oportunidades de melhorar os aspectos ambientais de um produto nos diversos pontos do seu ciclo de vida;
- Tomada de decisões na indústria, organizações governamentais e não-governamentais, tais como a planificação de estratégias, definição de prioridades, processos de design de um produto, etc;

- Selecção de indicadores relevantes de desempenho ambiental;
- Marketing, associando uma empresa ou produto a uma marca ecológica.

Existem diferentes metodologias para o cálculo do LCA, sendo estes continuamente investigados e desenvolvidos por grupos científicos.[13]

### 1.3.1 Método TRACI

O método TRACI, *Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts*, foi desenvolvido pela Agência da Protecção do Ambiente (EPA) dos Estados Unidos da América (EUA), utiliza como parâmetro a localização nos Estados Unidos da América. Em algumas categorias de impactos é possível especificar a localização exata, contudo quando não é possível especificá-la são usados sempre como referência a média dos valores do país.

TRACI facilita a caracterização dos pontos de stress ambientais com potenciais efeitos incluindo a destruição do ozono, aquecimento global, acidificação, eutrofização, formação de nevoeiros derivados da formação de ozono, ecotoxicidade, efeitos incidentes na saúde dos humanos, efeitos cancerígenos, redução dos combustíveis fósseis, entre outros. [7]

Sendo assim, este método é essencialmente uma abordagem intermédia, sendo que desenha cadeias simples da relação causa/efeito para resultar num ponto para cada categoria caracterizada, consistente com as regulamentações e políticas da EPA. [17][4][1]

### 1.3.2 Método CML 2001

O CML 2001 é um método de avaliação de impacto, que restringe a modelação quantitativa das fases iniciais da relação da cadeia causa/efeito limitando assim incertezas. Os resultados são agrupados em categorias de acordo com o ponto médio de mecanismos comuns, como é o caso das alterações climáticas ou de grupos geralmente aceites como a ecotoxicidade.

Este método foi desenvolvido pelo *Institute of Environmental Sciences* da Universidade de Leiden, na Holanda, e publicado num livro sobre o tema.[11]

Os fatores de normalização do CML 2001 estão disponíveis para todo o globo. Estes fatores são calculados através de emissões de substâncias totais e de fatores de caracterização por substância. [14]

### 1.3.3 Método Ecoindicator 99

Este método encontra-se de acordo com as informações dadas pela *Pre Consultants* que recolheram e publicaram uma folha de cálculo do Instituto de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden, na Holanda. [15] [6][9]

Este método quantifica o desempenho ambiental associado ao produto ou serviço ao longo do seu ciclo de vida e baseia-se no cálculo do peso e gravidade de um determinado impacto.[12][19]

### 1.3.4 Método ReCiPe

A metodologia ReCiPe LCA foi criada pela RIVM, CML, PRé Consultants, Universidade Radboud de Nijmegen e pelo CE Delf, sendo que este grupo inclui os investigadores dos métodos CML 2001 e Ecoindicator 99. Este método resulta assim da fusão desses métodos, tomando os resultados médios do CML e os resultados finais dos Ecoindicadores.

Sendo assim o utilizador poderá optar pelo nível dos resultados:

- 18 indicadores dos valores médios, estes são mais precisos mas difíceis de interpretar e são similares à metodologia CML;
- 3 indicadores de valores finais, estes são facilmente entendidos contudo mais incertos e similares à metodologia Ecoindicator 99. [18] [20][21]

### 1.3.5 Método ILCD recommendation

O *Internacional Reference Life Cycle Data System* (ILCD) publicou "*Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context*". Este escolhe a metodologia avaliada como o melhor dentro da categoria de impacto para o contexto europeu.[16]

Este é o método recomendado para o contexto europeu e por ser onde está localizado o projecto, será o método usado para este estudo.[8]

### 1.3.6 Indicadores de sustentabilidade

#### 1.3.6.1 Consumo de energia primária

É difícil de determinar a demanda de energia primária devido às várias fontes de energia, esta é definida como a quantidade de energia retirada diretamente da hi-

drosfera, atmosfera, geosfera ou de uma fonte de energia sem mudanças antrópicas, ou seja, que não resulte da ação humana.

Esta será a quantidade do recurso retirado expresso em energia equivalente para os combustíveis fósseis e urânio . Nos recursos renováveis, como a biomassa, será caracterizado pela quantidade de biomassa consumida enquanto para a hídrica será baseado na quantidade de energia que é ganha pela diferença da energia potencial da água.[13]

### 1.3.6.2 Categorias de desperdícios

Existem diferentes categorias de desperdícios, sendo assim faz sentido dividi-lo em três categorias sendo estas: resíduos estéreis, resíduos industriais para disposição municipal e resíduos perigosos.

Os resíduos estéreis são os resíduos obtidos pela extração necessária de uma camada de modo a ser possível o acesso à extração de matéria prima e cinzas, também se podem agregar a esta categoria materiais como rochas inertes, escória e barro vermelho.

Finalmente na categoria dos resíduos perigosos são considerados os materiais que serão tratados em incineradores e aterros próprios. Como exemplos destes resíduos tem-se as lamas galvânicas, resíduos sólidos, líquidos e radioativos.[13]

**Potencial aquecimento global (GWP)** A radiação proveniente do sol entra em contato com a superfície da terra, sendo parte desta absorvida e outra parte refletida como radiação infravermelha. A radiação refletida é absorvida pelo efeito de estufa na troposfera sendo radiada em todas as direções, incluindo na superfície da terra, resultando assim o aquecimento global. O efeito de estufa é ainda, segundo alguns autores, agravado pela atividade humana. [13]

O potencial do aquecimento global é calculado em dióxido de carbono equivalente ( $\text{CO}_2\text{-equiv.}$ ), ou seja, o potencial do efeito de estufa é dado em relação ao  $\text{CO}_2$ . Para o cálculo deste potencial, o tempo de permanência dos gases na atmosfera é especificado numa escala de tempo de 100 anos normalmente.[13]

**Potencial de acidificação (AP)** O potencial de acidificação é descrito como a habilidade de certas substâncias ganharem e perderem iões  $\text{H}^+$ . Sendo assim, a acidificação dos solos e águas ocorre predominantemente na transformação de poluentes do ar em ácidos, levando assim à redução do pH da chuva e nevoeiro de 5.6 para valores a baixo de 4. O Dióxido Sulfúrico e Óxido de Nitrogénio e os seus

respectivos ácidos ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  e  $\text{HNO}_3$ ) produzem contribuições relevantes, danificando assim ecossistemas e florestas.

A acidificação tem efeitos diretos e indiretos como é o caso das chuvas ácidas que danificam edifícios. A acidificação deve ser considerada não só um problema global mas também regional, podendo variar de acordo com a localização.

A acidificação é dada em Dióxido Sulfúrico equivalente ( $\text{SO}_{2\text{-Eq}}$ ).[13]

**Potencial da eutrofização (EP)** A eutrofização é o enriquecimento de nutrientes em certos locais, esta pode ser terrestre ou aquática e os maiores contribuidores para a ocorrência deste fenómeno são os poluentes atmosféricos, resíduos de águas e a fertilização na agricultura.

Da eutrofização aquática resulta um crescimento acelerado nas algas em que a radiação solar não consegue atingir grandes profundidades, originando assim um decréscimo na fotossíntese e conseqüentemente um decréscimo na produção de oxigénio. Devido à insuficiente presença de oxigénio nas águas pode ocorrer a morte de peixes e decomposição anaeróbica, destruindo assim o ecossistema.

Na eutrofização dos solos ocorre um aumento de mortes das culturas assim como da ocorrência de pestes, degradando a estabilidade das culturas. Estes acontecimentos podem levar ao enriquecimento dos nitratos que por sua vez aumentará os níveis do mesmo em lençóis de água. A partir dos nitratos, poderão ocorrer reacções que originarão como produto nitritos que são tóxicos para os humanos.

O potencial da eutrofização é calculado em Fosfato equivalente ( $\text{PO}_4^-$  equiv), os efeitos deste fenómeno diferem regionalmente.[13]

**Potencial de criação fotoquímica de ozono (POCP)** Apesar de o ozono ter um papel de proteção na estratosfera, ao nível do solo é classificado como um gás danoso. A produção fotoquímica de ozono na troposfera é também conhecido como nevoeiro de verão, é responsável pelos danos de vegetação e de matéria orgânica e inorgânica. Elevadas concentrações de ozono são tóxicas para os humanos.

A radiação solar juntamente com a presença de óxidos de nitrogénio e hidrocarbonetos ficam sujeitos a reacções químicas complexas, originando produtos agressivos. Um dos produtos agressivos originados por essas reacções é o ozono. O óxido de nitrogénio sozinho não causa elevadas concentrações de ozono.

A elevada concentração de ozono surge principalmente quando as temperaturas são elevadas, a humidade é baixa, o ar é relativamente estático e quando há uma concentração elevada de hidrocarbonetos.

Na avaliação do ciclo de vida, a POCP é calculada em Etileno Equivalente ( $C_2H_4^-Eq.$ ) e está e fortemente influenciada pelo clima e pelas características do local.[13]

**Potencial destruição do Ozono (ODP)** O ozono é criado na estratosfera pela dissociação dos átomos de oxigênio expostos às ondas curtas UV, resultando assim na formação da camada do ozono. A camada do ozono é essencial à vida na terra, uma vez que esta absorve as ondas curtas de radiação UV e liberta-as em comprimento de radiação mais longas. Como resultado, apenas uma parte da radiação UV atinge a Terra.

As emissões antropogênicas destroem o ozono, contribuindo para o buraco na camada do ozono. As substâncias que têm o efeito de destruição na camada do ozono são: os clorofluorcarbonetos (CFCs) e os Óxidos Nitrogênio (NOX).

Segundo alguns autores, um dos efeitos da destruição da camada do ozono é o aquecimento global, que provoca mudanças no crescimento e diminuição na colheita de culturas, indicações de tumores da pele e doenças nos olhos, diminuição do planton marinho que alterará fortemente as cadeias alimentares.

O ODP é calculado a partir do potencial de diferentes substâncias relevantes de ozono. Em primeiro lugar, é calculado um cenário para uma quantidade fixa de emissões dos CFCs referência, que resulta um equilíbrio no estado da redução total de ozono, seguidamente, o mesmo cenário é considerado para cada substância em estudo substituindo o CFC 11 pela quantidade de substância. Levando assim a um ODP para cada respectiva substância em CFC 11 equivalente.

A avaliação do ODP deve entrar em consideração com efeitos globais, irreversíveis e a longo termo.[13]

**Potencial de toxicidade Humana e eco-toxicidade** O método de avaliação dos impactos do potencial de toxicidade ainda estão em fase de desenvolvimento.

A avaliação do Potencial de Toxicidade Humana (HTP), estima os impactos negativos de processos em humanos.

O Potencial da Eco-Toxicidade tem como finalidade os danos nos ecossistemas. Esta é diferenciada em Potencial de Eco-Toxicidade Terrestre (TETP) e em Potencial Eco-Toxicidade Aquática (AETP).

A toxicidade é definida pela duração e frequência do impacto e é baseada numa série de parâmetros: composição química, propriedades físicas, ponto da fonte de emissão, comportamento, localização e libertação no meio-ambiente.

Os factores de caracterização usados neste trabalho são baseados nos cálculos do software USES 1.0.[13]

**Potencial de redução abiótica** O potencial de destruição abiótico cobre todos os recursos naturais como é o caso de minérios de metal, crude e matérias primas minerais, ou seja, inclui todas as matérias primas de recursos não-vivos que não são renováveis.

Este impacto descreve a redução global da quantidade de matérias primas não-renováveis e cobre a avaliação da disponibilidade dos elementos naturais no geral.

A substância referência para a caracterização dos factores é o antimónio.[13]

## Capítulo 2

# Caso de estudo - Enhanced WT

A energia eólica tem um elevado potencial a ser ainda explorado. Sendo a tecnologia para a grande eólica a mais desenvolvida.

Com a descentralização da produção de energia, é permitido e incentivado ao consumidor que produza a sua própria energia através das energias renováveis, segundo o Decreto Lei n.º 153/2014. A energia eólica é uma das tecnologias que permitem em recinto urbano a produção de eletricidade. Contudo a aproximação da tecnologia eólica ao utilizador apresenta diversas preocupações nomeadamente a nível dos critérios de design, estética, conceção e minimização de custos.

Apesar das preocupações iniciais com este tipo de tecnologia nas cidades, a energia eólica em áreas urbanas tem perspectivas de crescimento mesmo sendo as velocidades de vento inferiores em zona urbanas do que em locais convencionais.

Sendo assim tornou-se inevitável procurar um produto que resolvesse os problemas associados aos pequenos aerogeradores, surgindo assim o projecto *Enhanced WT* que se baseia num aerogerador onde é acoplado um Convergente-Divergente de modo a ser possível obter maior rendimento, como pode ser observado na figura 2.1.



Figura 2.1: Aerogerador Enhanced WT

O Enhanced WT pretende melhorar o desempenho energético dos aerogeradores convencionais, ter uma melhor relação custo-benefício, melhorar o desempenho acústico reduzir o ruído, tornar os aerogeradores mais acessíveis visualmente aos utilizadores e torná-los produtos mais sustentáveis.

Esta dissertação incide assim na componente da sustentabilidade deste produto, tornando-o sustentável e “eco-friendly”.

## 2.1 Avaliação Ciclo de Vida (LCA) simplificado

Após o conhecimento do conceito do caso de estudo, tornou-se necessário construir um ciclo de vida simplificado de modo a delinear-se os passos futuros. Para a produção dos materiais é necessária energia sob a forma de combustível ou de eletricidade e dos recursos. Já na produção do produto são necessários os materiais descritos anteriormente e energia. Segue-se assim a utilização do produto, neste caso como se trata de um aerogerador é produzida energia para a rede ou consumo próprio. No fim do seu ciclo de vida, o aerogerador é desmantelado e as suas peças são re-

cicladadas, inceneradas entre outros fins produzindo-se assim emissões. Os materiais recicláveis voltam assim ao início do ciclo onde serão novamente aproveitados para produção de novos materiais e produtos, como o apresentado na figura 2.2.

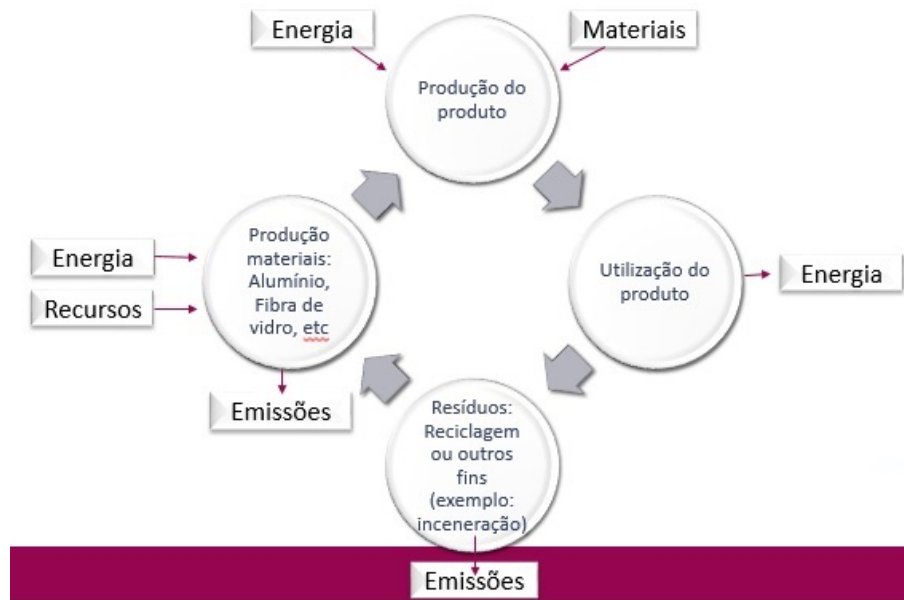


Figura 2.2: Diagrama LCA simplificado

Para a realização do estudo do ciclo de vida, é necessário ter em atenção: desde a produção dos materiais utilizados no produto, tendo em conta os recursos utilizados e a energia dispendida para a produção do mesmo, bem como as emissões resultantes da produção dos materiais; a própria produção do produto contando mais uma vez com a energia dispendida e materiais necessários; a utilização do produto que neste caso não utilizará durante o seu tempo de vida; e por último os resíduos resultantes do fim de vida do produto, se os materiais são reciclados, incenerados, etc. bem como as emissões que resultam desses processos.

## 2.2 Simulação em Gabi Software

A escolha do software GABI, deveu-se essencialmente a este suportar todas as fases de cálculo do LCA, deste a extensa base de dados à apresentação dos resultados.

O software rastreia automaticamente materiais, energia, fluxos de emissões, valores monetários definidos, tempo de trabalho, problemas sociais, originando performances instantâneas caracterizadas em diversos impactos ambientais.

Este permite assim uma modelação rápida e simplificada de processos complexos.

A versão utilizada neste estudo é a versão educacional: Gabi 6.0 Education.

### 2.2.1 Avaliação Ciclo de Vida (LCA)

A avaliação do LCA foi feita em diversas fases de modo a poder-se concluir qual a melhor solução para o produto Enhanced WT.

Na primeira abordagem, foi realizado um LCA para um aerogerador normal, sem o Convergente-Divergente (CD).

Na segunda abordagem, foi acoplado ao aerogerador o CD, cuja principal função é o aumento de produção, em que o material de construção é o alumínio. Sentiu-se a necessidade de realizar este estudo, uma vez que o primeiro protótipo do CD implementado foi em metal.

Na terceira abordagem, substituiu-se o material do CD por resina reforçada com fibra de vidro, sendo esta uma solução típica para este tipo de produto.

Na quarta abordagem, o material do CD foi substituído por cortiça e resina.

Por último substituiu-se o material da torre de alumínio para cartão e o material das pás substituídos por cortiça e resina.

#### 2.2.1.1 Aerogerador sem CD

A primeira fase deste estudo, baseou-se em avaliar um aerogerador sem o CD, de modo a posteriormente ser possível compreender as mudanças a nível de sustentabilidade que serão causadas com a introdução do Convergente-Divergente.

Para a avaliação do LCA de um aerogerador, foi necessário listar os materiais constituintes do mesmo, desde a produção dos materiais até à construção do próprio aerogerador.

De acordo com Anna Bondesson [5], 25% do peso total da turbina corresponde ao peso do Rotor e os restantes 75% ao peso da Nacelle. O peso total do aerogerador em estudo é de 10.5kg, sendo que o peso do Rotor e Nacelle podem ser encontrados na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Materiais de um aerogerador

Material/Parte	Porcentagem (%)	Peso (kg)
Rotor	25	2.625
Nacelle	75	7.875

Os materiais dos quais o Rotor é composto, assim como a sua fração e peso podem ser analisados na tabela 2.2.

Tabela 2.2: Peso e materiais do Rotor

Materiais	Porcentagem (%)	Peso (kg)
Pás	50	1.313
<i>Componente</i>	<i>Kg/Kg pás</i>	<i>Peso total (Kg)</i>
Epoxy	0.41	0.538
Fibra de vidro	0.64	0.640
Nariz	29	0.761
<i>Componente</i>	<i>Kg/Kg nariz</i>	<i>Peso total (Kg)</i>
Poliéster	0.4	0.305
Fibra de vidro	0.6	0.457
Hub	21	0.551
<i>Componente</i>	<i>Kg/Kg hub</i>	<i>Peso total (Kg)</i>
Alumínio	0.05	0.028
Folha de aço	1	0.551

Os materiais que constituem a nacelle podem ser observados na tabela 2.3:

Tabela 2.3: Peso e materiais da Nacelle

Materiais		Porcentagem (%)	Peso (Kg)
Gerador		66	5.198
	<i>Componente</i>	<i>Kg/Kg gerador</i>	<i>Peso total (Kg)</i>
	Cobre	0.35	1.819
	Fibra de vidro	0.65	3.378
Moldura		33	2.599
	<i>Componente</i>	<i>Kg/Kg gerador</i>	<i>Peso total (Kg)</i>
	Alumínio	0.38	0.988
	Cobre	0.1	0.260
	Fibra de vidro	0.04	0.104
	Aço	0.48	1.247

Para o avanço do cálculo do LCA, é necessário ter em atenção que cada um destes materiais necessita de um transporte até ao local da produção do aerogerador e ainda o transporte do aerogerador até ao local onde será instalado, considerou-se assim que o transporte utilizado é terrestre pelo meio de camiões de carga.

Após a introdução dos materiais e suas quantidades, estes necessitam do transporte em cima mencionado até chegarem ao local da produção da parte do aerogerador em estudo. Uma vez na fábrica, será produzida e transportada até ao local da montagem do aerogerador unindo-se às restantes partes. No fim de vida do aerogerador, as partes são separadas, recicladas, incineradas e depositadas em aterros. Os materiais em que é possível reciclar voltam ao início do ciclo para originarem novas partes. Por exemplo, na produção da torre é necessário alumínio, esse é transportado até à fábrica e processado de modo a ser produzida a torre, esta será transportada novamente até ao local da montagem do aerogerador após o seu tempo de vida útil. O alumínio é reciclado voltando novamente a ser a matéria prima para a produção de novos produtos.

Para a modelação da torre, consideramos que o seu material é em alumínio com um peso de 25 kg. A folha de alumínio é transportada para a fábrica onde a torre é produzida, necessitando assim de electricidade para a sua produção. Após a sua produção, esta é transportada até ao local onde será implementada, este processo pode ser ilustrado na figura 2.3, sendo que a seta a vermelha representa o alumínio após a reciclagem, e as setas azuis as folhas de alumínio para a produção da torre.

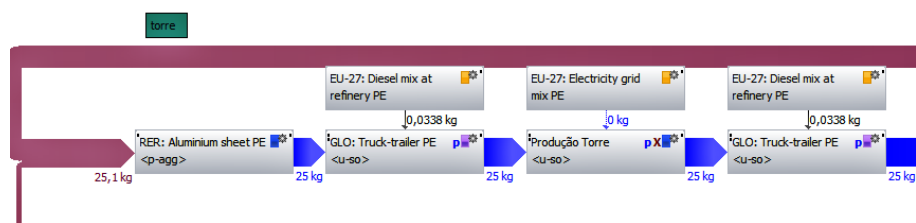


Figura 2.3: Modelação da torre de um aerogerador

Tendo já modelado a torre, o próximo passo será a modelação do rotor, contendo este as pás, o nariz e o hub da turbina.

As pás do aerogerador, como foram descritas anteriormente, têm como materiais na sua construção a resina epoxy e fibra de vidro. Ambos são transportados até à fábrica para a produção das pás, onde é necessária electricidade para o processo. Após a produção das pás, estas são transportadas até ao local onde o rotor é produzido.

Para a produção do nariz, são utilizados como materiais a resina poliéster e fibra de vidro que são transportados até à fábrica onde são produzidos os narizes.

O hub é composto por alumínio e ligas de aço, sendo que as matérias-primas são transportadas até à fábrica para a produção deste componente do rotor.

Estes componentes são transportados até à fábrica onde será produzido o rotor, que após a sua produção é transportado até ao local da montagem. O processo de modelação do rotor poderá ser observado no anexo A1.

Por último, resta a modelação da nacelle, composta pelo gerador elétrico, carter e outros componentes.

Para a produção do gerador elétrico é necessário ferro e cobre, estes são transportados até à fábrica onde será produzido o gerador elétrico com o apoio da electricidade da fábrica.

O carter e os outros componentes são compostos por cobre, alumínio, ligas de aço e por fibra de vidro, sendo transportados até às fábricas onde serão produzidos os componentes.

Posteriormente todos os componentes da nacelle são transportados até à sua fábrica, onde será produzida e mais tarde transportada até ao local de montagem do aerogerador, Anexo A2.

Finalmente, no término do ciclo de vida do aerogerador (aproximadamente 25 anos), o aerogerador é desmantelado, sendo grande parte do alumínio reciclado enquanto a maioria dos restantes materiais são incinerados. A fase final de vida do aerogerador pode ser observada na figura 2.4.

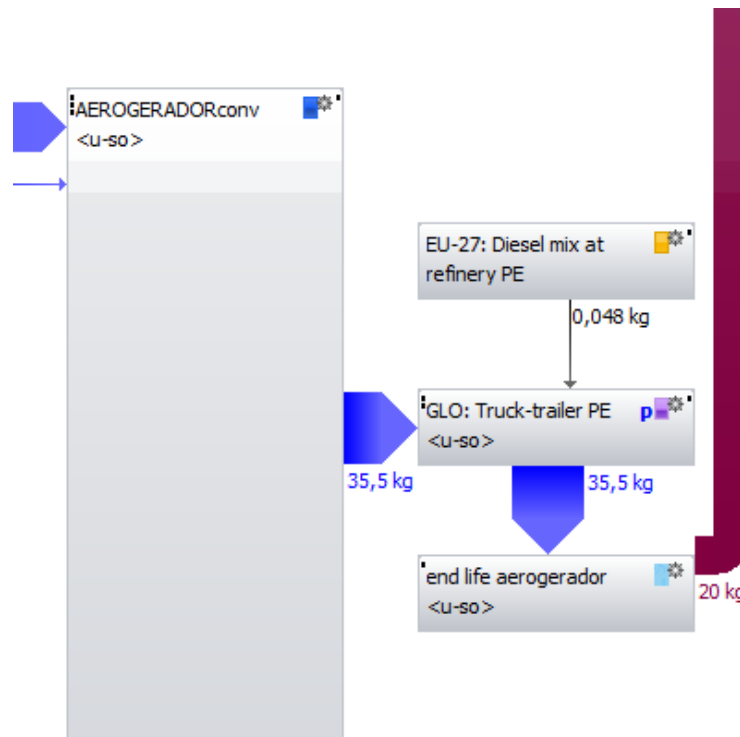


Figura 2.4: Fase final do ciclo de vida do aerogerador

Após estas considerações é possível modelar o sistema no software utilizado, resultando na figura do anexo A3.

Terminada a modelação do aerogerador sem o CD, o passo seguinte será realizar uma modelação para um CD construído em alumínio.

### 2.2.1.2 Aerogerador com CD em alumínio

Tomando como referência o aerogerador estudado no ponto anterior, será dada a importância neste tópico ao Convergente-Divergente cujo material é o alumínio.

O CD tem  $2.12 \text{ m}^2$  de área, espessura de 3 mm resultando assim num volume de  $6.36 \text{ dm}^3$ . Sabendo que o peso específico do alumínio é de  $7.8 \text{ g/cm}^3$  facilmente se retira que o peso do CD será de 49.6 kg.

Tendo a quantidade de material do CD, sabe-se que o alumínio será transportado até à fábrica onde o CD será produzido e este produto transportado até ao local de

implementação do aerogerador, onde será instalado. No término do ciclo de vida do sistema, o alumínio será reciclado originando novos produtos. A modelação deste produto pode ser observada na figura 2.5, como foi descrita anteriormente.



Figura 2.5: Modelação CD em alumínio

Tendo como referência os passos anteriormente descritos do CD e do aerogerador, o CD é instalado no aerogerador sendo assim a modelação do aerogerador com o CD pode ser encontrada no anexo A4.

O sistema encontra-se assim pronto a ser simulado.

### 2.2.1.3 Aerogerador com CD em resina epoxy reforçada com fibra de vidro

Sendo a fibra de vidro um material bastante utilizado para produtos desta natureza sendo resistente e mais leve que o alumínio, tornou-se necessário saber qual o valor de sustentabilidade desta solução.

Sendo assim, tendo em consideração com a área e espessura do CD através da tabela 2.4 é possível observar as quantidades dos materiais necessários para o mesmo:

Tabela 2.4: Materiais CD em resina reforçada fibra de vidro

Material	Peso Esp. (g/cm <sup>3</sup> )	Espessura (mm)	Volume (dm <sup>3</sup> )	Peso (Kg)
Resina Epoxy	1.15	0.2	0.42	0.49
Fibra de vidro	1.4	3	6.36	8.90

A resina e a fibra de vidro são transportadas até à fábrica onde o CD será construído. No processo de produção além das matérias utilizadas também é necessária electricidade. Após a conclusão do CD, este será transportado até ao local de montagem do aerogerador.

A modelação do CD com estes materiais pode ser observado na próxima figura:

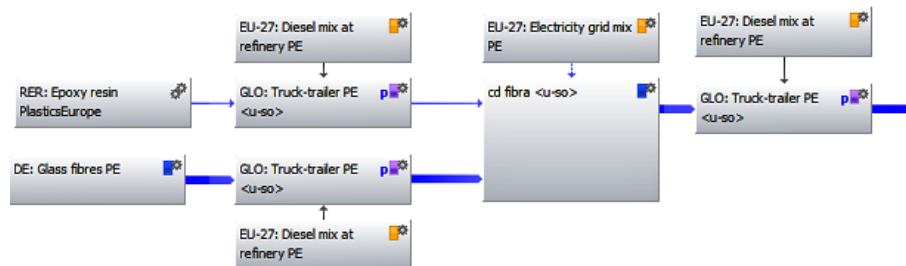


Figura 2.6: Modelação CD em resina reforçada com fibra de vidro

Ligando o CD ao aerogerador obtemos assim o sistema na totalidade, anexo A5. Tendo a simulação completa, é possível obter os resultados.

#### 2.2.1.4 Aerogerador com CD em cortiça e resina

Neste tópico será apresentada a modelação do CD em cortiça e em resina.

O CD é composto por resina e por cortiça, sendo que 1,5 kg é resina e 0.7 kg em cortiça.

Na próxima tabela é possível observar-se os materiais e suas quantidades que compõem o CD.

Tabela 2.5: Quantidade de materiais do CD

Material	Peso (kg)
Resina	1.5
Cortiça	0,7

Devido ao programa não ter na base de dados a cortiça, e ao ser uma versão educacional não ser possível a obtenção dos dados, achou-se entre a base-de-dados um material semelhante, a madeira prensada (plywood).

Sendo assim, a madeira prensada e a resina epoxy são transportadas por camiões até à fábrica de produção do CD, como é possível observar na próxima figura.

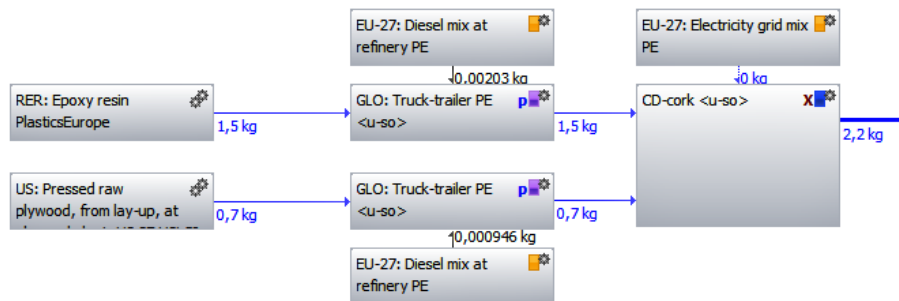


Figura 2.7: CD em cortiça

Uma vez produzido, o CD será transportado até ao local da instalação do aerogerador para lhe ser acoplado, a integração destes dois sistemas é possível observar no anexo A6.

### 2.2.1.5 Aerogerador com CD e pás em cortiça e resina e torre em madeira

De modo a tornar-se o conjunto aerogerador, CD e torre o mais sustentável possível, foi necessário realizar algumas alterações nos modelos.

Sabendo que os metais, nomeadamente o alumínio presente por exemplo na torre são responsáveis pela grande parte das emissões, pensou-se em substituí-la por outro material. A primeira ideia que surgiu foi a substituição por madeira. A ideia final, ou seja, o projecto final trata-se da substituição da torre de metal ou de madeira por uma de cartão, seguindo assim o conceito do arquiteto Shigeru Ban utilizado na Cardboard Cathedral em Christchurch Central City[2], contudo devido às limitações do software utilizado, apenas foi possível fazer o estudo para uma torre de madeira.

Sendo assim, considerando que a torre tem 10 metros de altura e cerca de 10 cm de raio e que o peso específico da madeira utilizada é de cerca de  $490 \text{ kg/m}^3$ , a madeira utilizada para a torre pesará cerca de 154 kg.

As pás do aerogerador, serão também substituídas por cortiça e por resina. Considerando que as pás do aerogerador têm como volume  $7.3 \text{ cm}^3$ , terão assim um peso de cerca de 538 gramas sendo construídas em cortiça e em resina.

Sabendo estas quantidades, é assim possível realizar a modelação deste novo sistema.

A madeira será transportada até ao local onde será preparada, resultando na torre. Esta torre será depois transportada até ao local de implementação do aerogerador. Já a cortiça e a resina serão transportadas até à fábrica de produção das pás para mais tarde serem transportadas para a fábrica onde o rotor será montado e posteriormente para o local de implementação do aerogerador. Os restantes componentes são produzidos como anteriormente descritos.

Após a instalação do aerogerador e término da sua vida útil, os seus materiais serão reutilizados em outros materiais ou colocados em aterros. Todo o processo de modelação descrito poderá ser observado no anexo A7.

Nesta altura é possível proceder-se à análise dos resultados.

## 2.2.2 Apresentação dos resultados

A partir das avaliações anteriormente descritas, foi possível realizar as diversas simulações e obter os resultados pretendidos.

### 2.2.2.1 Aerogerador sem CD

Com a simulação de um aerogerador sem o CD é possível obter diversos gráficos. Um dos gráficos obtidos é o GWP - Potencial aquecimento global como foi referido anteriormente, este pode ser observado na figura 2.8 .

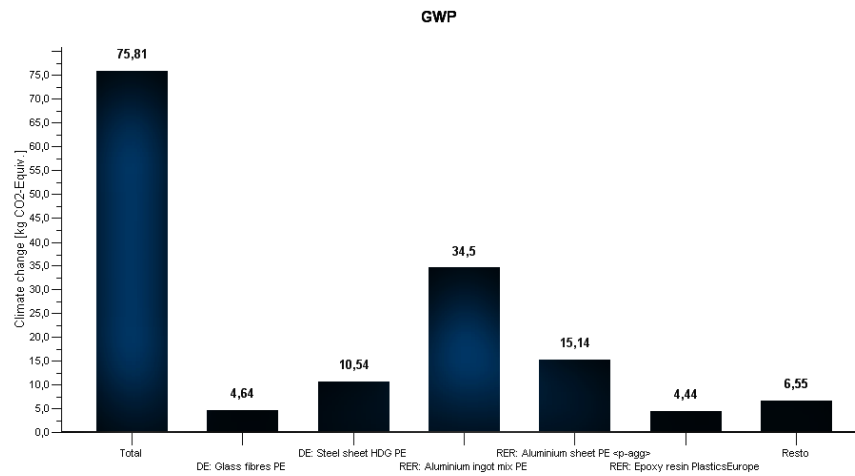


Figura 2.8: Potencial aquecimento global de um aerogerador

Segundo o gráfico obtido, um aerogerador da dimensão e potência do estudado, durante o seu ciclo de vida é responsável pela produção de cerca de 75.81 kg CO<sub>2</sub>-equivalente. O material que mais contribui para este valor é o alumínio que é responsável por 49.64 kg CO<sub>2</sub>-eq. Estes valores são reduzidos devido a considerar-se que 90 % do alumínio é reciclado, ou seja, dos 25kg de Alumínio da torre 22.5 kg são reciclados. É possível ainda observar que o aço é responsável por 10.54 kg de CO<sub>2</sub> eq. enquanto a fibra de vidro e resina epoxy por cerca de 4,64 e 4.44 kg de CO<sub>2</sub> eq, respectivamente.

Desprezando a reciclagem do alumínio, os valores obtidos serão bastante diferentes como é possível observar na figura 2.9.

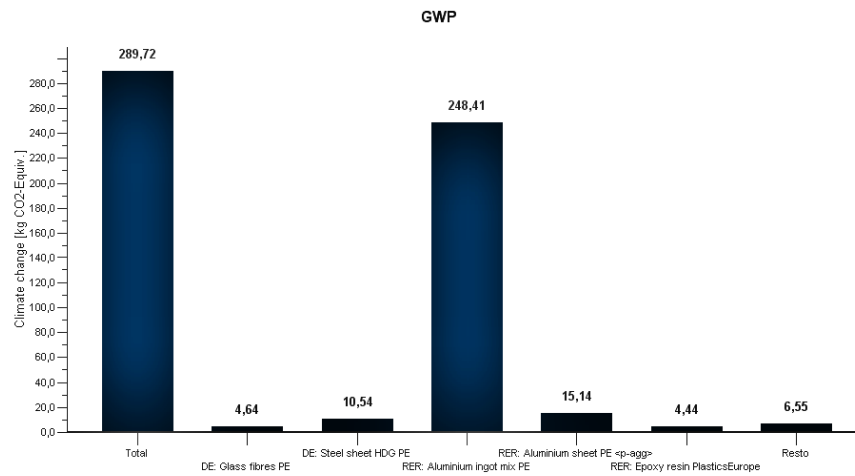


Figura 2.9: GWP aerogerador sem cd e sem reciclagem de metais

Ao desprezar-se a reciclagem do alumínio, observa-se que o GWP aumenta cerca de 3.8 vezes. Este valor indica que a reciclagem dos metais é deveras importante para a redução e mitigação dos impactos gerados pelo mesmo. Analisando o gráfico, observa-se que sem reciclagem o aerogerador seria responsável pela emissão de 289.72 kg de CO<sub>2</sub> eq, sendo o alumínio responsável por 263,55 kg. A reciclagem, torna-se assim essencial para uma maior sustentabilidade, visto que o valor de um aerogerador onde não é feita qualquer reciclagem é aproximadamente o de 4 aerogeradores cujos materiais são reciclados devidamente.

Uma vez que o CD será acoplado ao aerogerador de modo a produzir-se mais energia, é espectável que este valor aumente devido à introdução de matéria no sistema.

### 2.2.2.2 Aerogerador com CD em alumínio

Com a junção do CD ao aerogerador, os resultados anteriores serão alterados como foi explicado no tópico anterior. Sendo assim, no próximo gráfico será possível observar essas alterações.

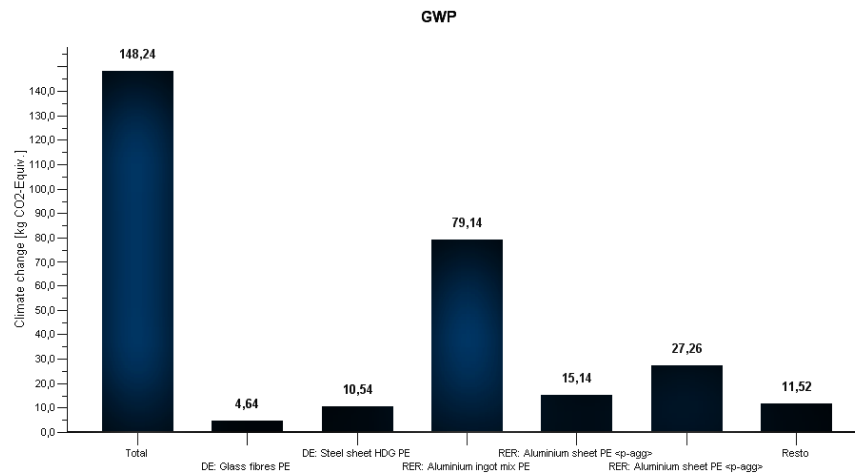


Figura 2.10: GWP aerogerador com CD em alumínio

O GWP aumenta assim de 75.81 a 148.24 kg de CO<sub>2</sub> equivalente, devido a como já foi referido anteriormente ter-se introduzido matéria neste sistema. Destes 148.24 kg de CO<sub>2</sub>, 121.54 kg são provenientes do alumínio. As emissões devidas aos restantes materiais mantêm-se uma vez que o que foi introduzido no sistema foi o alumínio.

De modo a baixar-mos este valor sem ser comprometida a função do CD, tornou-se essencial realizar-se o estudo para um CD construído em fibra de vidro e em resina.

### 2.2.2.3 Aerogerador com CD em resina epoxy e fibra de vidro

Após a simulação do sistema alterado, ou seja, em que o CD acoplado ao aerogerador é construído em fibra de vidro e em resina, é possível obter o próximo gráfico.

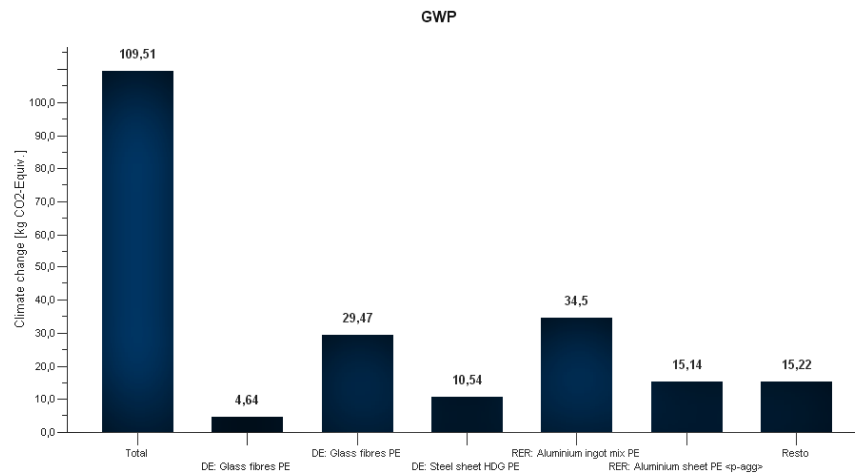


Figura 2.11: GWP do aerogerador com CD em fibra de vidro e em resina

Observando a figura 2.11, é possível observar que o sistema tal como descrito será responsável pela emissão de 109.51 kg de CO<sub>2</sub> eq. O alumínio continua a ser o maior contribuidor para estes valores, com 49.64 kg CO<sub>2</sub>, devido à torre do aerogerador. Como era de esperar, o segundo maior contribuidor é a fibra de vidro com cerca de 34.11 kg de CO<sub>2</sub> eq.

Sendo assim os próximos pontos a serem trabalhados serão cruciais para a diminuição do GWP.

#### 2.2.2.4 Aerogerador com CD em cortiça e resina

Mais uma vez, após a introdução dos parâmetros do sistema no software, foi possível obter os seguintes resultados:

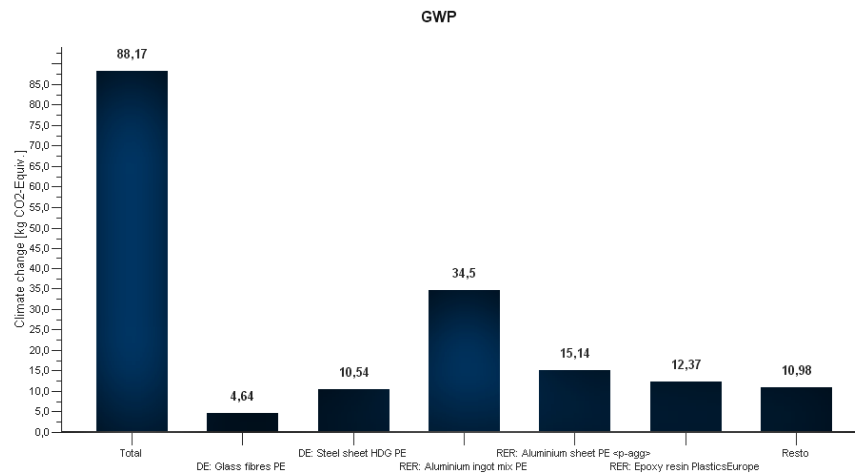


Figura 2.12: GWP do aerogerador com CD em cortiça e resina

Com a alteração do CD para materiais mais sustentáveis é possível observar que é possível baixar de de 109.51 para 88.17 kg de CO<sub>2</sub> eq , representando assim uma redução de cerca de 20 % das emissões de CO<sub>2</sub>. Contudo, observando a figura em cima é possível observar que o grande problema deste sistema continua a ser o alumínio presente na torre do aerogerador com cerca de 49.64 kg de CO<sub>2</sub>, representando mais de metade das emissões totais. O segundo maior contribuinte é a resina com 12.37 kg de CO<sub>2</sub> seguindo-se os metais ferrosos presentes no gerador.

Entrando em consideração com o já descrito, torna-se crucial encontrar soluções para a torre do aerogerador, de modo a torná-la sustentável permitindo assim a redução das emissões de CO<sub>2</sub>.

### 2.2.2.5 Aerogerador com torre em madeira, CD e pás em resina e cortiça

De modo a reduzir-se ao máximo o GWP deste sistema, optou-se por substituir a torre de alumínio por uma de madeira, colmatando assim um dos maiores problemas ambientais deste sistema. Os resultados poderão ser observados na próxima figura:

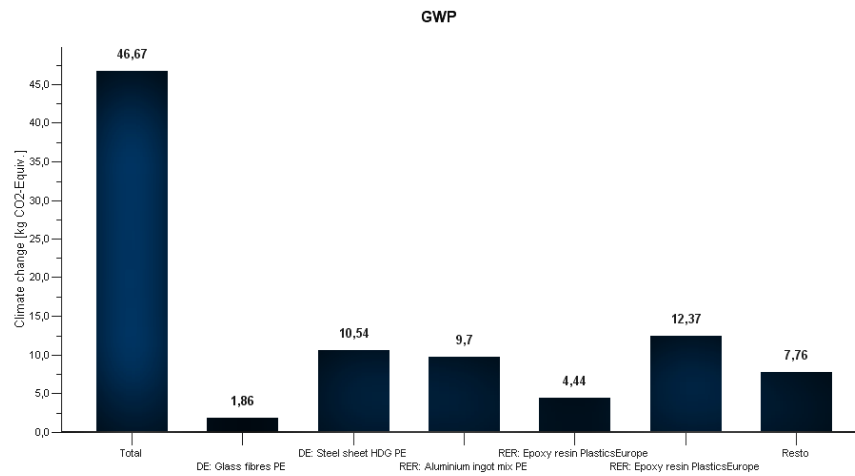


Figura 2.13: GWP do aerogerador com torre em madeira, CD e pás em cortiça e resina

Com este gráfico é possível observar que com estas alterações reduz-se o GWP a 46.67 kg CO<sub>2</sub> eq, valor este bastante inferior a um aerogerador com torre em metal. Os maiores contribuidores para estes valores são a resina epoxy presente no CD, pás e molduras do aerogerador com um valor de 16.81 kg CO<sub>2</sub> eq, seguindo-se do ferro e alumínio com 10.54 e 9.7 kg CO<sub>2</sub> eq, respectivamente. Este valor poderá ainda ser reduzido se for utilizada uma resina natural em alternativa à resina epoxy.

### 2.2.3 Comparação dos resultados entre os sistemas

De modo a poder-se comparar os resultados dos diversos sistemas enumerados em cima, foram realizados seis gráficos, um para cada categoria de desperdício apresentada em cima. Os sistemas em estudo Aerogerador sem CD, Aerogerador com CD em alumínio, Aerogerador com CD em resina epoxy e fibra de vidro, Aerogerador com CD em cortiça e resina, Aerogerador com torre em madeira, CD e pás em resina e cortiça são representados nos gráficos por aerogerador, CD alumínio, CD fibra, CD cortiça e maximizado respectivamente.

### 2.2.3.1 Potencial de aquecimento global - GWP

Na figura 2.14, serão apresentados os valores do Potencial aquecimento global para os sistemas.

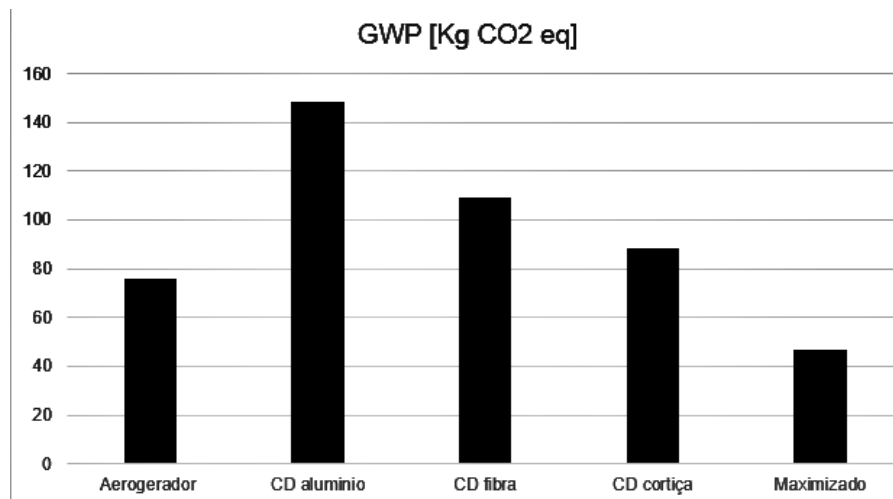


Figura 2.14: GWP dos diversos sistemas

Do gráfico anterior, é possível observar que o sistema do aerogerador com o CD em alumínio é o mais agressivo para o meio ambiente apresentando um GWP de 148.24 kg CO<sub>2</sub> eq, este sistema apenas foi estudado por ter sido um dos protótipos colocados em campo para os testes.

De seguida temos o sistema CD fibra, cujo valor é de 109.51 kg de CO<sub>2</sub> eq, este valor deve-se essencialmente ao alumínio presente na torre do aerogerador, e da fibra presente no CD e pás do aerogerador.

O segundo sistema menos agressivo é o sistema cujo CD é composto por cortiça e resina com um valor de 88.17 kg CO<sub>2</sub> eq, apenas com mais 12.36 kg CO<sub>2</sub> eq do que um aerogerador sem CD.

O sistema menos agressivo é o do aerogerador com a torre em madeira e CD e pás em cortiça, uma vez que se elimina os metais da torre e fibras do CD e pás, com um valor de 46.67 kg CO<sub>2</sub> eq. Este sistema consegue ser bastante inferior ao de um aerogerador sem CD apesar da introdução de matéria, tornando-se assim um sistema sustentável que produzirá ainda mais energia do que o primeiro.

### 2.2.3.2 Potencial de acidificação - AP

Como já foi descrito anteriormente, a acidificação tem efeitos directos e indirectos, sendo um deles o caso das chuvas ácidas. Torna-se assim importante avaliar este potencial, representado na próxima figura.

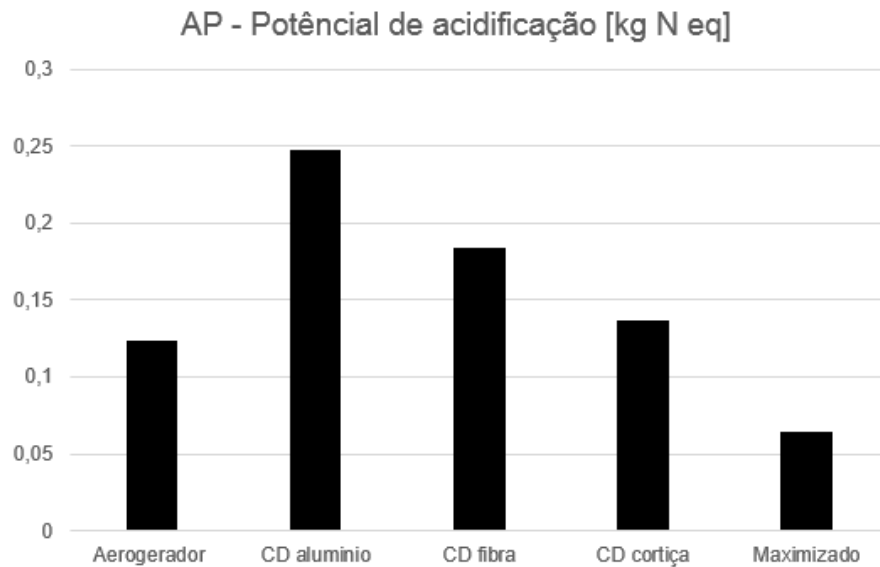


Figura 2.15: AP dos diversos sistemas

O sistema que mais contribui para a acidificação é o aerogerador com CD em alumínio com um valor de 0.248 kg N<sub>eq</sub>, seguindo-se do aerogerador com CD em fibra com 0.184 kg N<sub>eq</sub>, aerogerador com CD em cortiça com 0.137 kg N<sub>eq</sub> e finalmente o que contribui menos com 0.064 kg N<sub>eq</sub>, o aerogerador com CD e pás em cortiça e torre em madeira. Mais uma vez o potencial do último é inferior ao do aerogerador sem CD.

Sendo assim mais uma vez se observa que é possível ter um produto que produz mais energia e mais sustentável.

### 2.2.3.3 Eco-toxicidade

Este potencial avalia os danos causados nos ecossistemas e é definido pela duração e frequência do impacte e é baseada numa série de parâmetros, como é o caso da

composição química, propriedades físicas, ponto da fonte de emissão, seu comportamento, localização e libertação no meio-ambiente.

Este potencial pode ser observado na próxima figura para os diferentes sistemas em estudo.

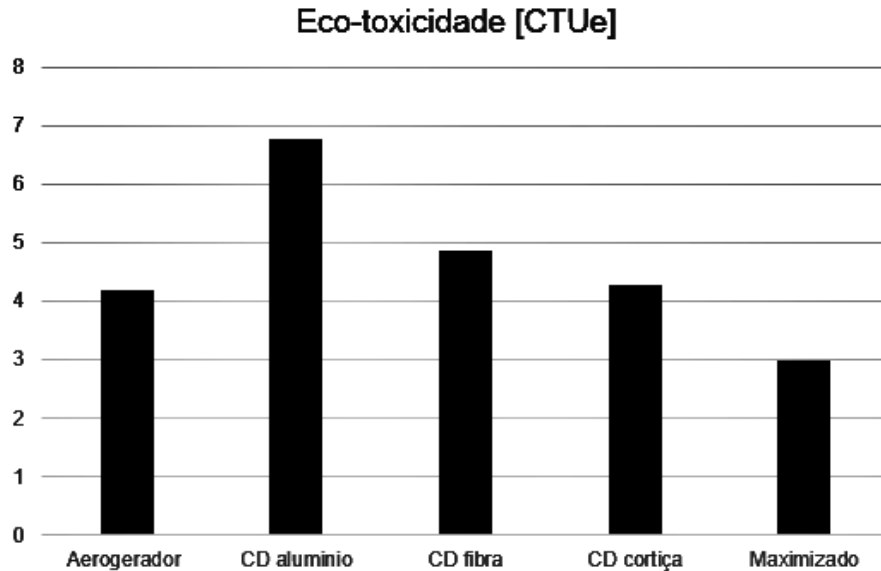


Figura 2.16: Eco-toxicidade dos diversos sistemas

Da figura em cima, pode-se concluir que mais uma vez, o sistema que mais contribui para este parâmetro em estudo é o aerogerador com CD em alumínio com 6.76 CTUe, seguindo-se do aerogerador com CD em fibra com 4.86, aerogerador com CD em cortiça com 4.27 (sendo este valor bastante semelhante ao de um aerogerador sem qualquer CD com 4.19). O aerogerador com torre em madeira e CD e pás em cortiça e resina apresenta mais uma vez o valor mais baixo, uma vez que os metais são bastante reduzidos, ficando assim com um valor de 2.98 CTUe.

#### 2.2.3.4 Potencial de eutrofização

A eutrofização é o fenómeno dado pelo enriquecimento de nutrientes, alguns dos resultados deste fenómeno é a presença insuficiente de oxigénio nas águas, mortes de culturas e pestes. De modo a avaliar quais os sistemas que mais influenciam estas ocorrências, obteve-se a figura 2.17.

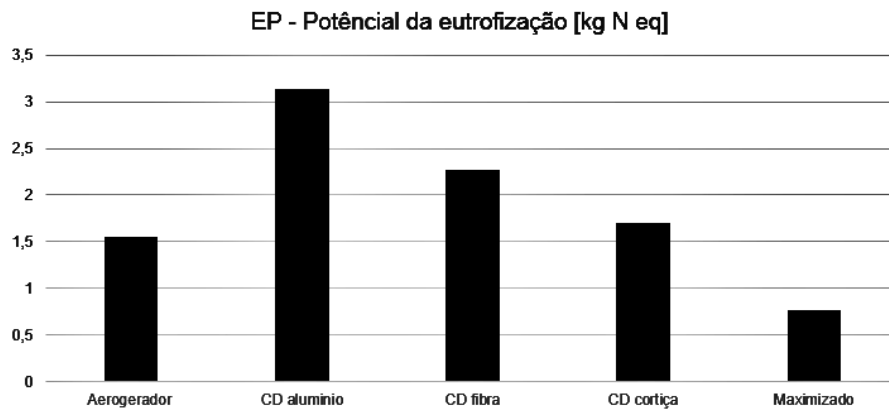


Figura 2.17: EP dos diversos sistemas

Da figura anterior, é possível observar que os sistemas que mais contribuem para a eutrofização são o aerogerador com o CD em alumínio com 3.13, o aerogerador com o CD em fibra com 2.27 e o aerogerador com o CD em cortiça com 1.7 kg  $N_{eq}$ . Novamente, o sistema mais sustentável é o conjunto aerogerador, torre em madeira, CD e pás em cortiça e resina com apenas 0.77 kg  $N_{eq}$ .

### 2.2.3.5 Potencial destruição do Ozono

A destruição do ozono contribui para o buraco da camada do ozono, cujas substâncias que têm o efeito de destruição na camada do ozono são: os clorofluorcarbonetos (CFCs) e os Óxidos Nitrogênio (NOX).

A avaliação do ODP entra em consideração com efeitos globais, irreversíveis e a longo termo, podendo ser observado para estes sistema na próxima figura.

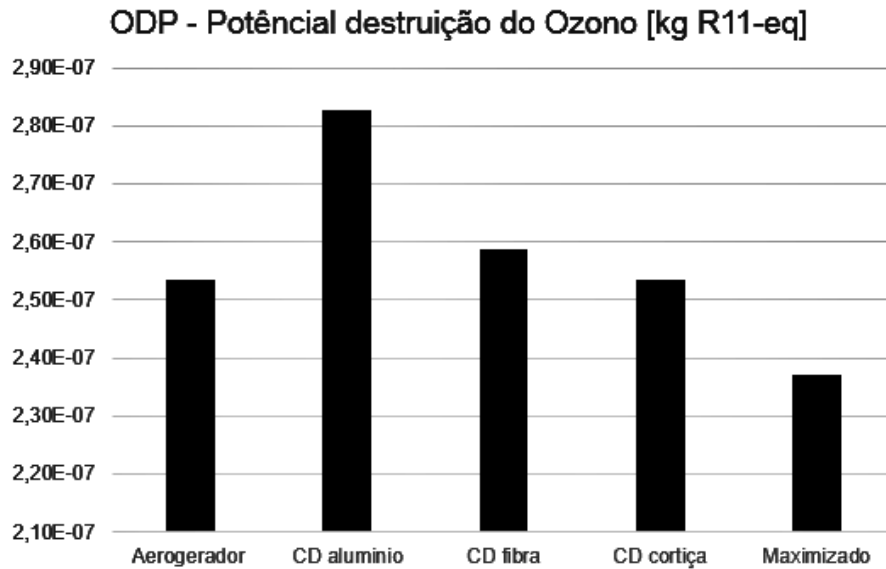


Figura 2.18: ODP dos diversos sistemas

Através da observação da figura anterior, é possível observar que o maior contribuidor para este fenómeno é o aerogerador com CD em alumínio com o valor de  $2,83E^{-7}$  kg R11<sub>eq</sub>, seguido do aerogerador com CD em fibra com  $2,59E^{-7}$ . Uma observação interessante neste potencial é que o valor é o mesmo tanto para um aerogerador sem qualquer CD como para um aerogerador com CD em cortiça (cerca de  $2,54E^{-7}$  kg R11<sub>eq</sub>), podendo-se concluir que o CD em cortiça em pouco ou nada contribui.

Mais uma vez, o sistema cuja torre é em madeira é o que menos contribui para estes fenómenos, apresentando um valor de  $2,37E^{-7}$  kg R11<sub>eq</sub>.

Contudo, em termos práticos estes valores são zero, considera-se assim que este potencial é irrelevante no estudo destes sistemas.

### 2.2.3.6 Potencial toxicidade humana

A avaliação do Potencial de Toxicidade Humana (HTP), estima os impactos negativos de processos em humanos e pode ser observada na próxima figura.

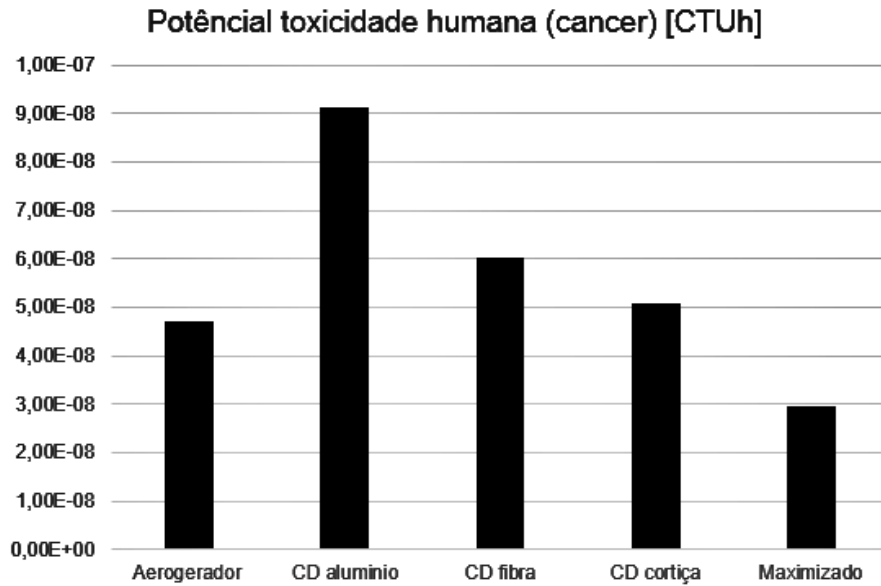


Figura 2.19: Toxicidade humana dos diversos sistemas

Da análise do gráfico anterior, é notório que o aerogerador com o CD em alumínio é o que contribui para maiores impactos negativos com um valor de  $9.12E^{-8}$ CTUh, de seguida o aerogerador com CD em fibra com  $6.03E^{-8}$ e o aerogerador com CD em cortiça com  $5.09E^{-8}$  CTUh. É possível ainda observar que o sistema cuja torre é em madeira apresenta o valor mais baixo com  $2.97E^{-8}$  CTUh. Mais uma vez, tendo em conta a grandeza dos valores, este potencial é também irrelevante.

Após a análise dos resultados, é possível retirar as conclusões.

#### 2.2.4 Comparação com modelo

Usando como referência o modelo do software[13], um clip para papéis, comparar-se-á às análises feitas do Enhanced WT.

Na próxima figura, é possível verificar a modelação dos clips.

**SPOILER - Tutorial Model - DONE**  
 Plano de processo Galbi: Mass [kg]  
 Os nomes dos processos listados são mostrados.

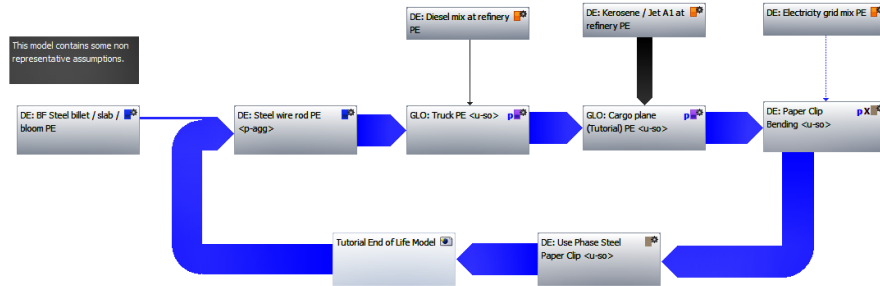


Figura 2.20: Modelação Ciclo de Vida de Clips de metal para folhas de papel

O modelo considera que um clip pesa cerca de 0.00035 kg. De modo a poder-se avaliar melhor os resultados, considerou-se que o ciclo é para um quantidade igual a 100000 clips, ou seja, o peso total de clips será de 35 kg. Considerando ainda que uma caixa de clips contém 500g, então esses 35 kg corresponderam a 70 caixas de clips.

Simulando o modelo, obteve-se o GWP, figura 2.21.

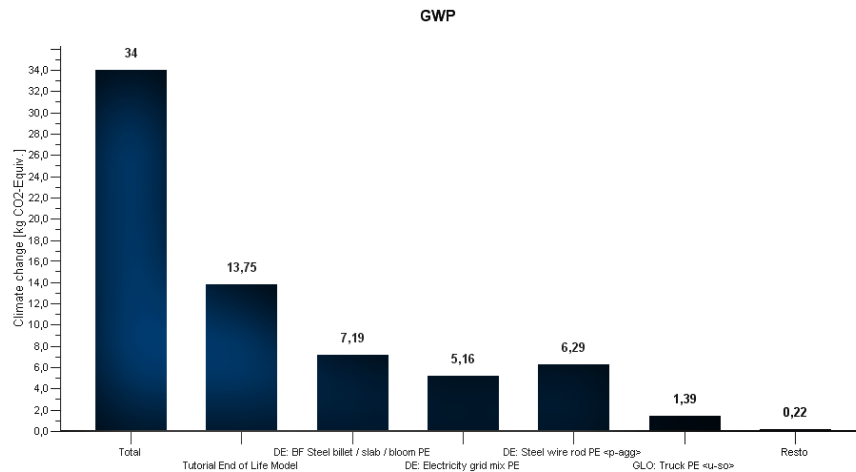


Figura 2.21: GWP de clips

É possível observar que 70 caixas de clips, emitem cerca de 34 kg CO<sub>2-eq</sub> durante a sua vida, menos 12.67 kg CO<sub>2-eq</sub> do que o aerogerador Enhanced WT com as melhorias adotadas.

### 2.2.5 Conclusões

Realizado os estudos para os diferentes sistemas é possível retirar algumas conclusões.

Como seria de esperar, ao introduzir-se matéria num aerogerador os índices de sustentabilidade aumentam consideravelmente. Este facto pode ser mitigado através da utilização de materiais sustentáveis.

Inicialmente o pretendido seria mimizar ao máximo os índices de sustentabilidade com a implementação do CD, o que de facto foi possível recorrendo ao uso da cortiça tanto na construção do CD como das pás do aerogerador. Através dos resultados analisados pode-se chegar à conclusão que é possível atenuar o GWP havendo apenas um aumento de 12.36 kg CO<sub>2-eq</sub> em relação a um aerogerador sem o CD. Sendo assim torna-se claro que é possível aumentar a potência de um sistema sem comprometer o meio ambiente.

No caso deste sistema, pretendeu-se ir mais além do que mimizar os impactos gerados pela colocação do CD, tornando-se crucial conseguir um aerogerador mais eficiente e mais sustentável, para isso surgiu a alteração da torre do aerogerador. A substituição da torre de metal por uma em madeira permitiu-nos uma redução de cerca de 47 % do Potencial de aquecimento global em relação ao sistema com CD em cortiça e uma redução de cerca de 14 % em relação a um aerogerador sem CD.

Com esta alteração torna-se imperativo começar-se a reavaliar diferentes produtos existentes no nosso dia-a-dia, sendo que por vezes a maneira de nos tornarmos mais sustentáveis é de facto regressarmos às origens em alternativa à procura exaustiva de novos materiais.

O último sistema estudado é apenas 12.67 kg CO<sub>2eq</sub> superior a 35 kg de Clips para papéis, sendo que o primeiro é uma tecnologia de conversão de energia limpa pode-se concluir que este sistema é bastante mais sustentável do que os clips utilizados por exemplo num bloco de escritórios.

Conclui-se ainda que de modo a obterem-se valores mais altos de sustentabilidade, o primeiro passo será a substituição da torre de metal por torres em madeira ou cartão, tendo em conta os locais e posteriormente o desenvolvimento do CD, permitindo uma maior redução dos valores de Potencial de Aquecimento Global no primeiro instante.

Pode-se concluir assim, que com este projecto é possível aumentarmos a potência de um aerogerador e diminuirmos os seus índices de sustentabilidade tornando-o cada vez mais “eco-friendly”.

Parte II

Enhanced WT

## Capítulo 3

# Integração da dissertação no projecto

O projeto Enhanced WT consiste na democratização da produção de energia elétrica individual, o qual visa a conceção, desenvolvimento e fabricação de equipamentos novos e/ou adaptáveis a aerogeradores de pequenas dimensões/potências, que incorporem soluções de conforto acústico e visual e que sejam facilmente integrados em ambiente urbano. Um dos objetivos principais é ultrapassar a relação custo/benefício dos atuais aerogeradores de pequena dimensão, através do aumento do benefício aportado pelas incorporações tecnológicas introduzidas no produto (Enhanced WT). Este consiste num dispositivo concentrador-difusor (C-D) que envolve o rotor do aerogerador. Este dispositivo acelera o escoamento e consequentemente aumenta a potência do equipamento. O facto de envolver o rotor condiciona e conforma o escoamento nas pás, reduzindo o ruído produzido pelo equipamento. Outro dos objectivos deste projeto é tornar o Enhanced WT um produto sustentável, através das contribuições desta dissertação.

Além do estudo de sustentabilidade, foram realizadas outras actividades no enquadramento da participação do grupo Enhanced WT, como por exemplo trabalho em simulação 3D, realização de protótipos à escala reduzida, participação em reuniões, montagem do aerogerador e protótipo no terreno, entre outros.

## 3.1 Trabalho desenvolvido

Ao longo do ano foram desenvolvidos alguns estudos e trabalhos paralelos ao estudo de sustentabilidade como por exemplo simulação do museu da electricidade em SolidWorks, medições acústicas dos modelos em escala reduzida, montagem do aerogerador no terreno, realização dos modelos à escala reduzida e a participação em reuniões com os restantes elementos e até entidades parceiras neste projecto.

### 3.1.1 Reuniões Enhanced WT

A integração na equipa Enhanced WT permitiu ir mais além durante a execução deste projecto. Inicialmente começou-se por pensar na avaliação dos índices de sustentabilidade de um aerogerador com um CD acoplado. Com o avançar do projecto, pensou-se em utilizar como material a cortiça de modo a diminuir o ruído e os índices de sustentabilidade, para tal criou-se a parceria com a corticeira Amorim.

Mais tarde, com o desenvolvimento das modelações dos sistemas, chegou-se à conclusão de que a torre do aerogerador era o maior contribuinte para os índices, como não é possível retirar este elemento, pensou-se em tentar desmaterializar a mesma, utilizando como referência o arquitecto Shigeru Ban. Este projectou e reconstruiu uma catedral, destruída por um terramoto em 2011, cujo material de construção é o cartão.[2] Surgiu assim a ideia de substituir a torre em metal por uma em cartão.

As reuniões com a equipa foram assim deveras importantes durante este projecto, contribuindo assim não só para o desenvolvimento do projecto em si, mas também de modo à percepção do que é trabalhar em equipa, de como se desenvolvem projectos, entre outros.

### 3.1.2 Museu da electricidade em SolidWorks

O projecto Enhanced WT foi finalista em diversos concursos, um dos primeiros foi o prémio EDP inovação 2013 onde a entrega dos prémios seria no Museu da Electricidade em Lisboa. Decidiu-se por bem, que seria importante mostrar o perfil de escoamento do vento naquela zona onde seria implementado virtualmente um aerogerador Enhanced WT. Para tal, estudou-se a localização e morfologia do edifício e sua envolvente, recorrendo ao Google Earth, figura 3.1.

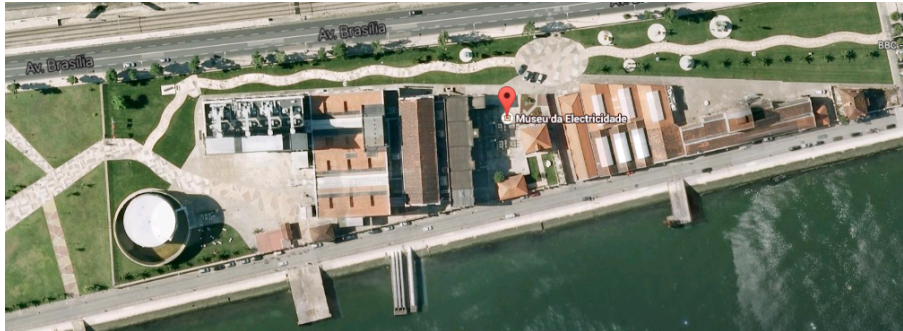


Figura 3.1: Museu da electricidade via satélite

Através de algumas funcionalidades do Google Earth, foi possível estimar aproximadamente as dimensões dos edifícios e objetos envolventes. Tendo esses valores foi possível realizar a simulação em 3D da área de estudo no SolidWorks, figura 3.2

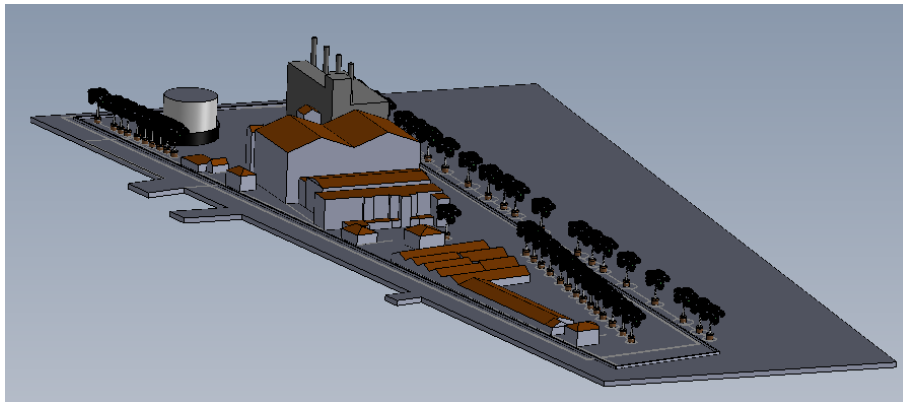


Figura 3.2: Modelação 3D em SolidWorks do Museu da Eletricidade

Este modelo foi utilizado posteriormente para se observar o escoamento do vento junto do edifício, simulação esta feita com o SolidWorks resultando na figura 3.3.

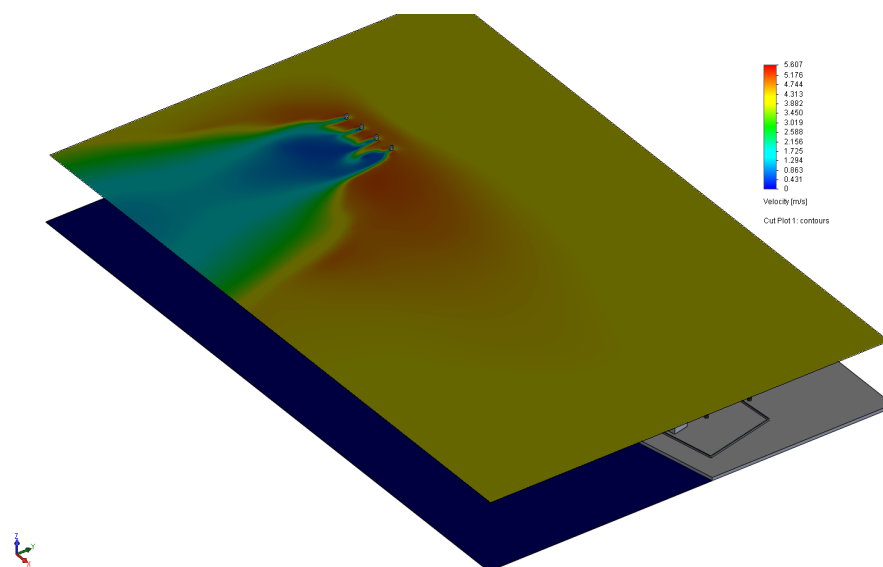


Figura 3.3: Simulação escoamento do vento no museu da eletricidade

Com esta simulação pode-se observar que junto às chaminés do museu é onde se apresentam as velocidades máximas.

### 3.1.3 Montagem do aerogerador no terreno

Foram feitas três deslocações ao local de implementação do protótipo. A primeira, foi para a colocação do primeiro protótipo em alumínio, posteriormente foi realizada a mudança forçada do CD em alumínio para um em Fibra de modo a reduzir-se o peso. E finalmente para a colocação do leme.

#### 3.1.3.1 Montagem do primeiro protótipo (alumínio)

A montagem do primeiro protótipo foi feita no mês de Fevereiro e pretendia-se com o mesmo obter os valores de produção de energia em um aerogerador com um CD. Na figura 3.4, é possível observar o protótipo ainda no laboratório de Tecnologia Mecânica da ESTiG .



Figura 3.4: Protótipo em alumínio no laboratório

Posteriormente o protótipo foi levado para o terreno, figura 3.5.



Figura 3.5: Protótipo de alumínio no terreno

Feitas as ligações e conexões à torre, começou-se a elevar o protótipo o que se tornou uma tarefa bastante difícil devido às condições ambientais no momento da instalação do mesmo. Contudo, o trabalho de equipa compensa e através do esforço de toda a equipa de montagem o protótipo começou a subir, figura 3.6:



Figura 3.6: Elevação da torre com o protótipo em alumínio

Finalmente, após todo o esforço da equipa o protótipo ficou finalmente montado.  
Figura 3.7



Figura 3.7: Protótipo em alumínio montado

A montagem do protótipo correu bem, contudo passadas umas semanas devido a condições ambientais adversas o protótipo acabou por cair conduzindo assim à necessidade de implementação de um novo protótipo com material mais leve, surgiu assim o protótipo em fibra de vidro.

### 3.1.3.2 Montagem do segundo protótipo (fibra de vidro e resina)

O segundo protótipo foi produzido nos laboratórios da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Bragança pelos membros da equipa Eng. Duarte Freitas e Eng. Paulo Jorge. Este protótipo foi montado no dia 27 de Março de 2014.

Na próxima figura é possível observar o protótipo em cima de um veículo de transporte, ainda na escola.



Figura 3.8: Protótipo 2

Na próxima figura é possível ver os preparativos para a montagem já no local:



Figura 3.9: Preparação do protótipo 2 no local

A elevação deste protótipo foi muito mais fácil derivado não só às condições ambientais serem bastante agradáveis mas também devido à perda de peso relativa à mudança do material. Na próxima figura é possível ver a torre com o CD a ser erguida.



Figura 3.10: Elevação da torre com o protótipo 2

Finalmente, o segundo protótipo ficou montado, figura 3.11.



Figura 3.11: Segundo protótipo instalado

Montado o segundo protótipo, foi possível observar que o mesmo tinha algumas dificuldades em orientar-se pelo vento, sendo assim decidiu-se colocar um leme

para ser observado o comportamento do mesmo. Foram feitas ainda alterações no protótipo.

### 3.1.3.3 Montagem do leme

Foram feitas algumas alterações no modelo antes da colocação do leme, como pode ser observado a próxima figura.



Figura 3.12: Alterações no protótipo

Alterações realizadas, o leme foi acoplado ao protótipo, figura 3.13.



Figura 3.13: Colocação do leme

Com o leme colocado, começou-se a elevar o protótipo, figura 3.14.



Figura 3.14: Elevação do protótipo com o leme

E finalmente o protótipo com as devidas alterações ficou colocado, figura 3.15.



Figura 3.15: Protótipo alterado e com leme colocado

Além das montagens dos protótipos à escala real, foram ainda realizados em laboratório modelos a escala reduzida.

### 3.1.4 Realização dos modelos a escala reduzida

Uma das tarefas realizadas durante a integração na equipa Enhanced WT foi a realização de quatro modelos em fibra de vidro e resina à escala reduzida. Os mesmos foram feitos nos laboratórios da ESTIG utilizando para tal a fibra de vidro, resina epoxy e catalisador da escola.

O molde utilizado para a construção dos modelos já se encontrava feito anteriormente, facilitando assim o trabalho. Cada modelo é composto por três peças iguais feitas através do mesmo molde, figura 3.16.



Figura 3.16: Molde para os modelos

Cada peça foi feita individualmente seguindo as etapas a seguir descritas.

Em primeiro lugar, passou-se a cera por todo o molde de modo a facilitar posteriormente a separação da peça.

Preparou-se a resina juntamente com a catalisador, cerca de 25 g de resina e 0.5 g de catalisador (2 %), mexeu-se bem.

Colocou-se duas camadas de fibra de vidro no molde tentando moldá-la ao molde da melhor forma. Verteu-se a mistura de resina com catalisador em cima do molde já com a fibra e com a ajuda de um pínzel espalhou-se bem o preparado garantindo que toda a fibra de vidro se encontrava com o mesmo, resultando na figura 3.17.



Figura 3.17: Molde com fibra de vidra e resina

Deixou-se secar na hotte durante aproximadamente 30 minutos.

Após os 30 minutos, colocou-se o molde com o preparado em fibra no forno durante duas horas. Retirou-se do forno e com cuidado separou-se o molde da peça, figura 3.18.



Figura 3.18: Peças após separação do molde

Após as peças feitas, cortou-se pela medida ficando com as três peças prontas a ser coladas, figura 3.19.



Figura 3.19: Peças cortadas

Com a mistura de resina e catalisador, colou-se as peças umas às outras formando o CD. Repetiram-se os processos de secagem até se obter finalmente cada modelo, figura 3.20.



Figura 3.20: Modelo à escala

Concluídos os modelos, foram passados aos Designers para continuarem os trabalhos.

# Conclusão

Neste momento é possível concluir que a integração desta dissertação no projeto Enhanced WT só trouxe pontos favoráveis à realização da mesma.

A participação na equipa de trabalhos permitiu não só ter uma ajuda extra neste projecto mas também um crescimento em todos os níveis, uma vez que foi possibilitado o trabalho conjunto com uma equipa de diversas áreas. Tendo assim sido oferecida a compreensão de como designers, economistas e engenheiros de diferentes áreas de formação podem interagir de modo a avançar com um problema/solução.

Recorrer ao software Gabi 6.0 permitiu simplificar o estudo uma vez que esta é uma área difícil de quantificar. Contudo em alguns momentos sentiu-se algumas dificuldades uma vez que existe pouca informação relativamente ao mesmo.

Com o desenvolvimento progressivo e adição de novos sistemas para estudo, foi possível ir melhorando o sistema do ponto de vista da sustentabilidade. Inicialmente, tinha-se um aerogerador tipicamente normal cujos valores do Potencial de Aquecimento Global são de 75.81 kg CO<sub>2-eq</sub>. Contudo, uma vez que se pretende colocar nos aerogeradores um Convergente-Divergente era de esperar que os valores aumentassem como foi provado nesta dissertação. Ao colocar um aerogerador com um CD em alumínio o valor do GWP aumentou para 148.24 kg CO<sub>2</sub>. O sistema cujo CD é construído em fibra apresenta um valor inferior ao anterior com um Potencial de 109.51 kg CO<sub>2-eq</sub>. No sentido da redução destes valores realizou-se o estudo para um CD em cortiça e resina, resultando assim na redução de cerca de 20 % do valor anterior. Sendo este estudo ambicioso, ao substituir-se a torre em alumínio por uma em madeira resultou em 46.67 kg CO<sub>2-eq</sub>.

Outra conclusão possível de retirar é que as emissões do sistema cuja torre é em madeira são aproximadamente iguais às emissões provenientes do ciclo de vida de 48 kg de clips de papel, cerca de 96 caixas. Não deixando de verificar que da utilização dos aerogeradores resulta eletricidade.

Ainda assim, este estudo superou bastante as espetativas pois não só foi provado

que é possível minimizar os índices ao se melhorar o aerogerador, como também é possível ir mais além e diminuí-los bastante.

Referente ao caso estudo enunciado, a principal conclusão retirada é que é possível produzir um produto mais eficiente e sustentável ao mesmo tempo, sendo assim a velha premissa de que o avanço tecnológico põe em causa o meio ambiente é totalmente errada, pois o avanço tecnológico deveria em primeiro lugar assentar em alterar os produtos já existentes em produtos amigos do ambiente.

Torna-se evidente que por vezes as soluções mais óbvias e simples são as mais eficientes e sustentáveis, pois o que inicialmente pode parecer impensável ou um retrocesso nos sistemas é realmente a melhor solução.

Conclui-se assim, que apesar de um aerogerador típico ser uma fonte de energia renovável bastante utilizada por ser uma energia limpa, é possível ir mais além e obter um aerogerador que produza mais e que prejudique menos o meio ambiente tanto na produção do próprio aerogerador como no seu desmantelamento.

Como perspectivas do futuro, espera-se que o projecto Enhanced WT se torne realmente um produto sustentável, utilizando para tal algumas das ideias desenvolvidas nesta dissertação e que seja ainda mais ambicioso como por exemplo na substituição das resinas por outras de origem natural.

Espera-se ainda que sejam tomadas medidas para o desenvolvimento de produtos sustentáveis, aproximando cada vez mais os produtos ao ambiente.

# Bibliografia

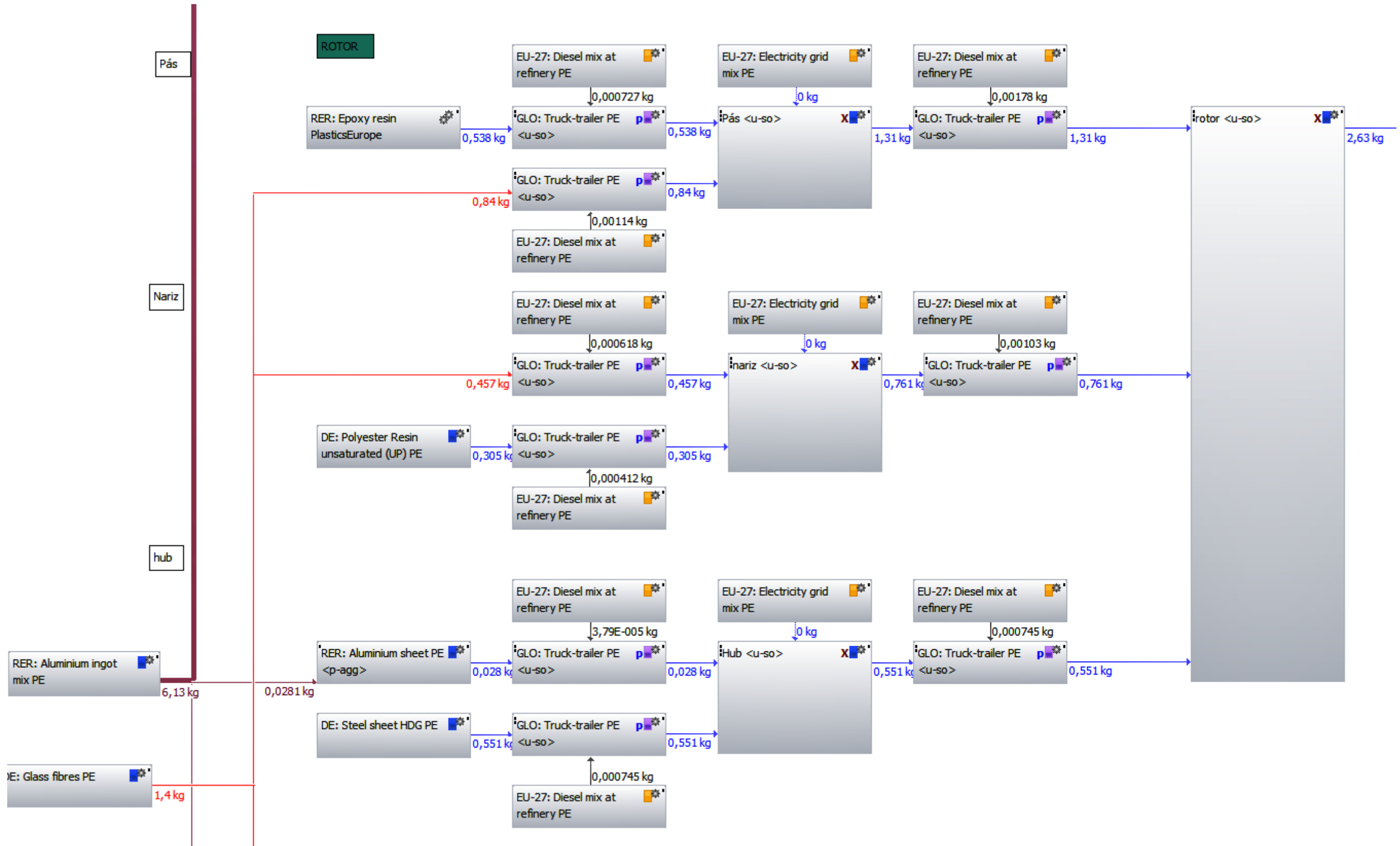
- [1] United States Environmental Protection Agency. Tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts (traci). <http://www.epa.gov/nrmrl/std/traci/traci.html>, February 2014.
- [2] Bridgit Anderson. Works - disaster relief projects. [http://www.shigerubanarchitects.com/works/2013\\_cardboard-cathedral/index.html](http://www.shigerubanarchitects.com/works/2013_cardboard-cathedral/index.html), March 2014.
- [3] Anders Arvesen, Åsa Grytli Tveten, Edgar G Hertwich, and Anders Hammer Strømman. Life-cycle assessments of wind energy systems. 2009.
- [4] Jane Bare, Daniel Young, STD QAM, Matthew Hopton, and SAB Acting Branch Chief. Tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts (traci). 2012.
- [5] Anna Bondesson. Comparative lca model on renewable power solutions for off-grid radio base stations, 2010.
- [6] M Dreicer, V Tort, and P Manen. Externe: Externalities of energy vol. 5. nuclear. Technical report, European Commission, Directorate-General XII, Science, Research and Development (Luxembourg), 1995.
- [7] EarthShift. Traci 2 impact assessment method. <http://www.earthshift.com/software/simapro/traci2>, February 2014.
- [8] Comissao Europeia. Ilcd handbook. [http://eplca.jrc.ec.europa.eu/?page\\_id=86](http://eplca.jrc.ec.europa.eu/?page_id=86), February 2014.
- [9] R Frischknecht, A Braunschweig, P Hofstetter, and P Suter. Human health damages due to ionising radiation in life cycle impact assessment. *Environmental impact assessment Review*, 1999.

- [10] Chaouki Ghenai. *Life Cycle Analysis of Wind Turbine*. Springer, Berlin, 2012.
- [11] Jeroen B Guinée. Handbook on life cycle assessment operational guide to the iso standards. *The international journal of life cycle assessment*, 7(5):692, 2002.
- [12] Patrick Hofstetter. *Perspectives in life cycle impact assessment: a structured approach to combine models of the technosphere, ecosphere, and valuesphere*. Springer, 1998.
- [13] PE INTERNATIONAL. *GaBi Paper Clip Tutorial Part 1 - Introduction to LCA and modelling using GaBi*. PE INTERNATIONAL, Hauptstraße 111-115, 70771 Leinfelden-Echterdingen, Germany, Novembro 2011.
- [14] PE International. Description of the cml 2001 method. <http://database-documentation.gabi-software.com/spain/support/gabi/gabi-lcia-documentation/cml-2001/>, February 2014.
- [15] PE International. Description of the eco-indicator 99 method. <http://www.gabi-software.com/support/gabi/gabi-lcia-documentation/eco-indicator-99/>, February 2014.
- [16] PE International. Description of the ilcd recommendation. <http://www.gabi-software.com/support/gabi/gabi-lcia-documentation/ilcd-recommendation/>, February 2014.
- [17] PE International. Description of the traci method. <http://www.gabi-software.com/spain/support/gabi/gabi-5-lcia-documentation/life-cycle-impact-assessment-lcia-methods/traci/>, February 2014.
- [18] Pe International. Recipe. <http://database-documentation.gabi-software.com/support/gabi/gabi-lcia-documentation/recipe/>, February 2014.
- [19] Ana Paula Martinho. Análise de ciclo de vida de produtos ou serviços. [http://w3.ualg.pt/~lnunes/Textosdeapoio/Disciplinas/Gestao\\_Aud/GAA6.pdf](http://w3.ualg.pt/~lnunes/Textosdeapoio/Disciplinas/Gestao_Aud/GAA6.pdf), February 2014.
- [20] ReCiPe. Characterisation. <http://www.lcia-recipe.net/characterisation-and-normalisation-factors>, February 2014.

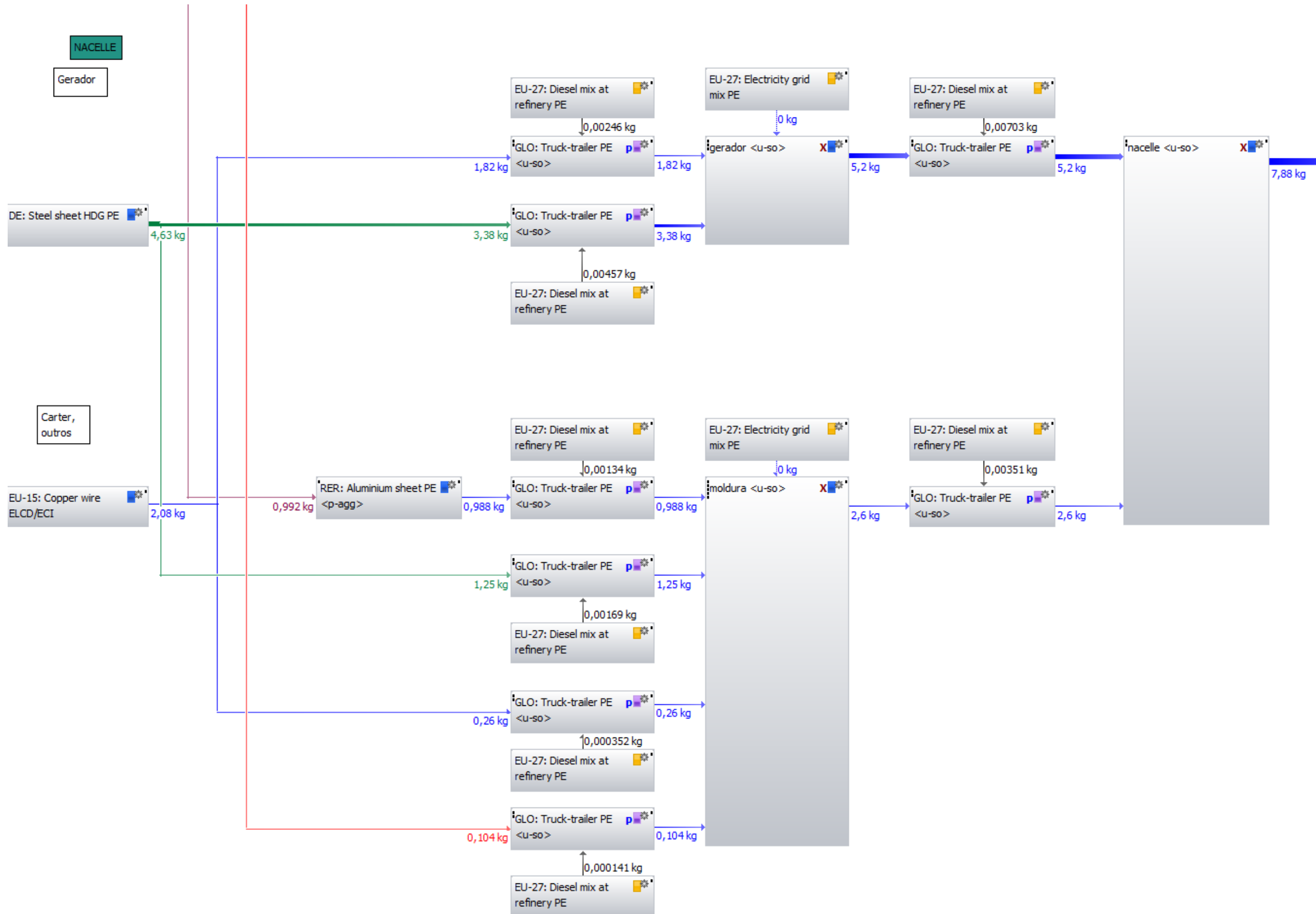
- [21] ReCiPe. Normalisation. <http://www.lcia-recipe.net/normalisation>, February 2014.
- [22] UNEP. Design for sustainability: a practical approach for developing economies. <http://www.d4s-de.org/>, December 2013.

# Anexos

A1 – Modelação rotor de um aerogerador

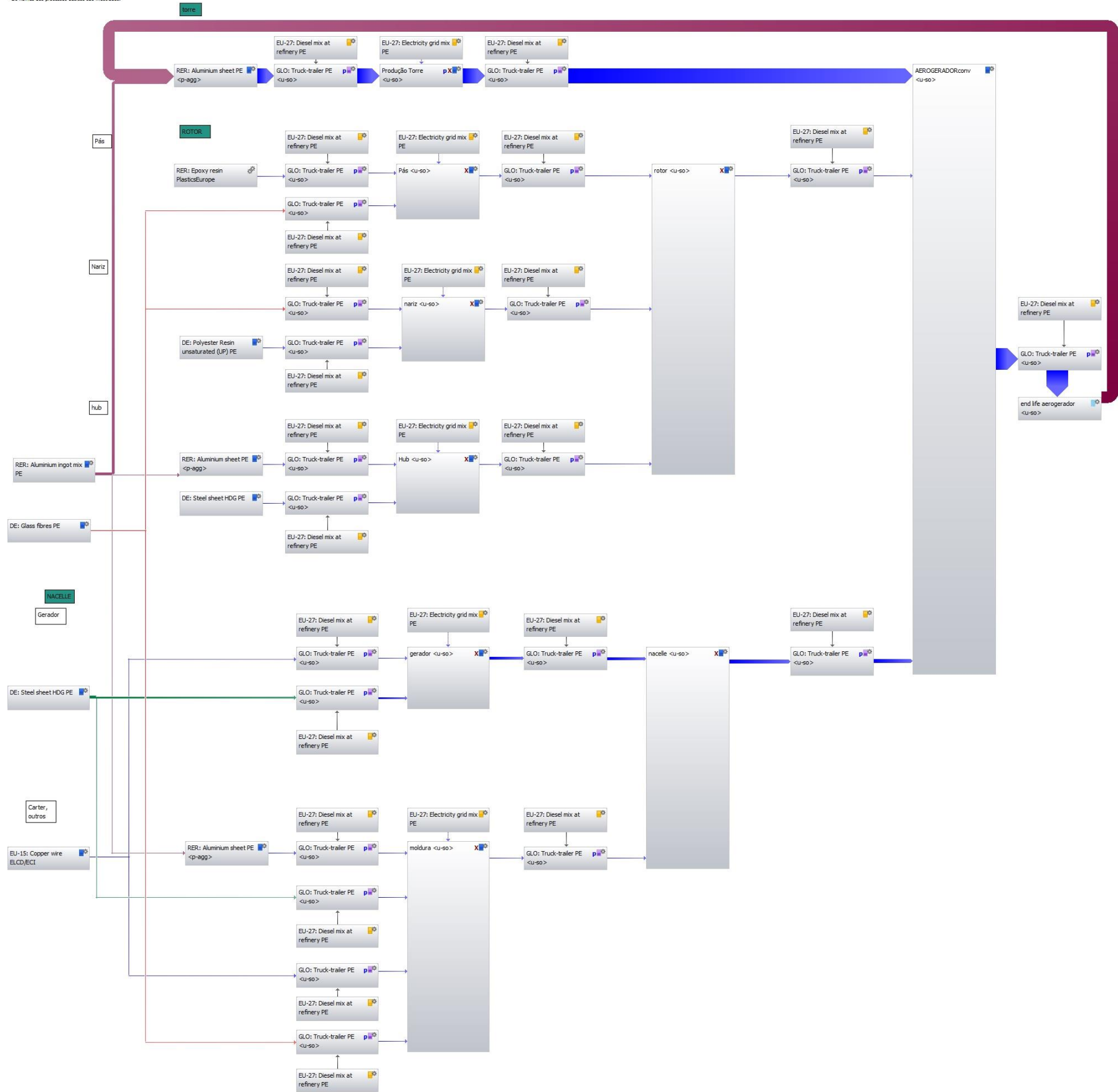


A2 – Modelação da nacelle de um aerogerador



# A3 – Modelação de um aerogerador

v2 aerogerador convencional  
Plano de processo Galbi Mass [kg]  
Os nomes dos processos básicos são mostrados.



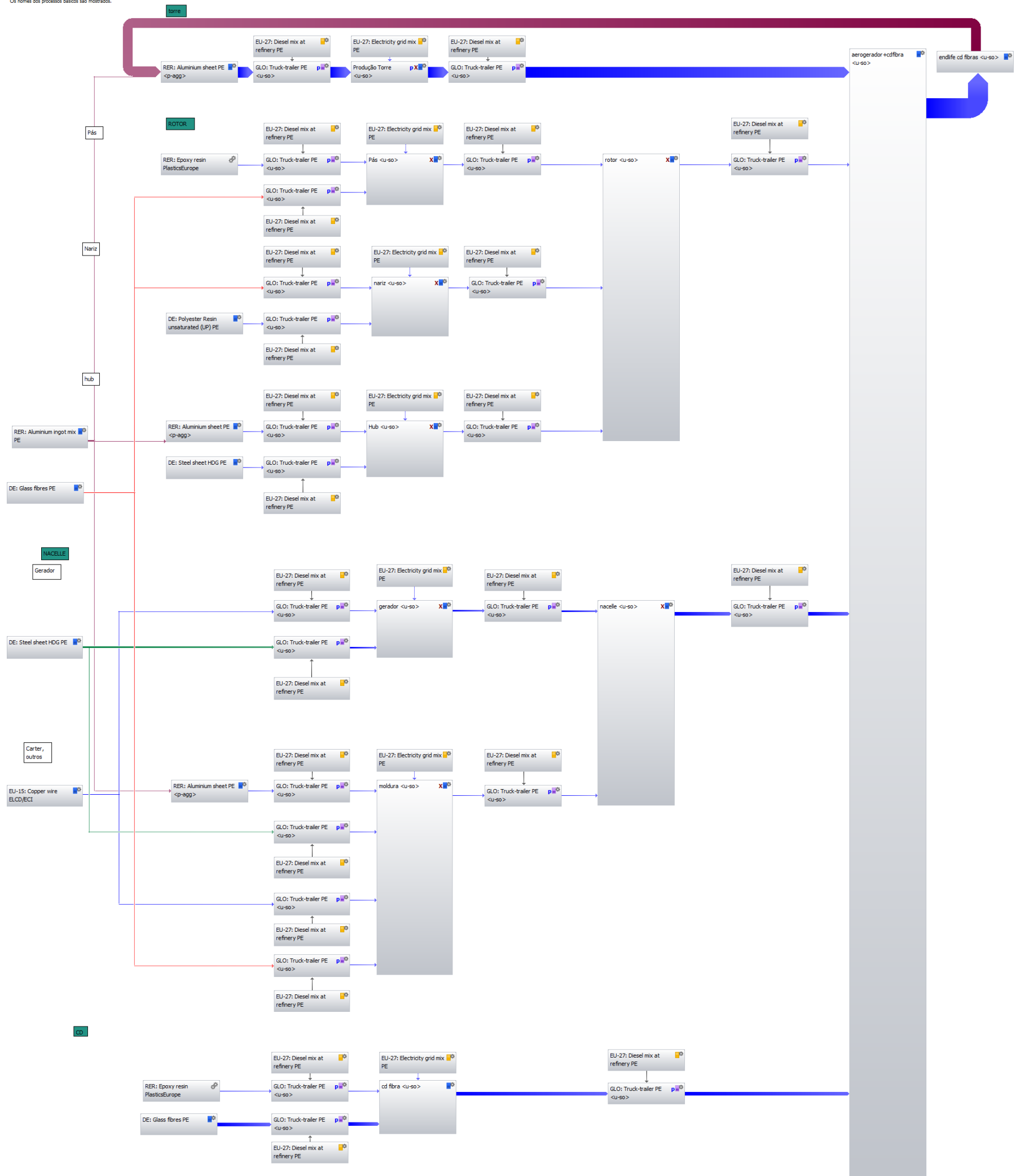
# A4 – Modelação de um aerogerador com o CD em alumínio

v2 aerogerador com CD aluminio  
Plano de processo Gabil: Hala [dg]  
Os nomes dos processos básicos são mostrados.



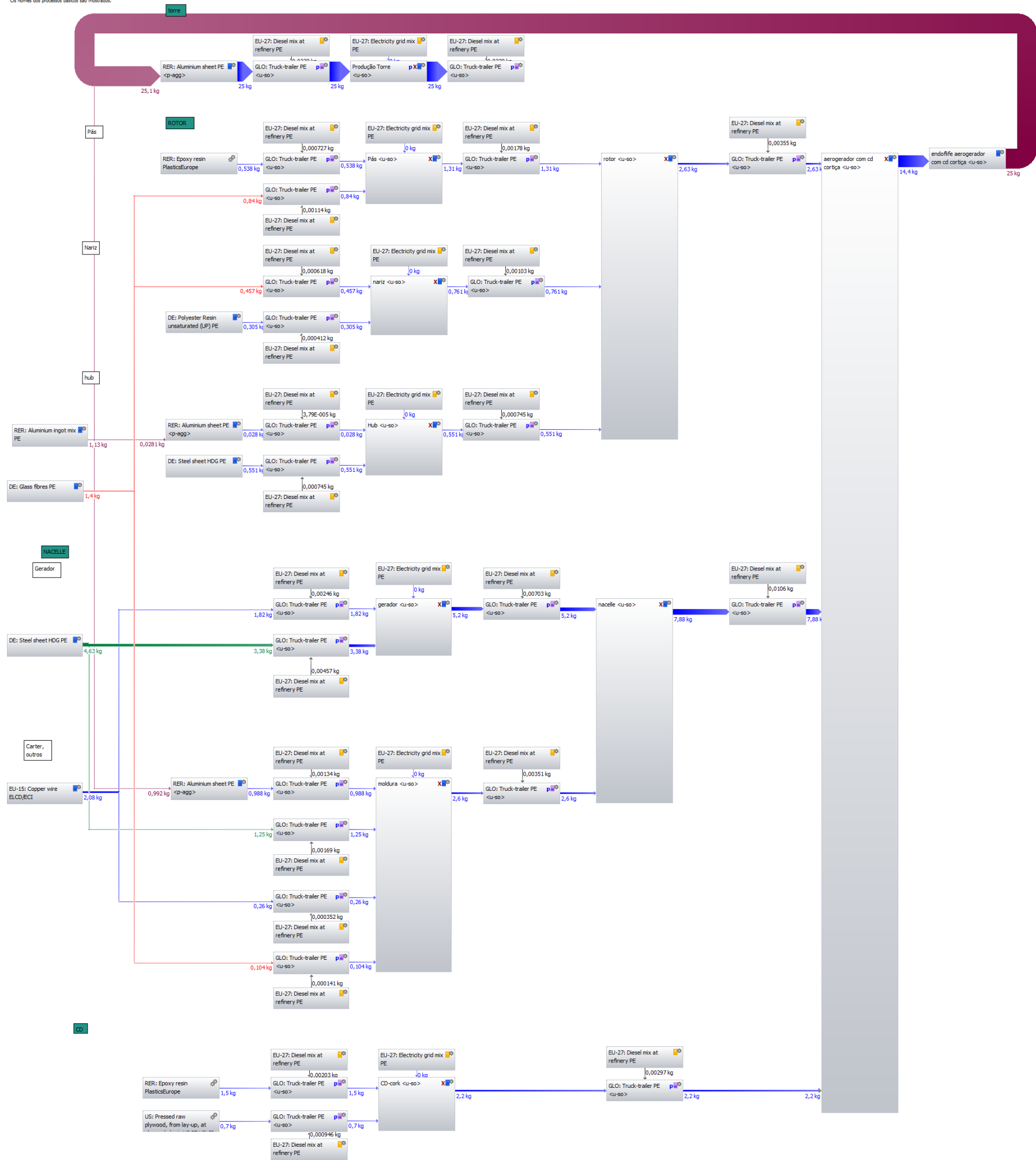
# A5 – Modelação de um aerogerador com CD em fibra de vidro e em resina

v2 aerogerador com CD fibra  
Plano de processo G&B: Mass [kg]  
Os nomes dos processos básicos são mostrados.



# A6 – Modelação de um aerogerador com o CD em cortiça e resina

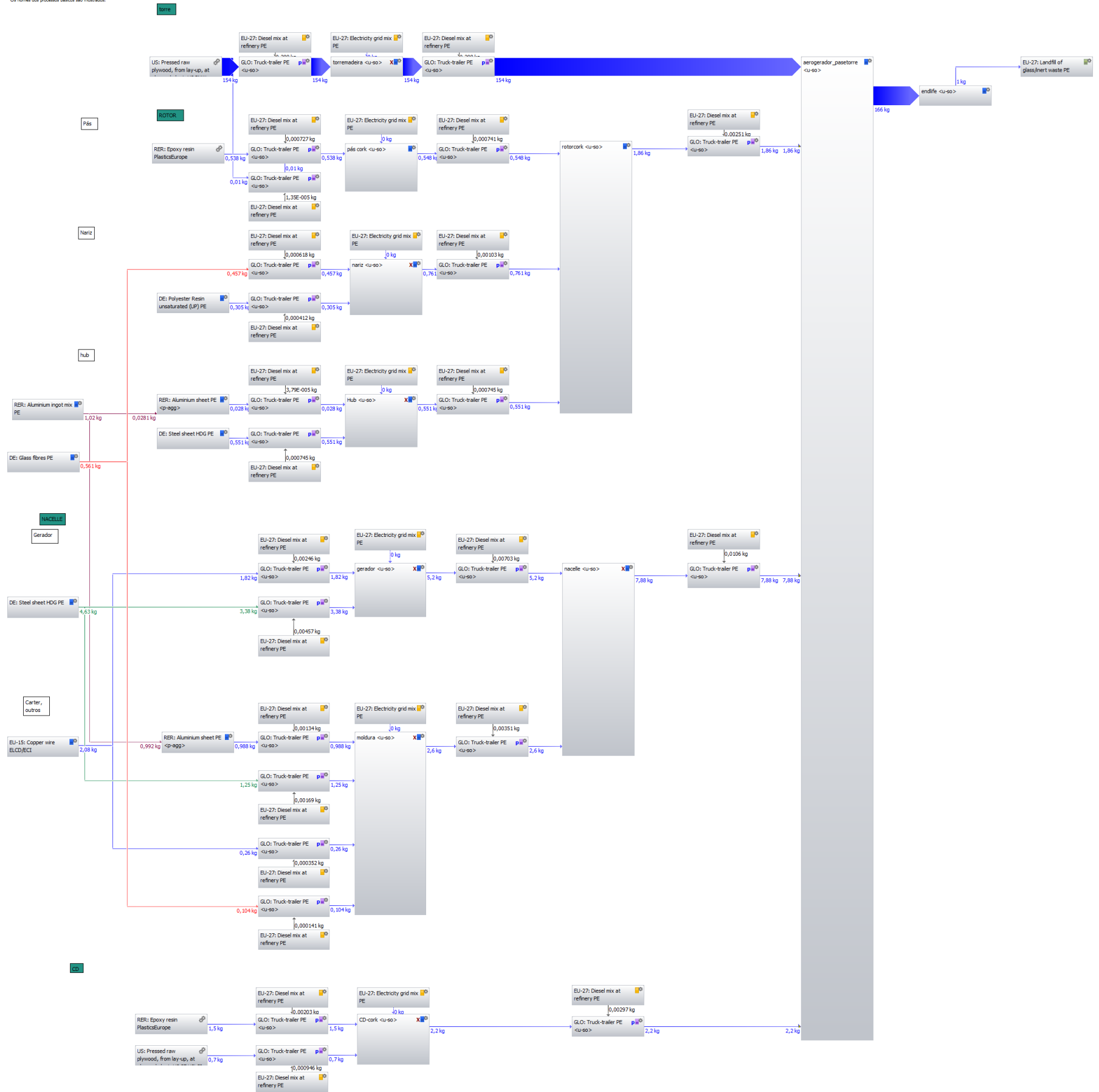
v2 aerogerador com CORK ()  
 Plano de processo Galis Mass [kg]  
 Os nomes dos processos básicos são mostrados.



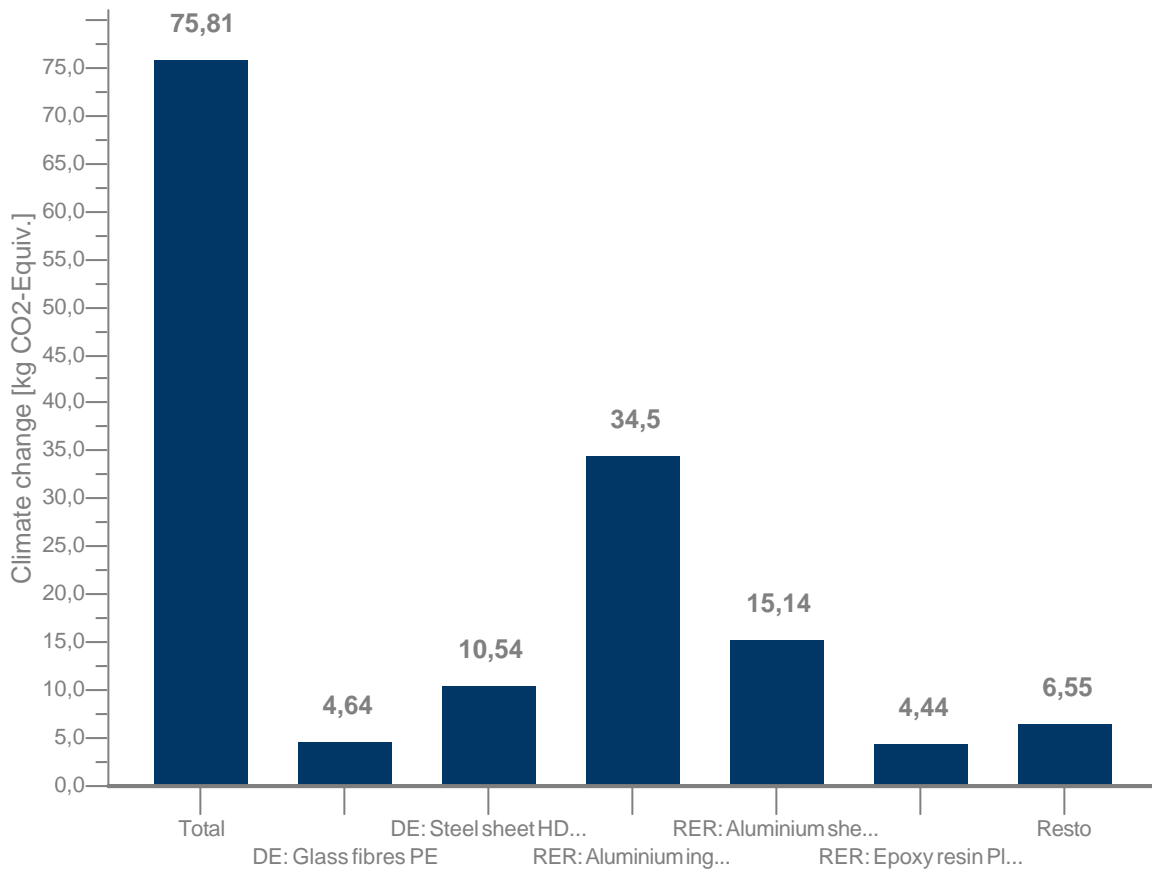
# A7 – Modelação de um aerogerador cm o CD e pás em cortiça e resina e da torre em madeira

v2 aerogerador com CORK pás e torre

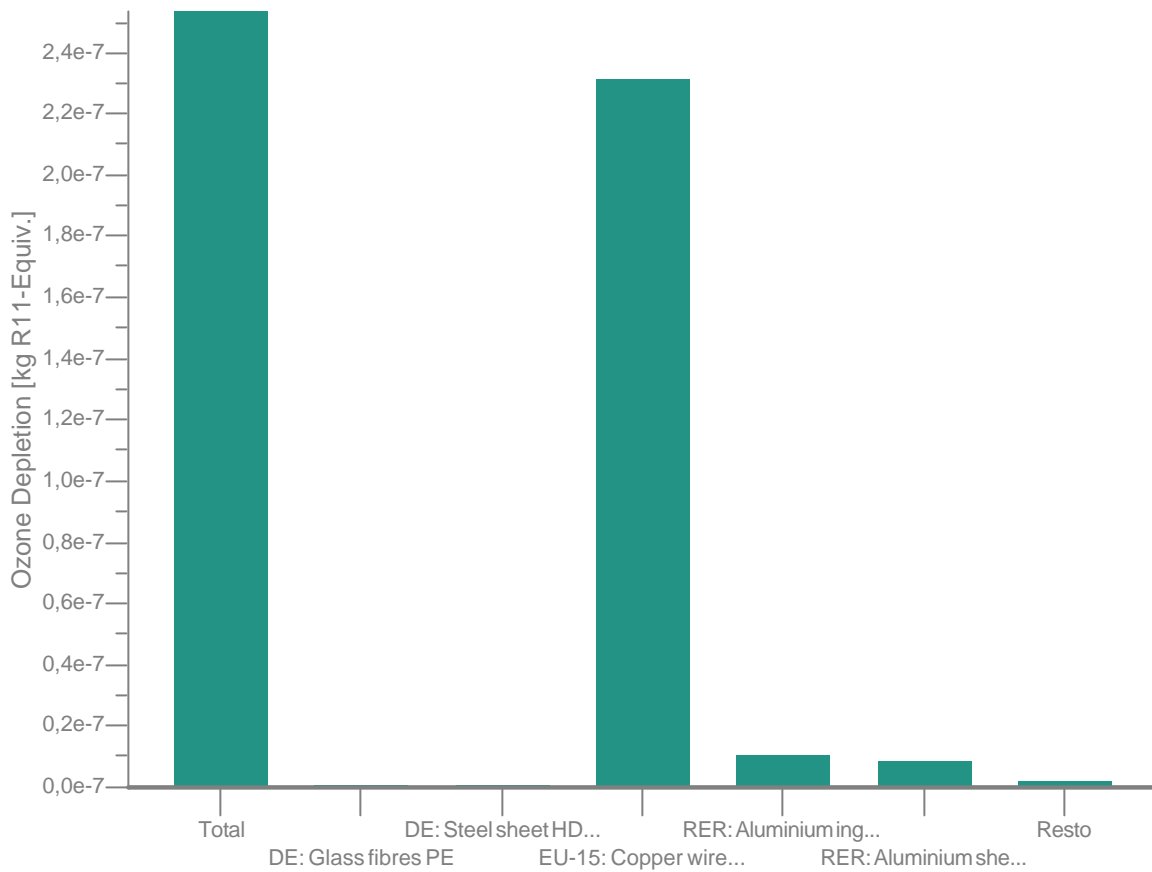
Fluxo de processo GGH: Mass [kg]  
Os nomes dos processos básicos são mostrados.



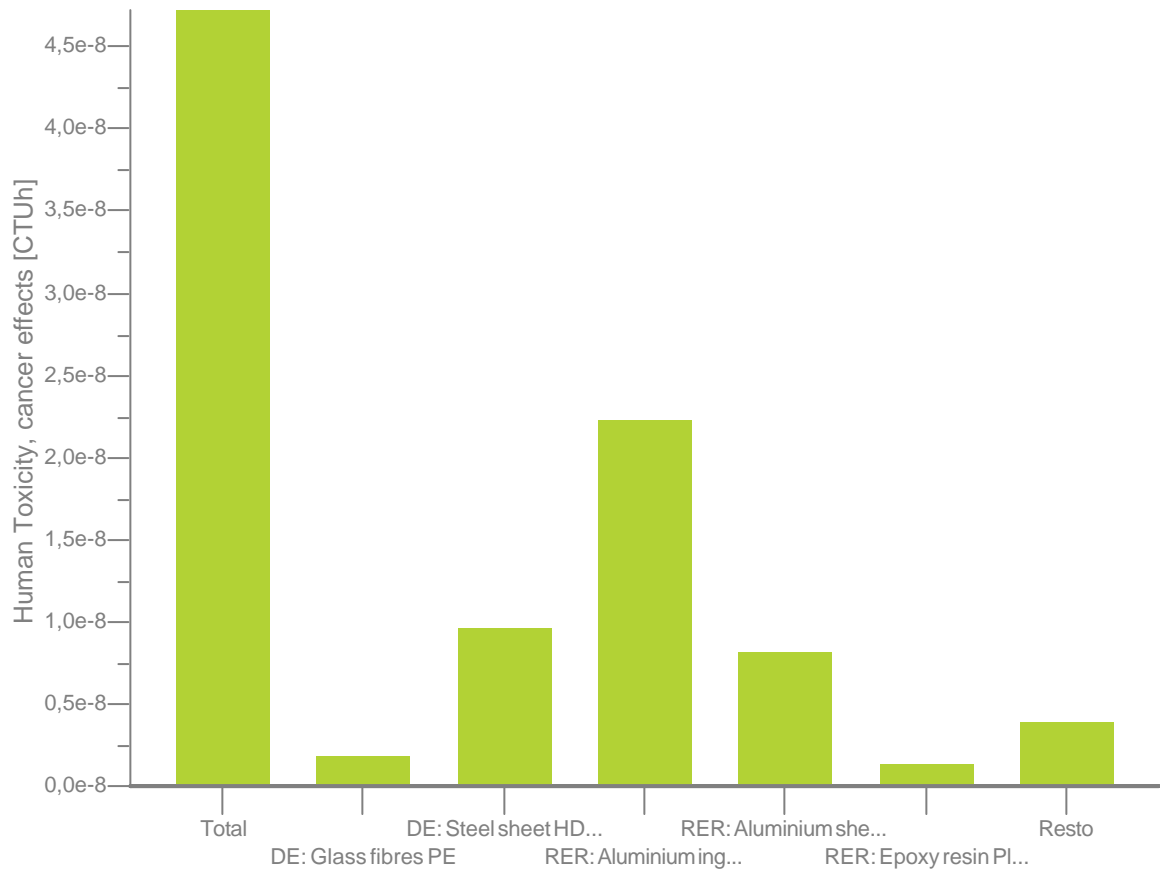
GWP



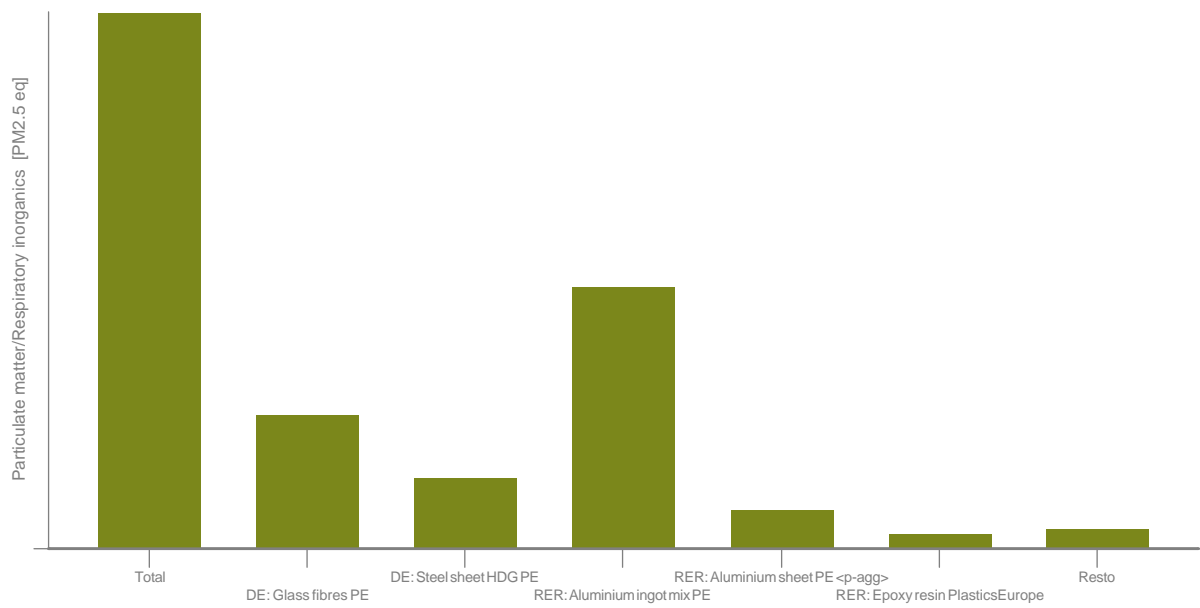
ODP, steady state



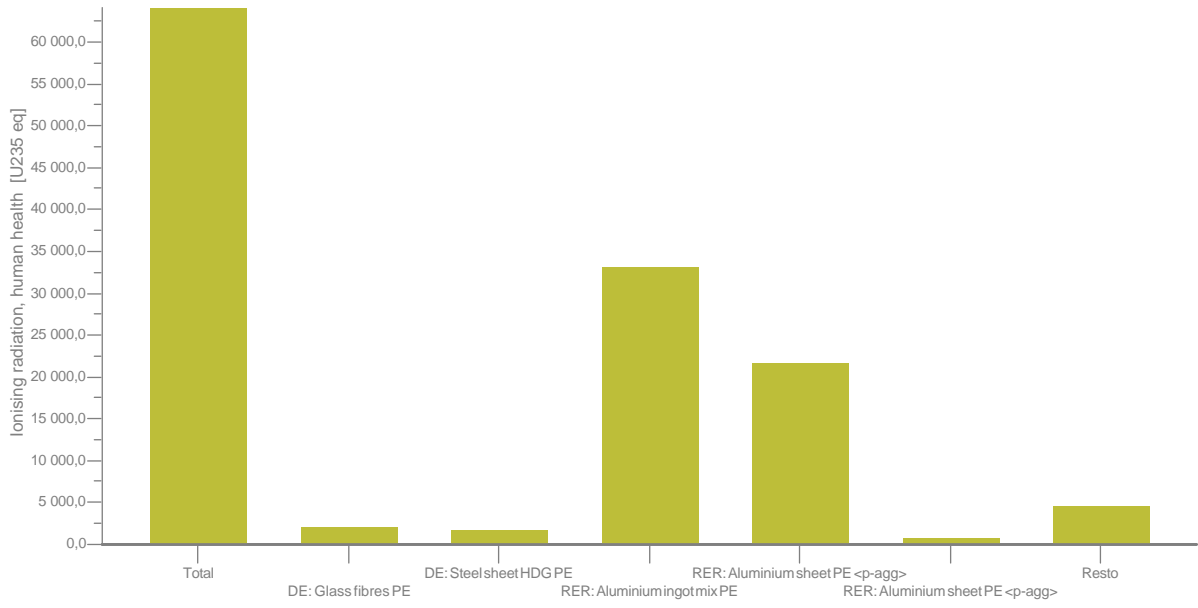
### Human tox (cancer)



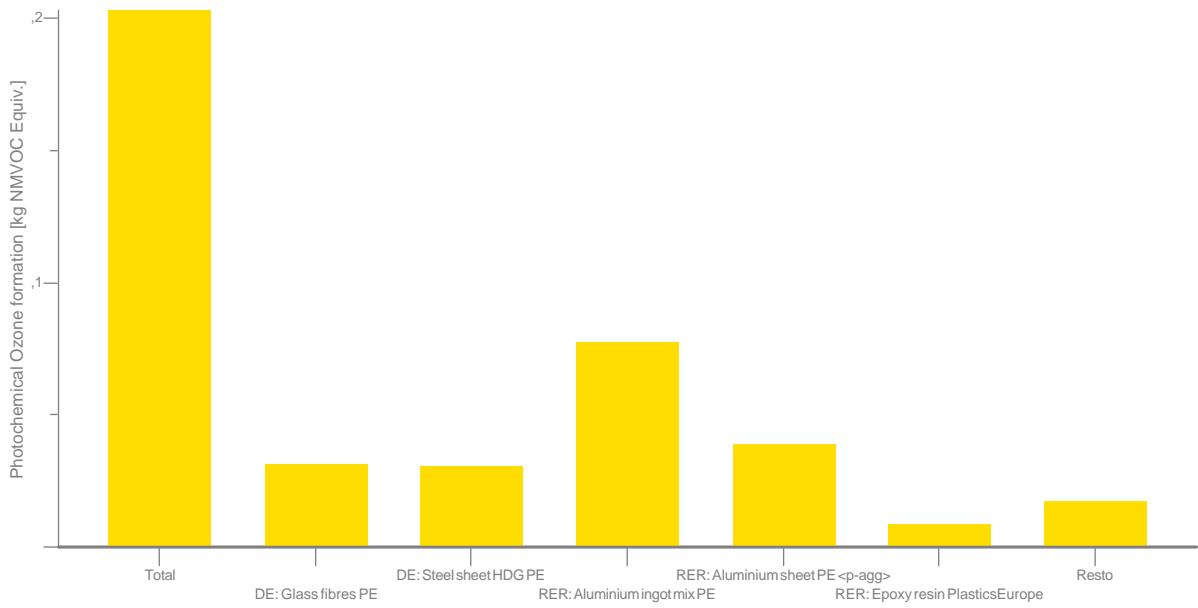
### Particular matter



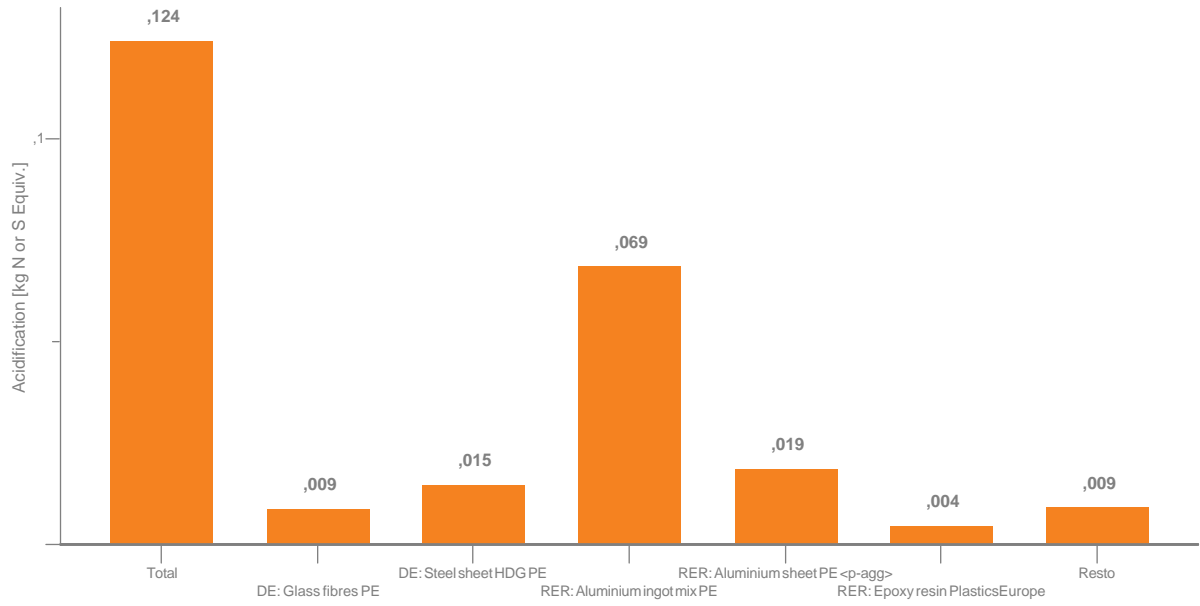
Ionising radiation



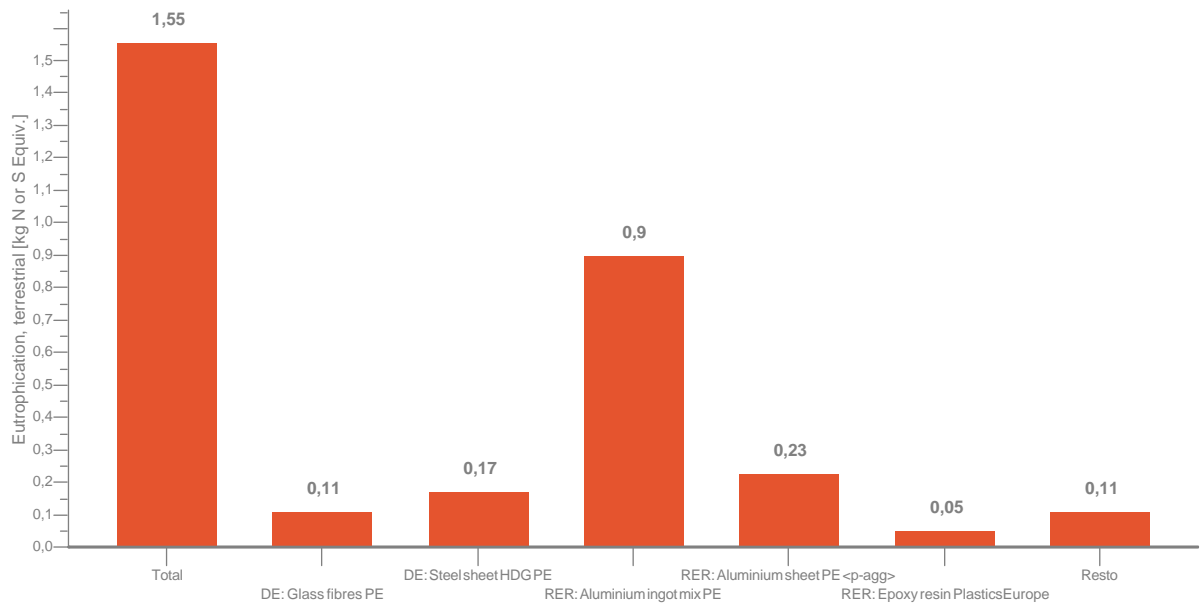
POCP



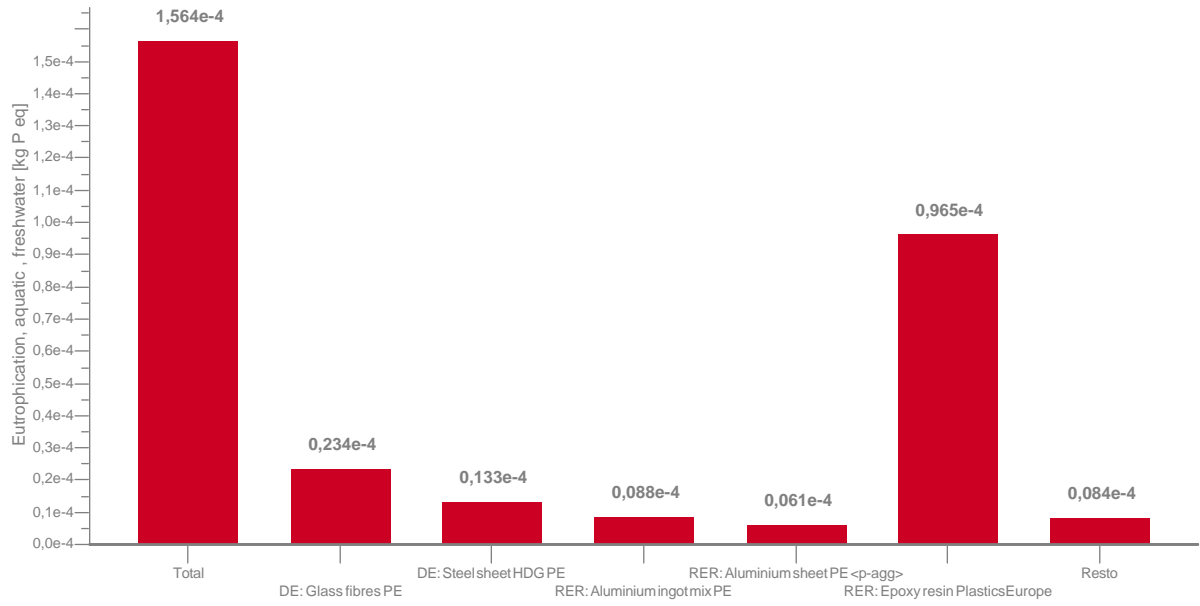
AP



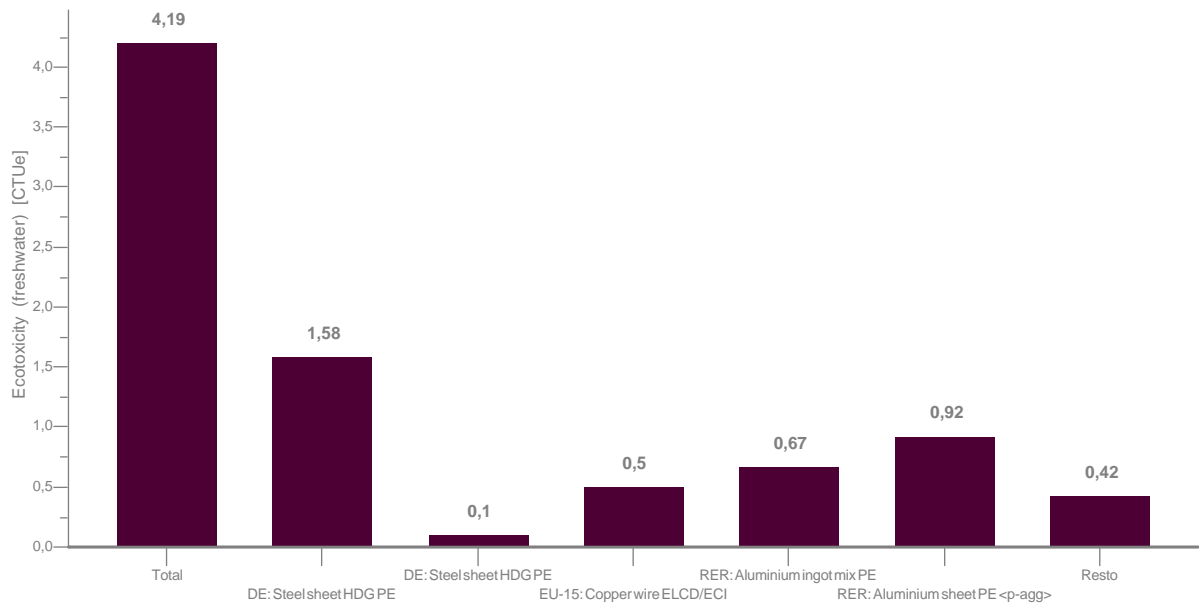
EP



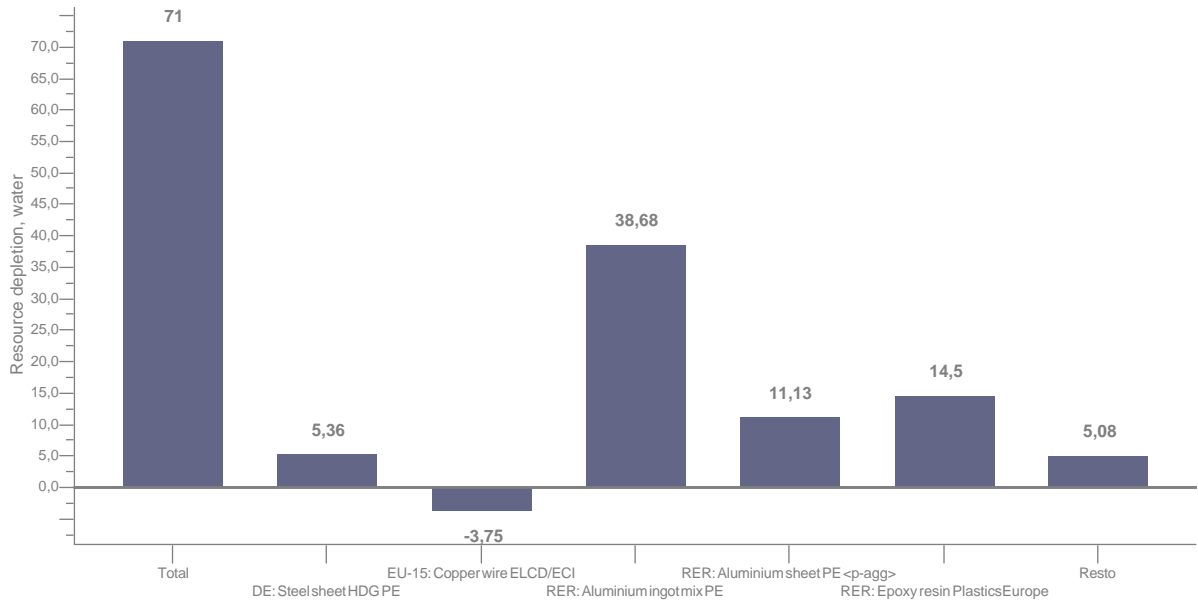
EP water



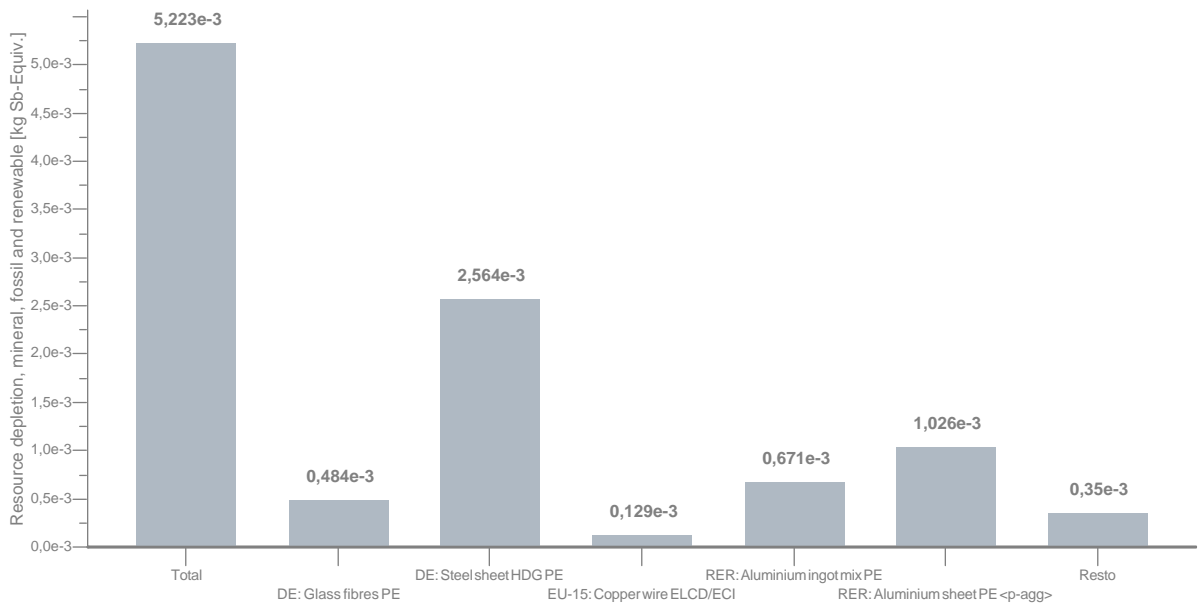
Eco tox



Water

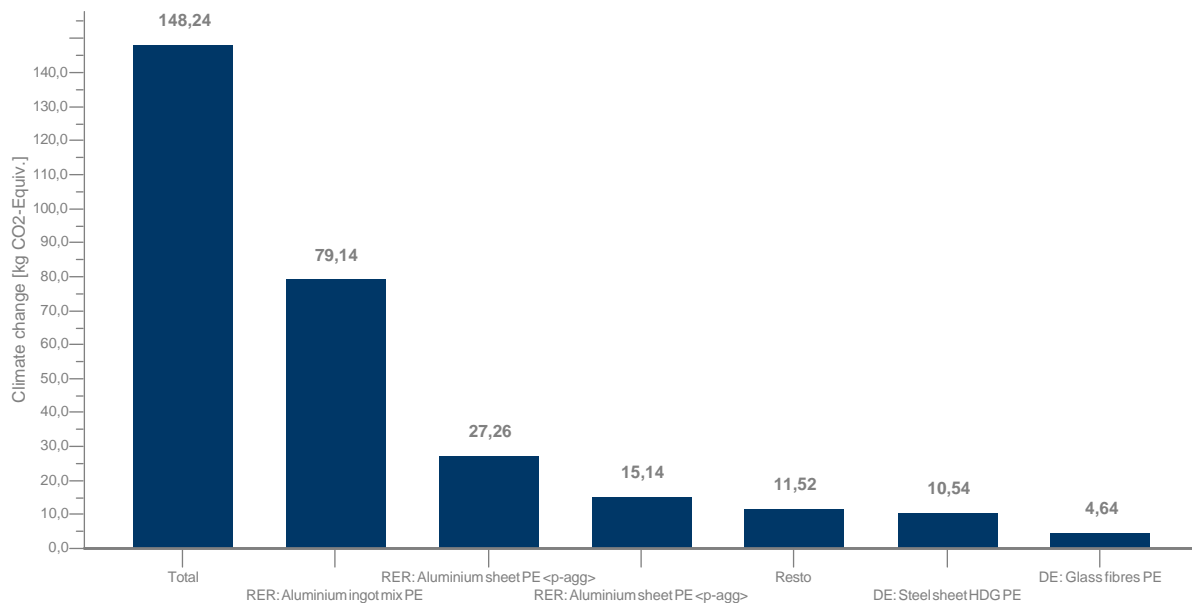


ADP elements+fossil

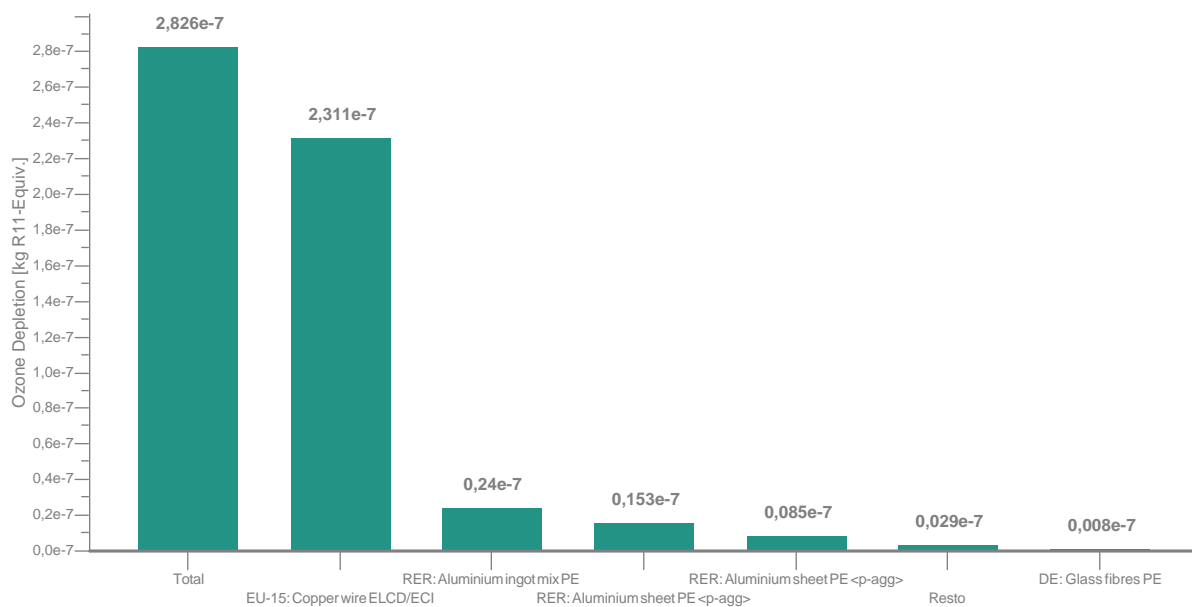


# Aerogerador com CD em Alumínio

## GWP

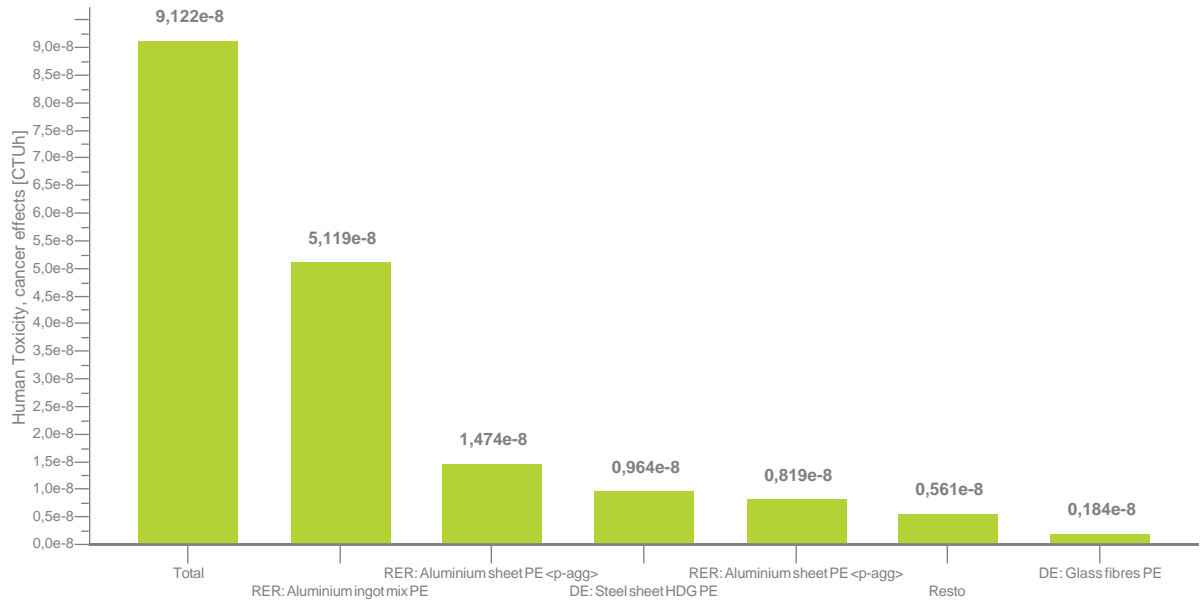


## ODP, steady state

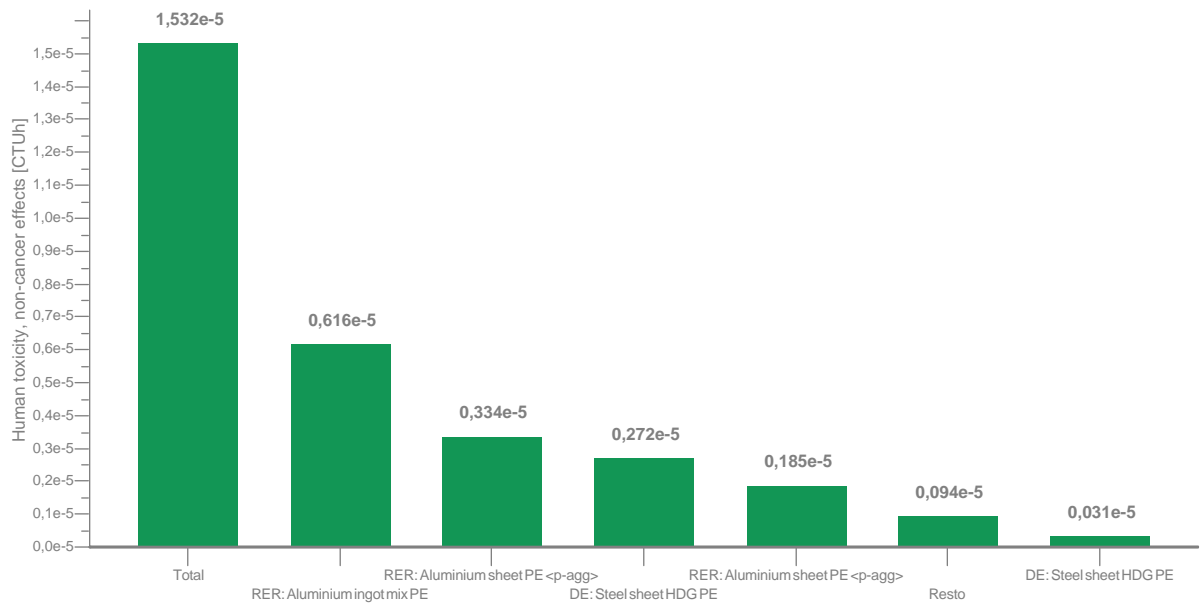


# Aerogerador com CD em Alumínio

## Human tox (cancer)

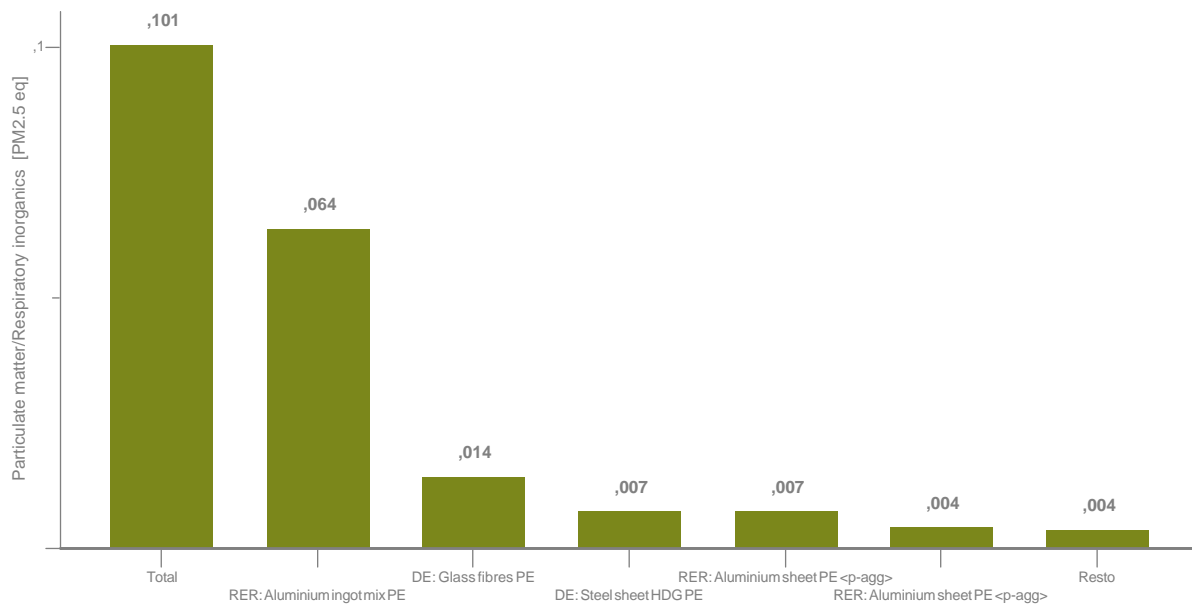


## Human tox (non cancer)

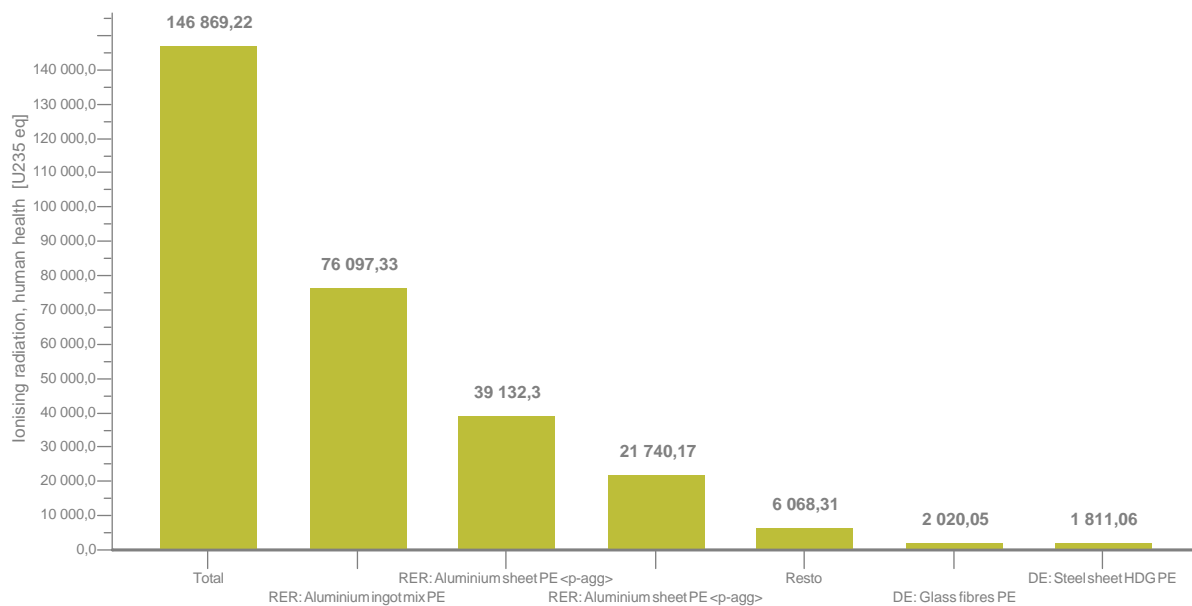


# Aerogelador com CD em Alumínio

## Particular matter

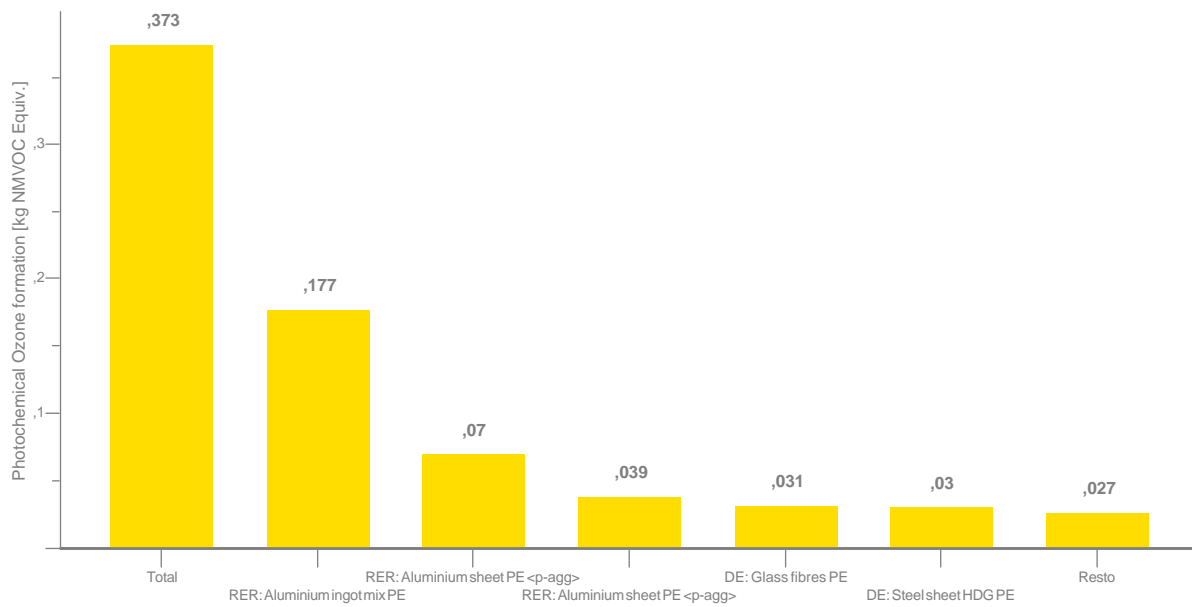


## Ionising radiation

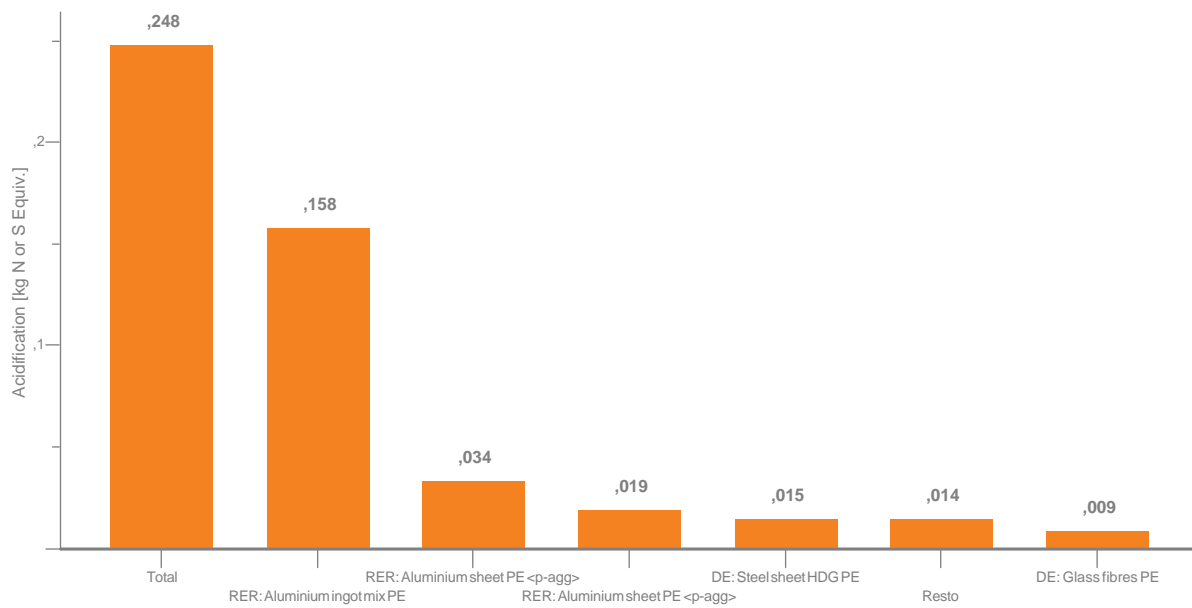


# Aerogrador com CD em Alumínio

## POCP

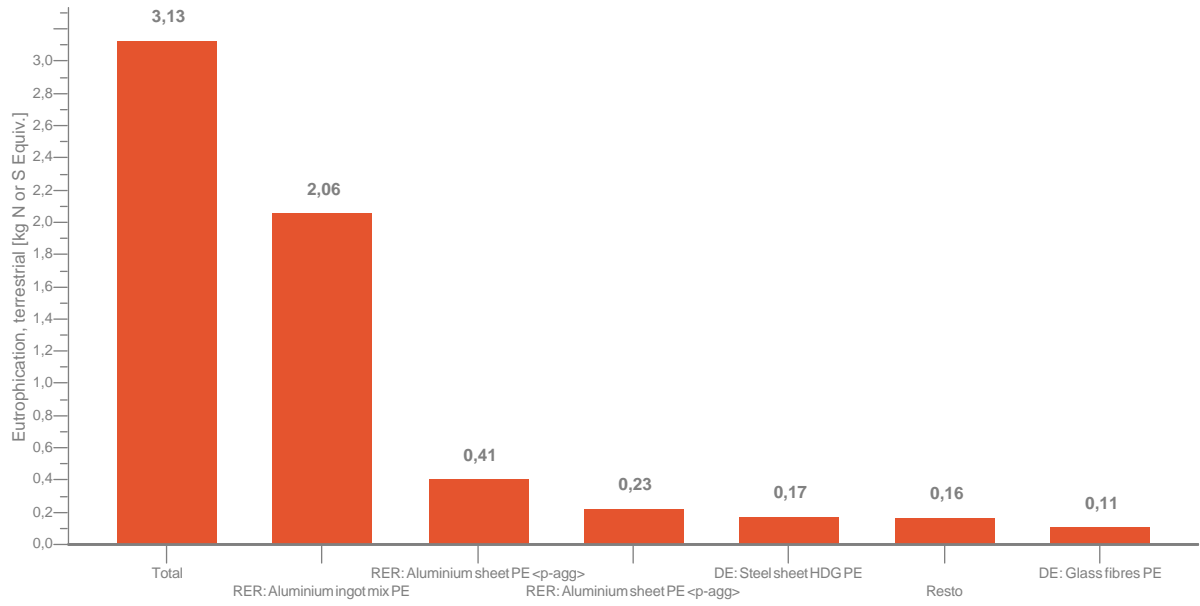


## AP

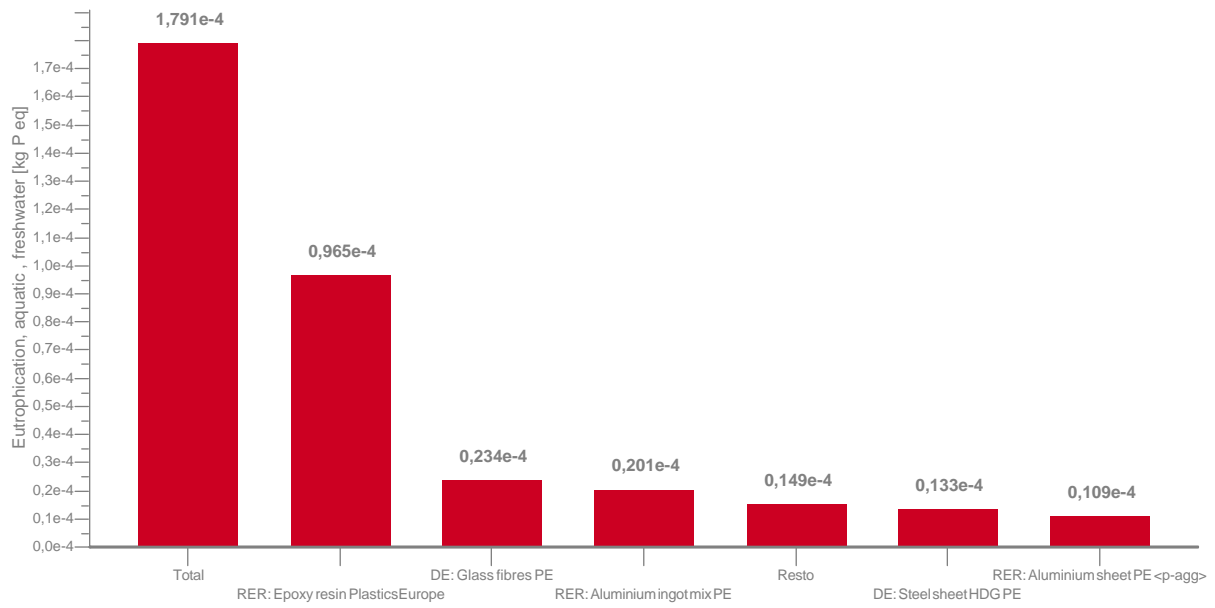


# Aerogerador com CD em Alumínio

## EP

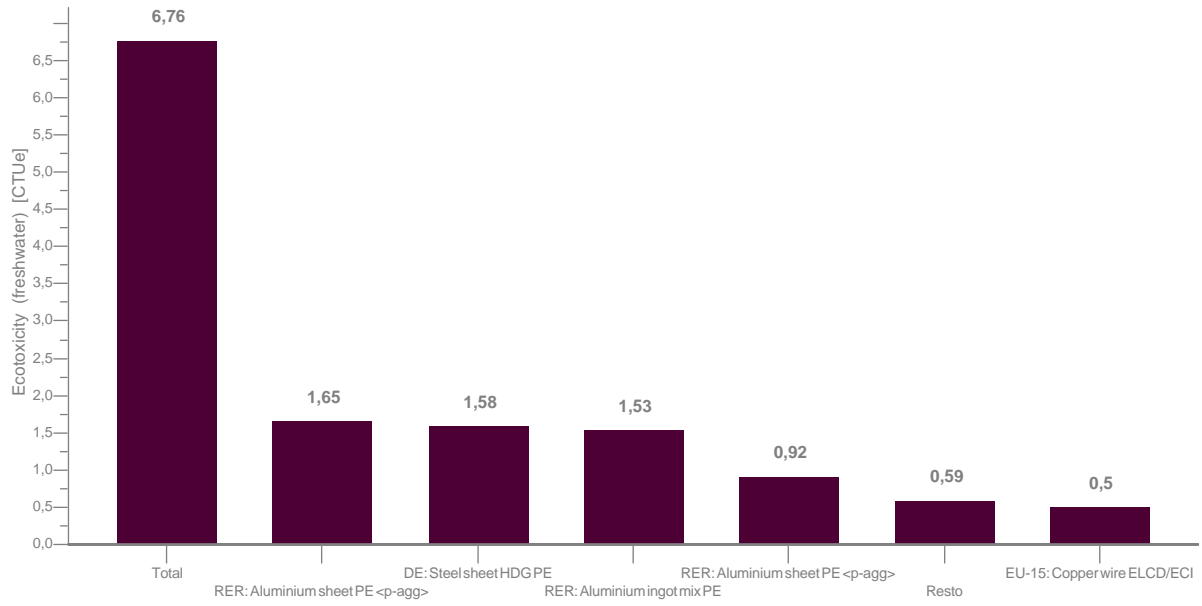


## EP water

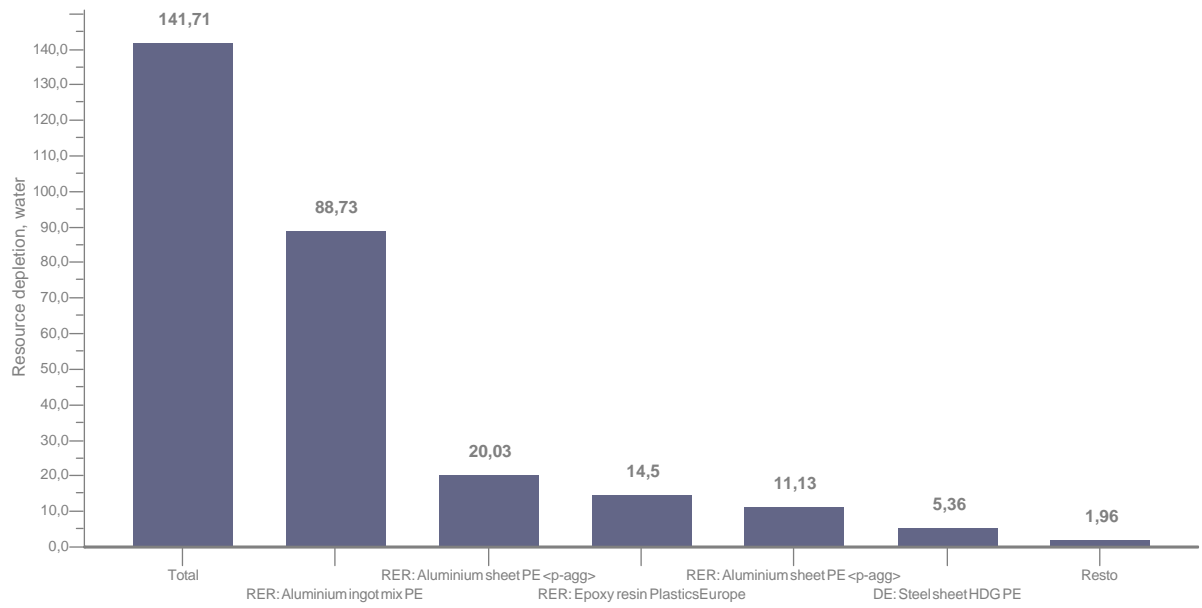


# Aerogerador com CD em Alumínio

## Eco tox

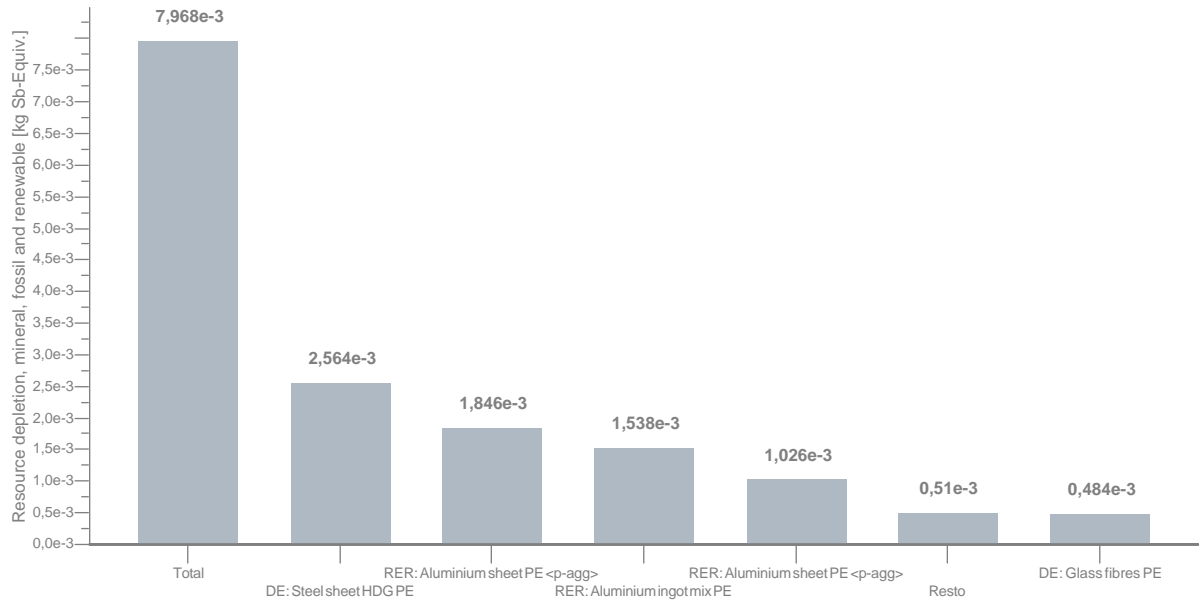


## Water



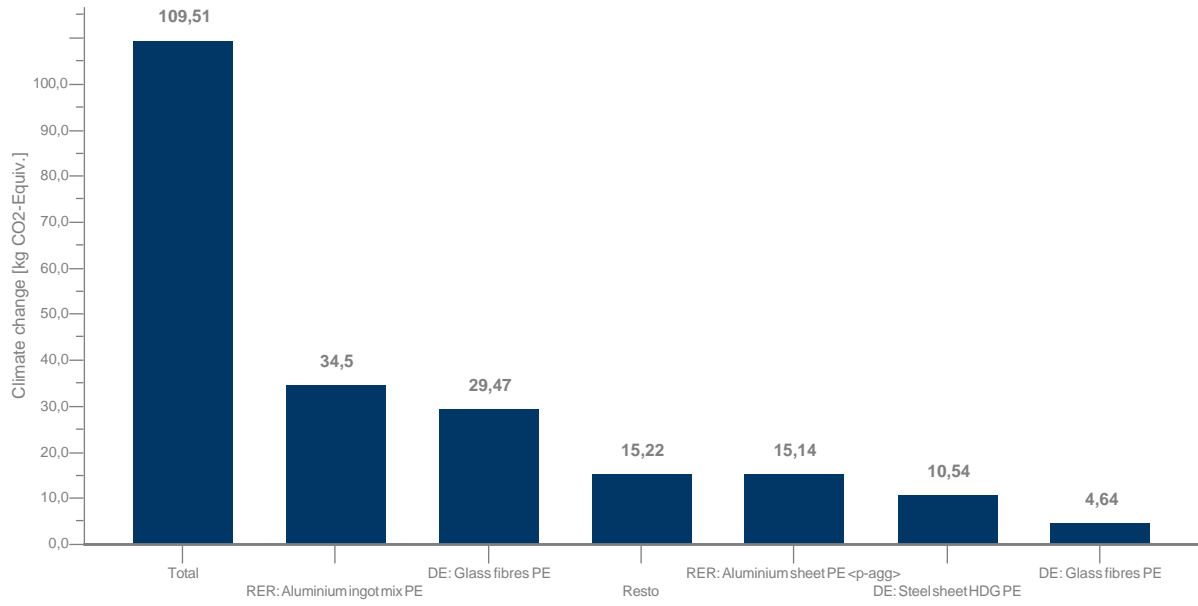
# Aerogador com CD em Alumínio

ADP elements+fossil

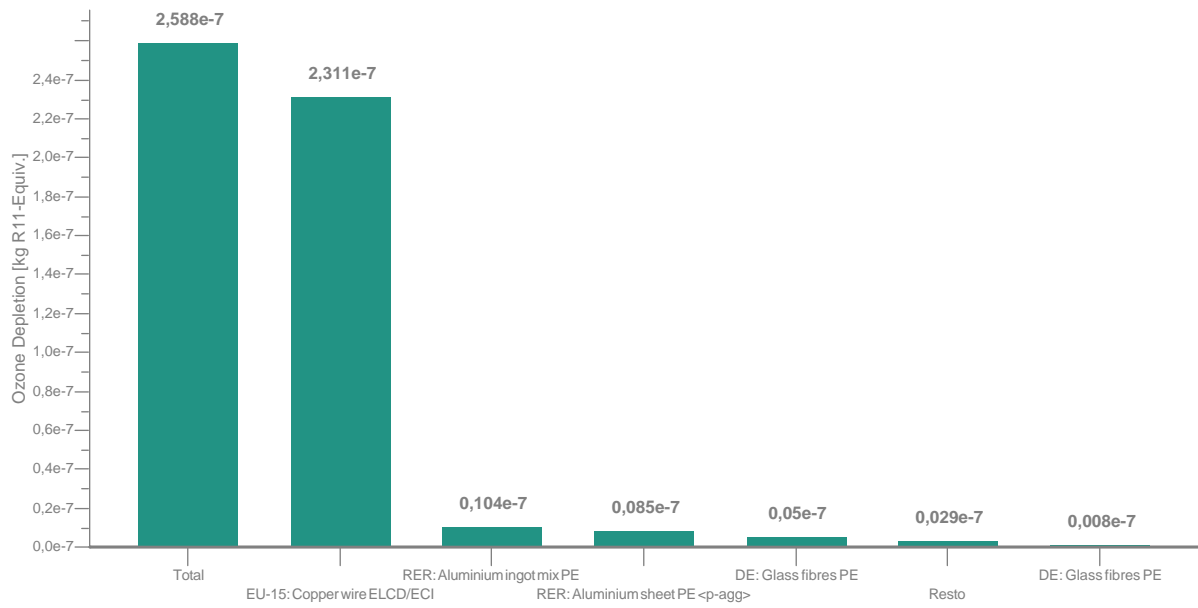


# Aerogerador com CD em fibra de vidro e em resina

## GWP

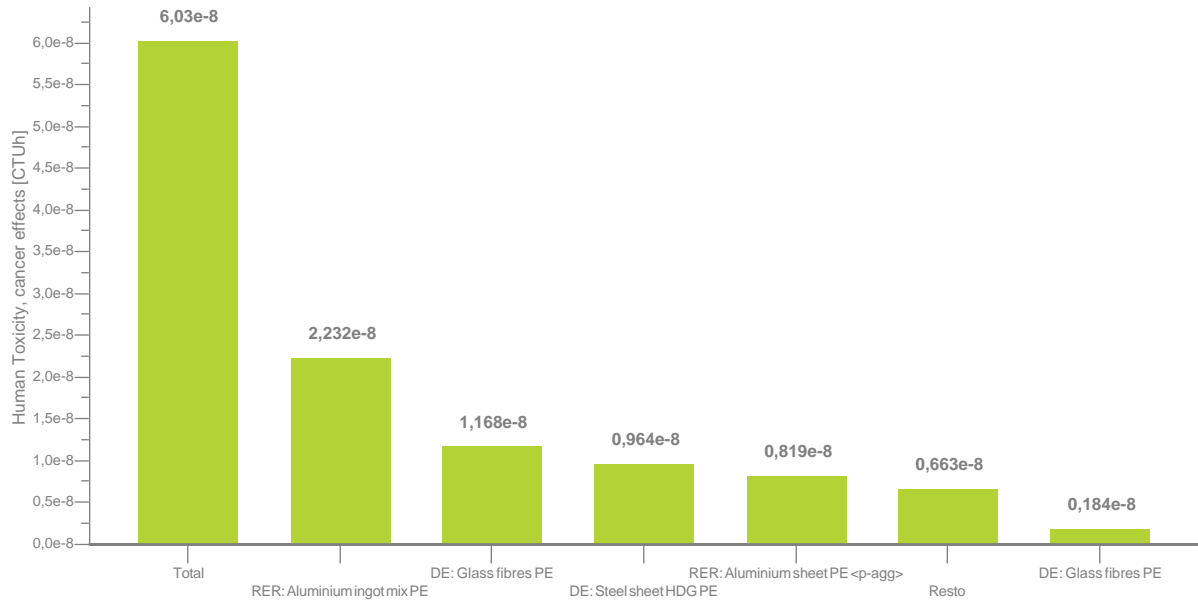


## ODP, steady state

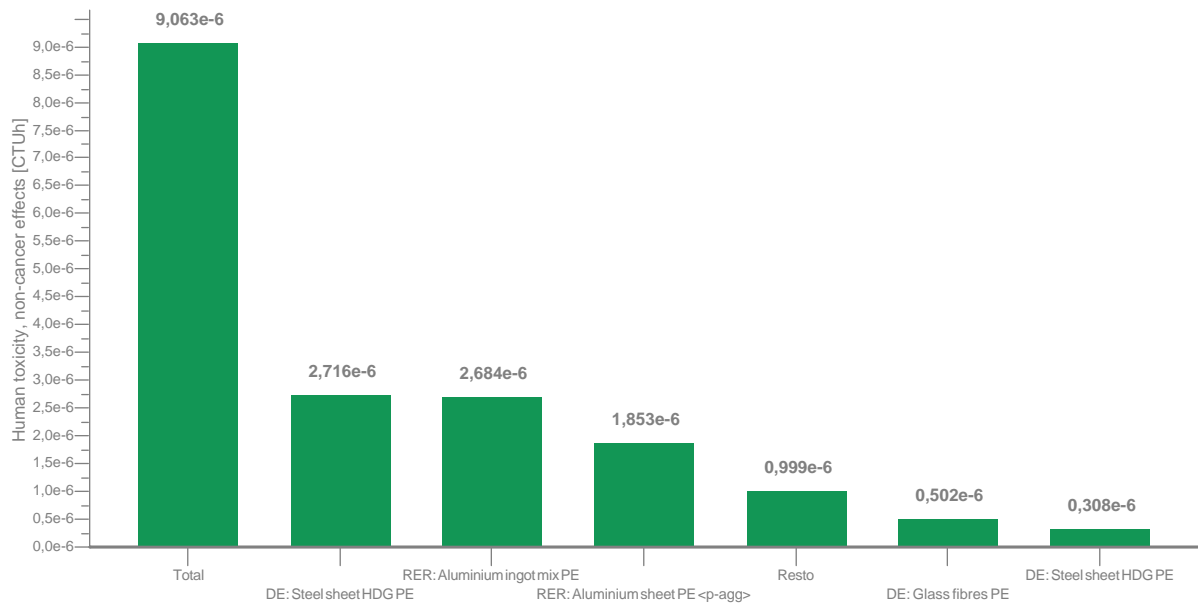


# Aerogerador com CD em fibra de vidro e em resina

## Human tox (cancer)

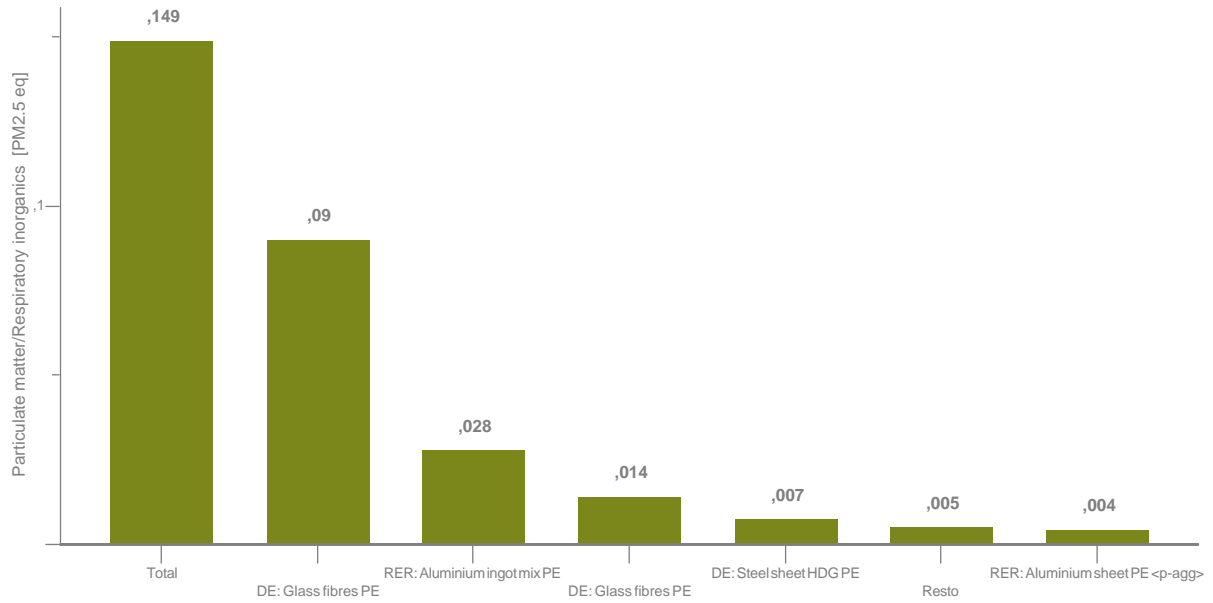


## Human tox (non cancer)

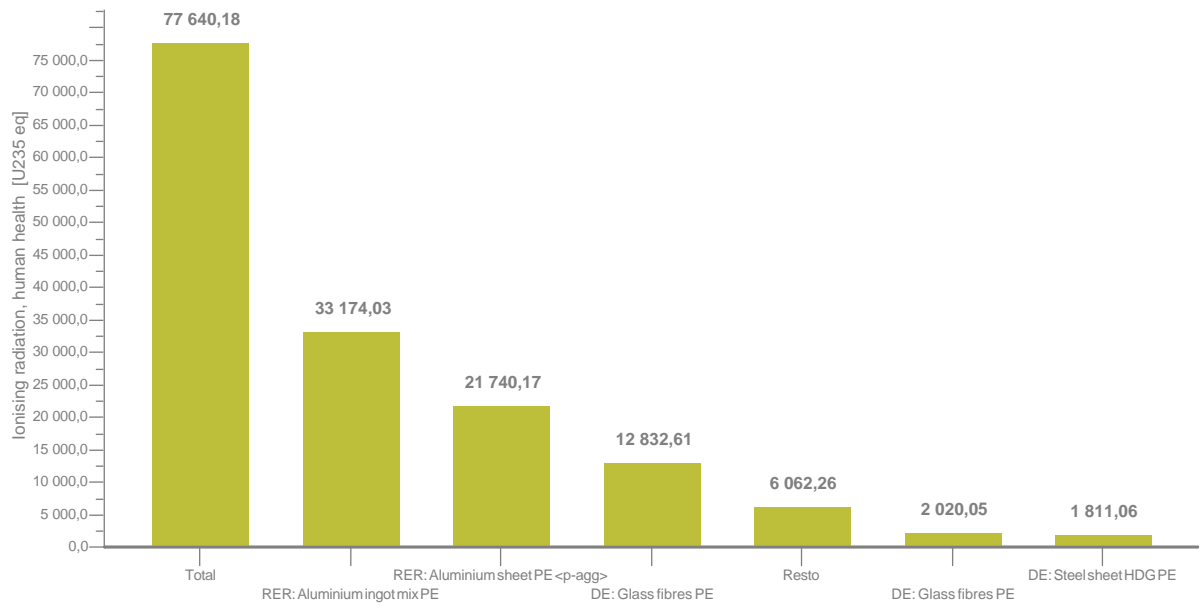


# Aerogerador com CD em fibra de vidro e em resina

## Particular matter

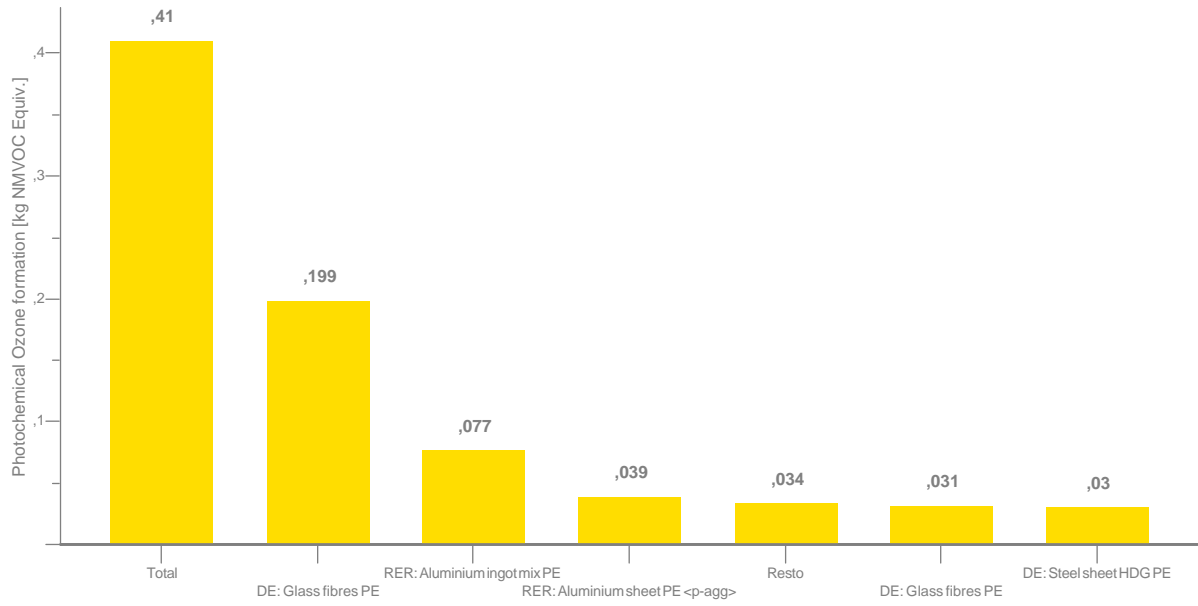


## Ionising radiation

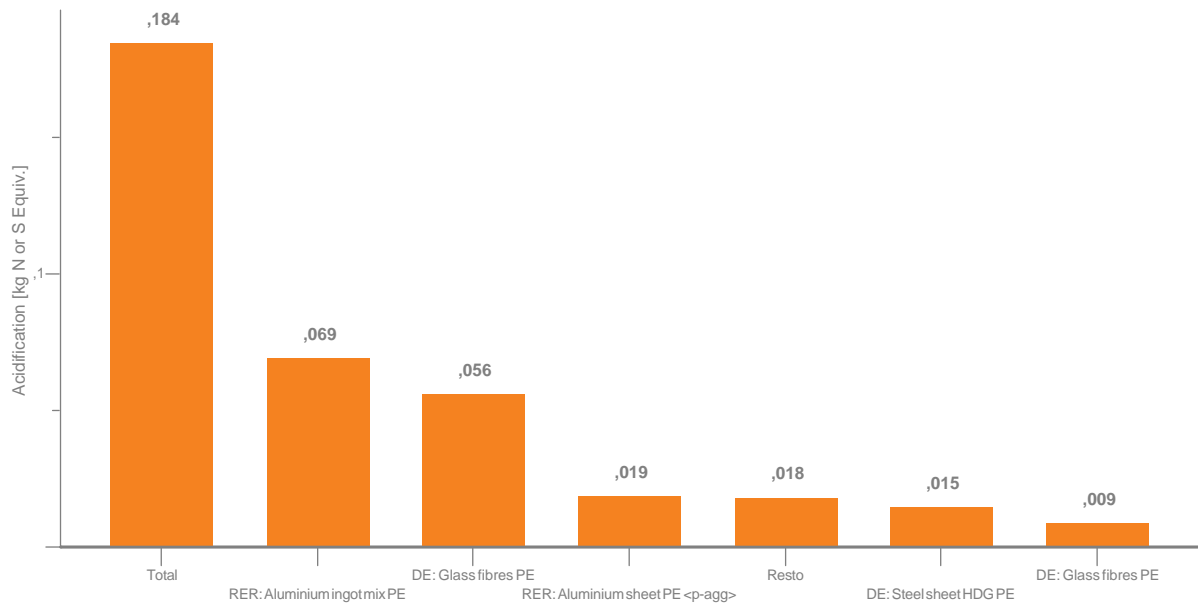


# Aerogerador com CD em fibra de vidro e em resina

## POCP

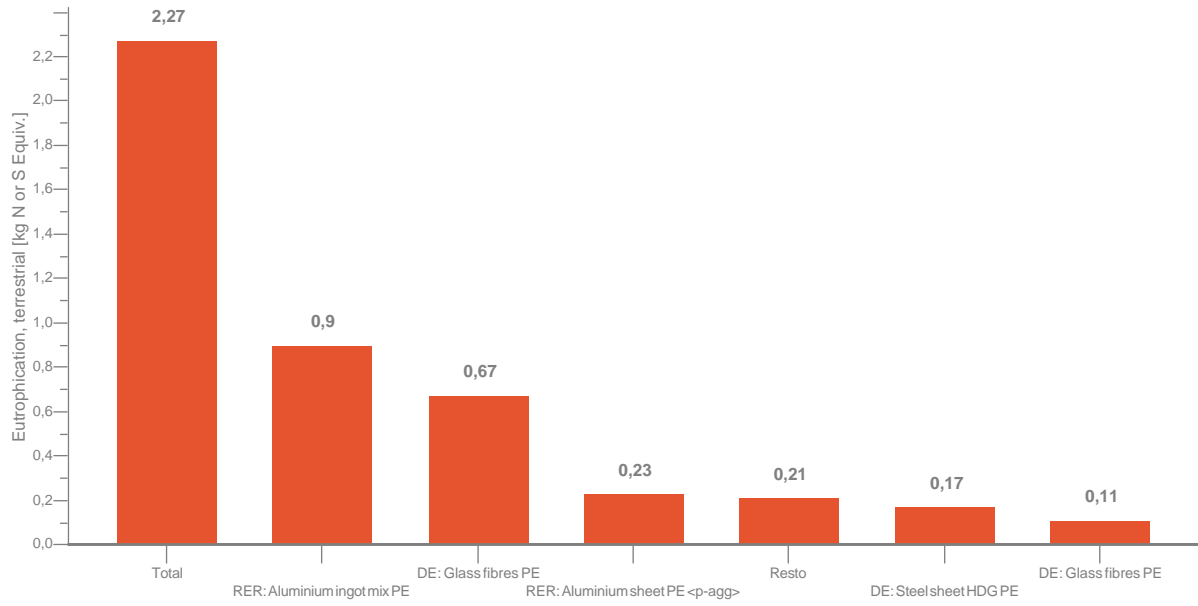


## AP

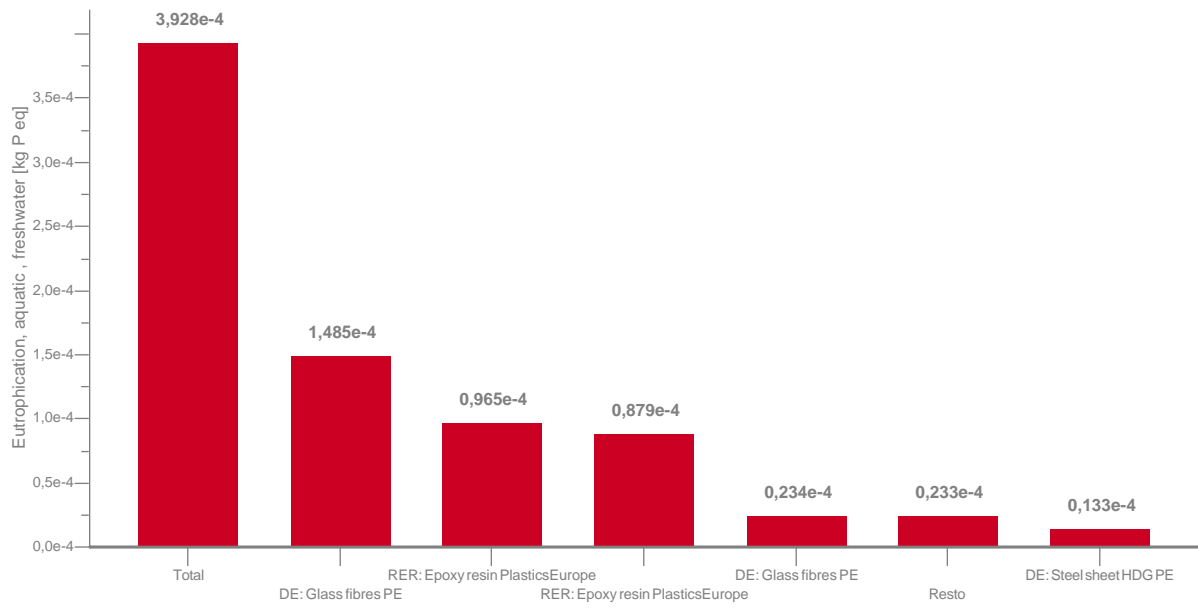


# Aerogerador com CD em fibra de vidro e em resina

## EP

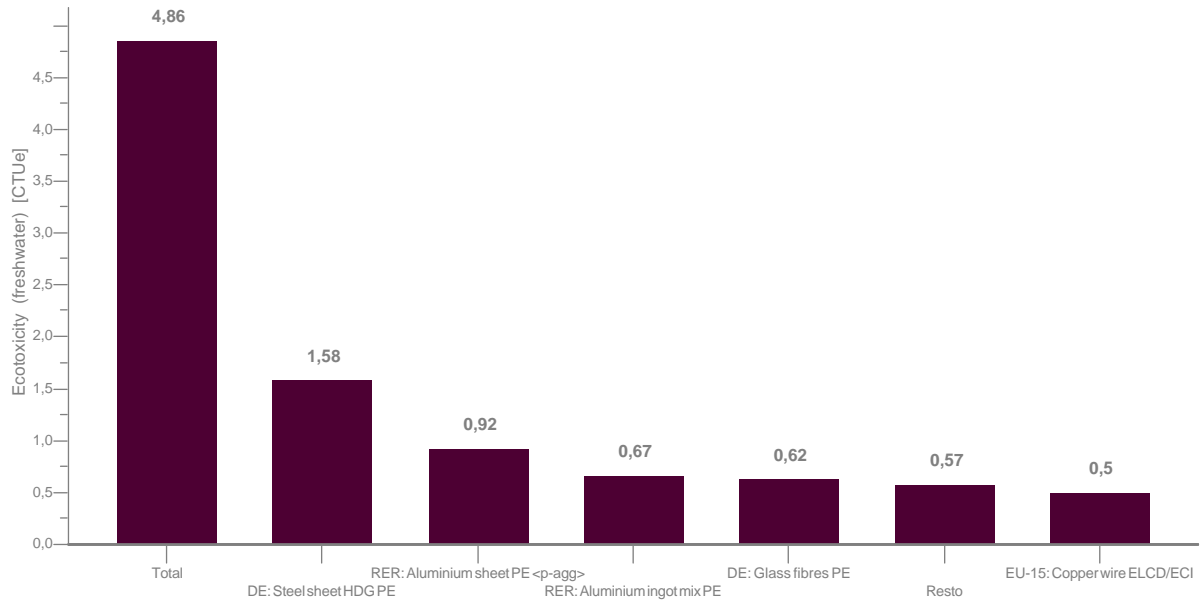


## EP water

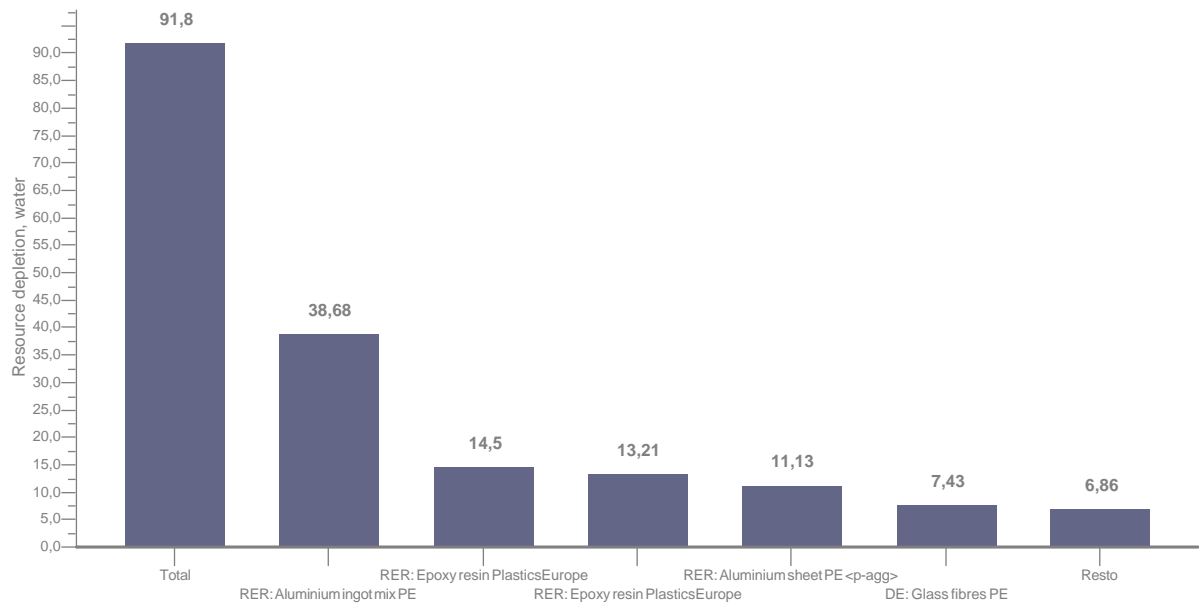


# Aerogerador com CD em fibra de vidro e em resina

## Eco tox

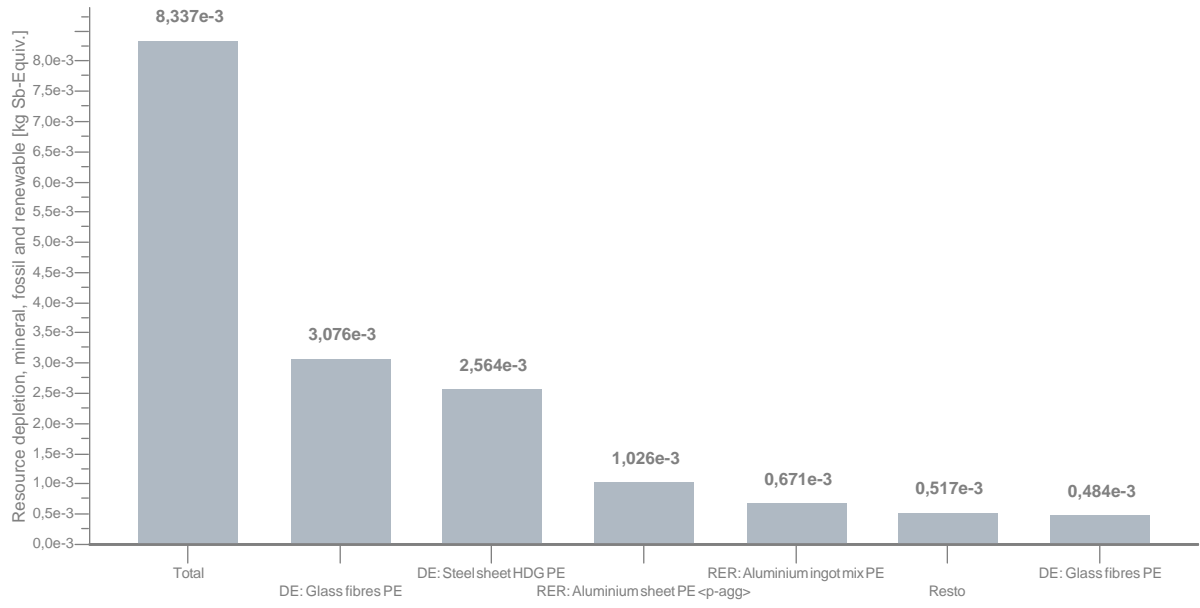


## Water



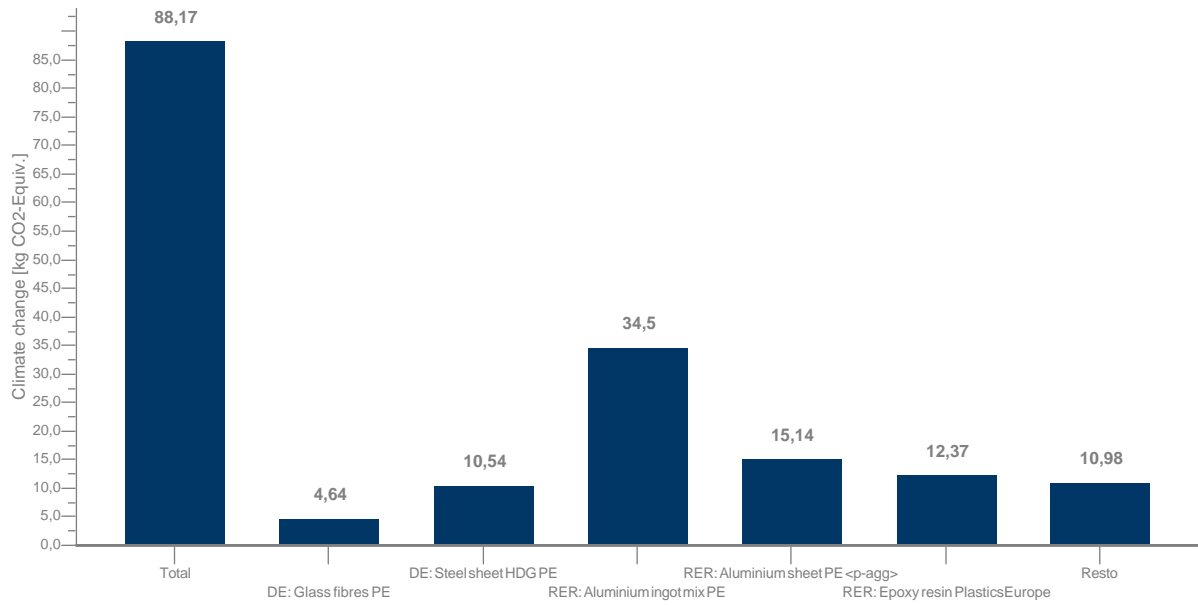
# Aerogerador com CD em fibra de vidro e em resina

ADP elements+fossil

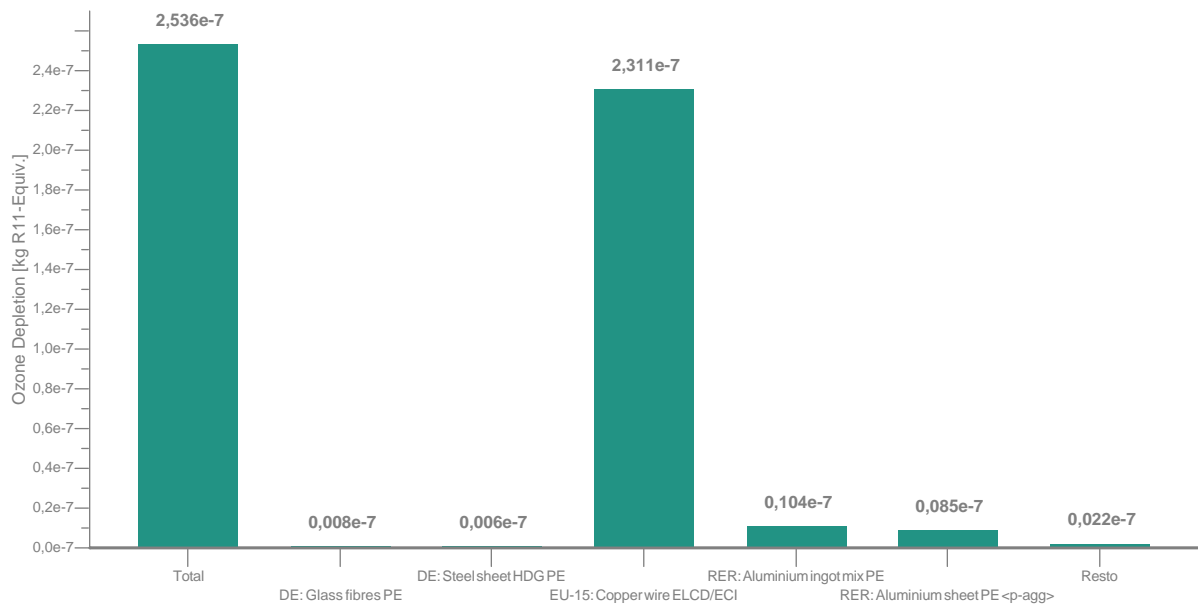


# Aerogerador com CD em cortiça e resina

## GWP

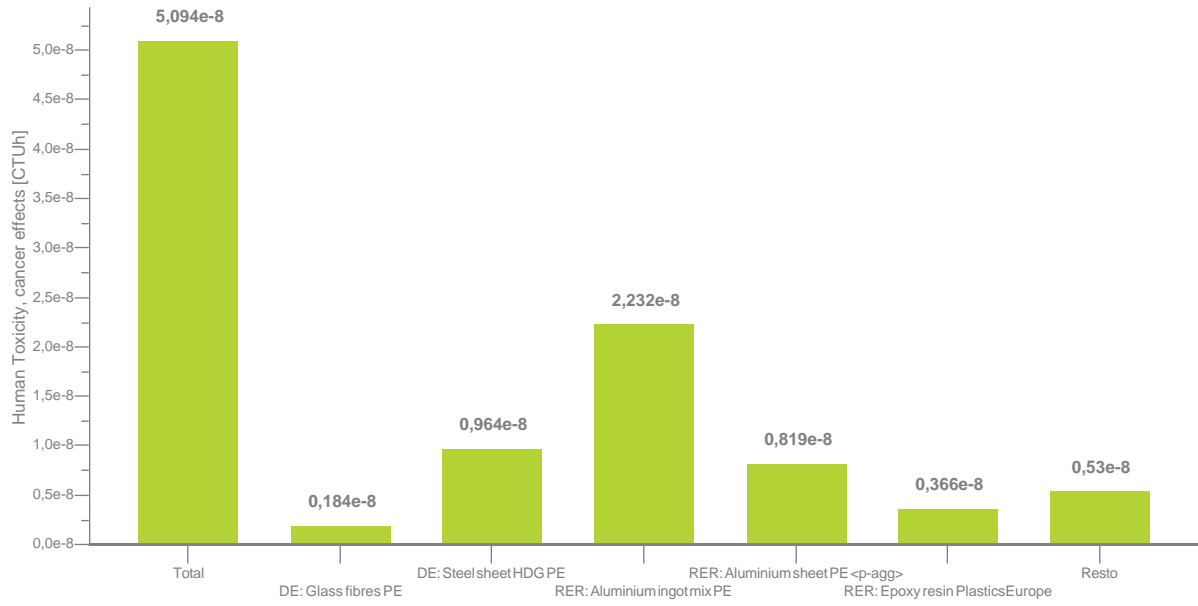


## ODP, steady state

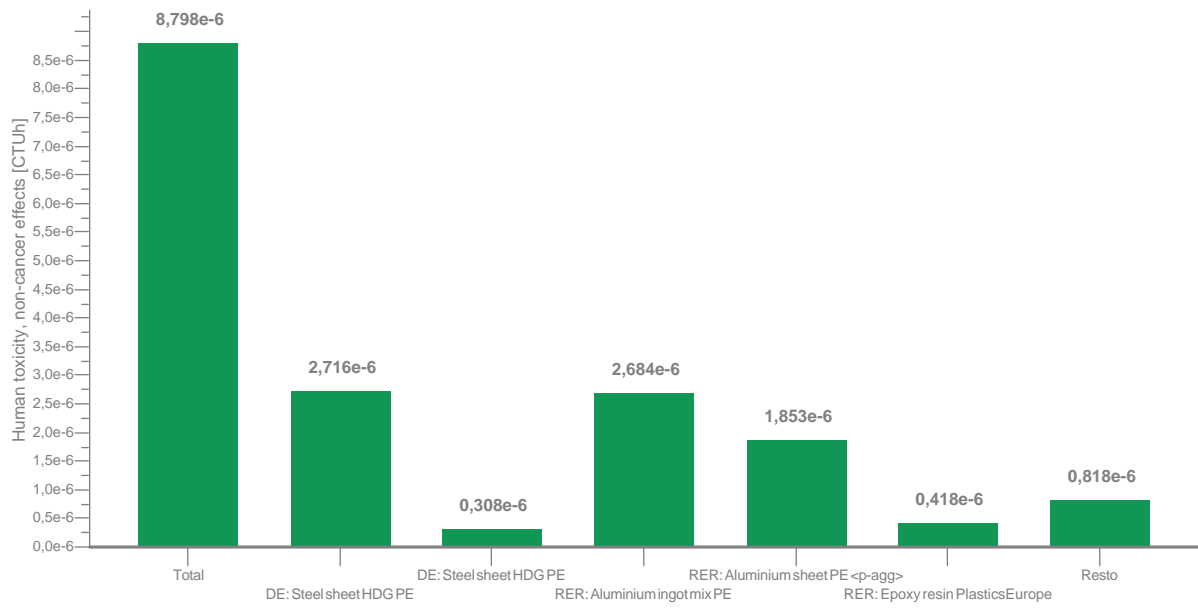


# Aerogerador com CD em cortiça e resina

## Human tox (cancer)

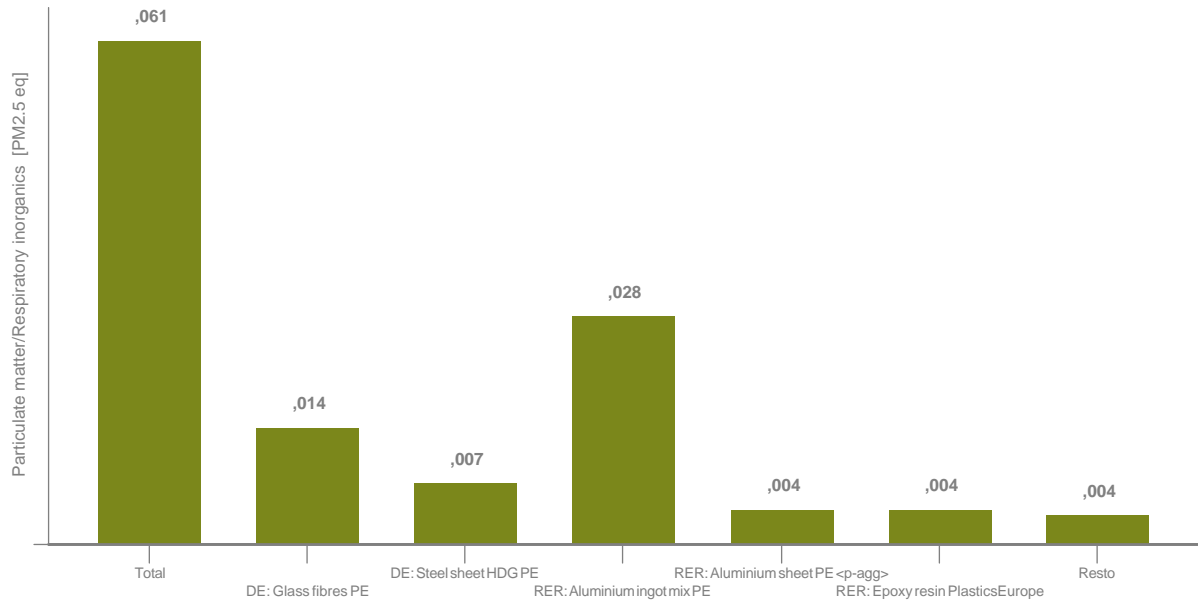


## Human tox (non cancer)

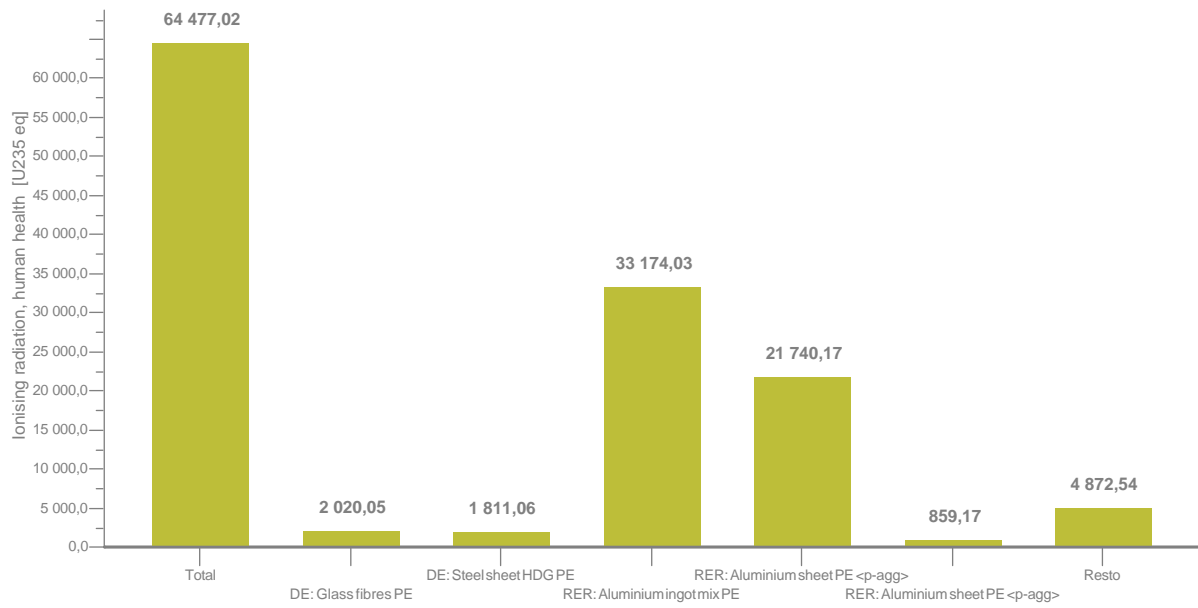


# Aerogerador com CD em cortiça e resina

## Particular matter

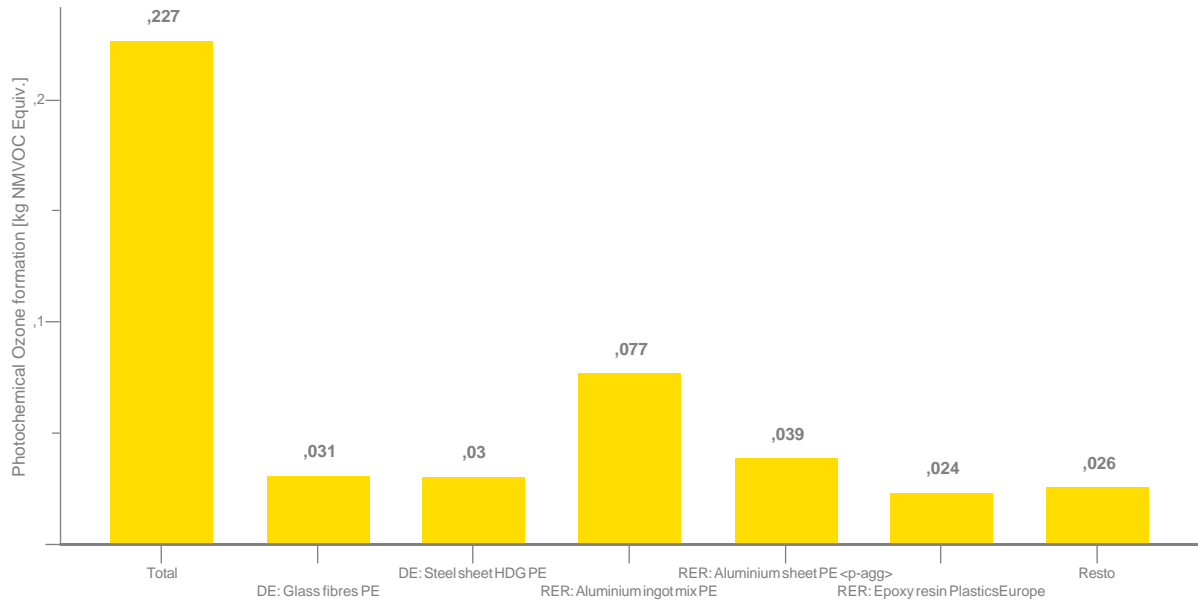


## Ionising radiation

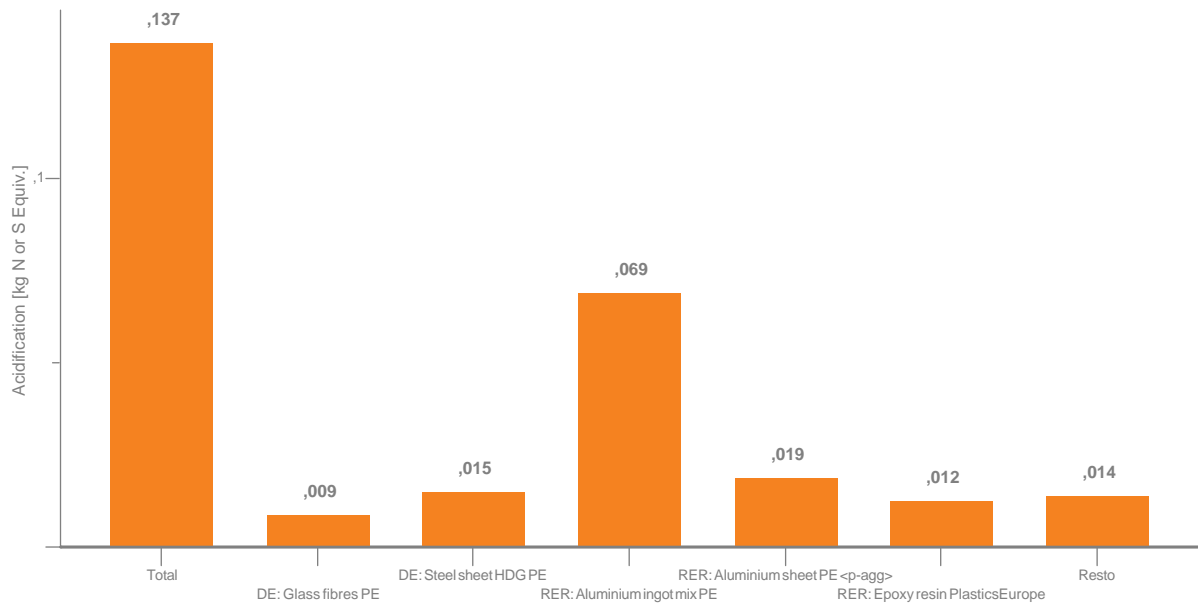


# Aerogerador com CD em cortiça e resina

## POCP

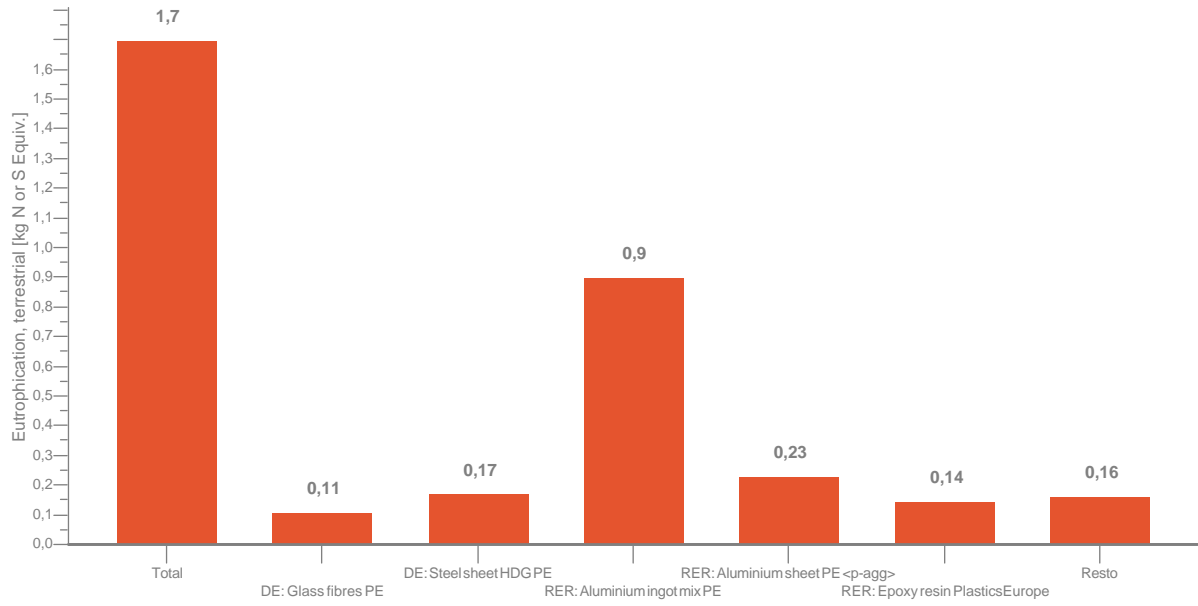


## AP

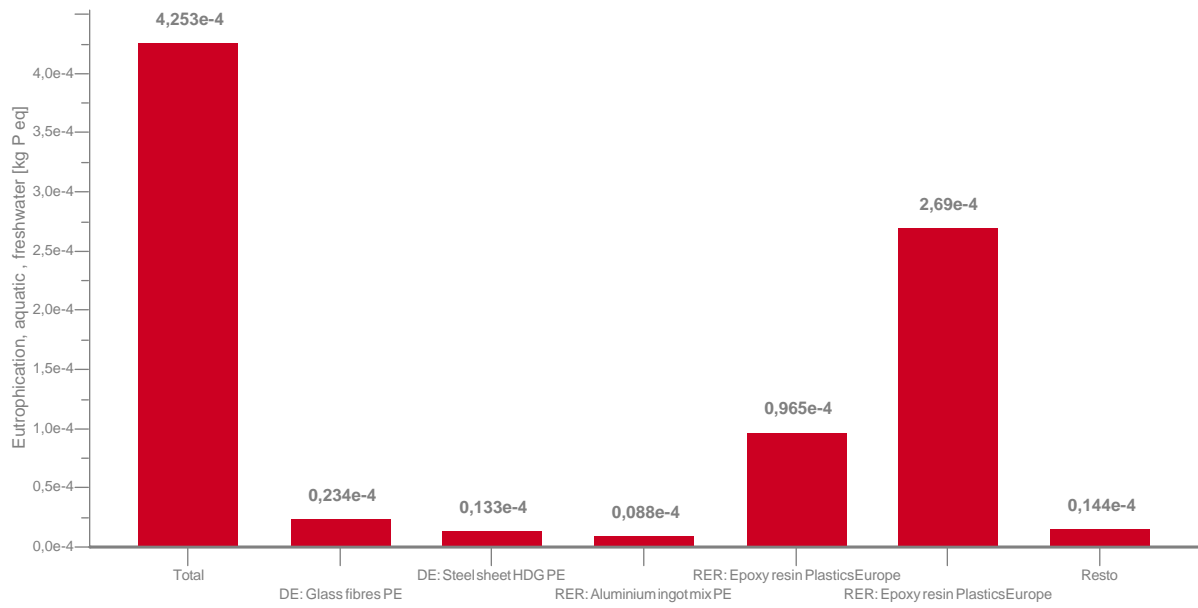


# Aerogerador com CD em cortiça e resina

## EP

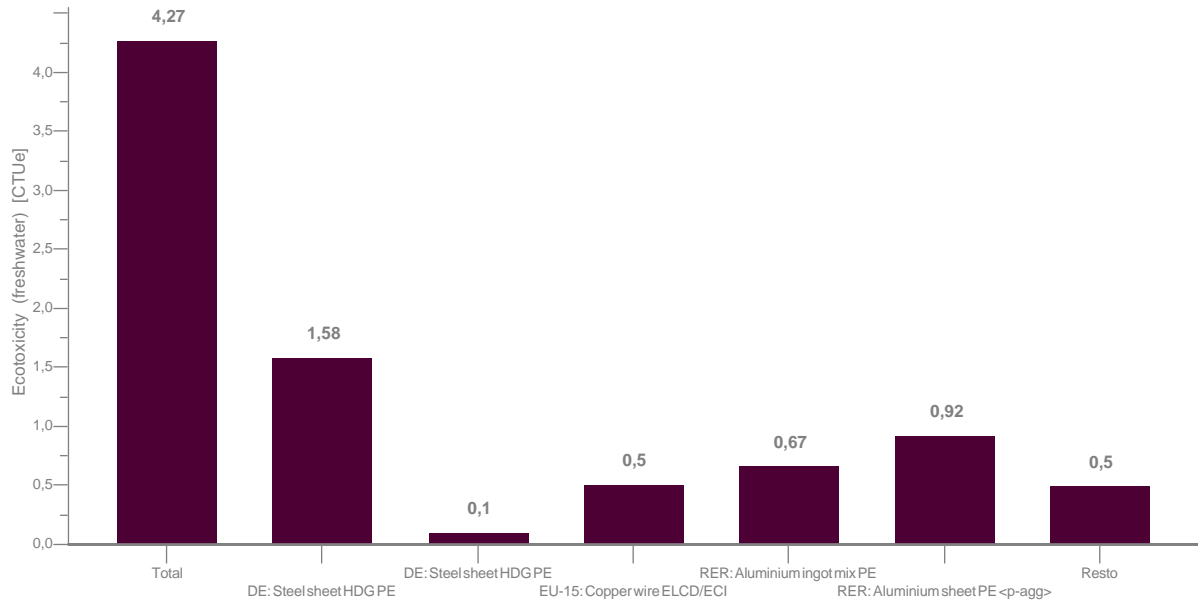


## EP water

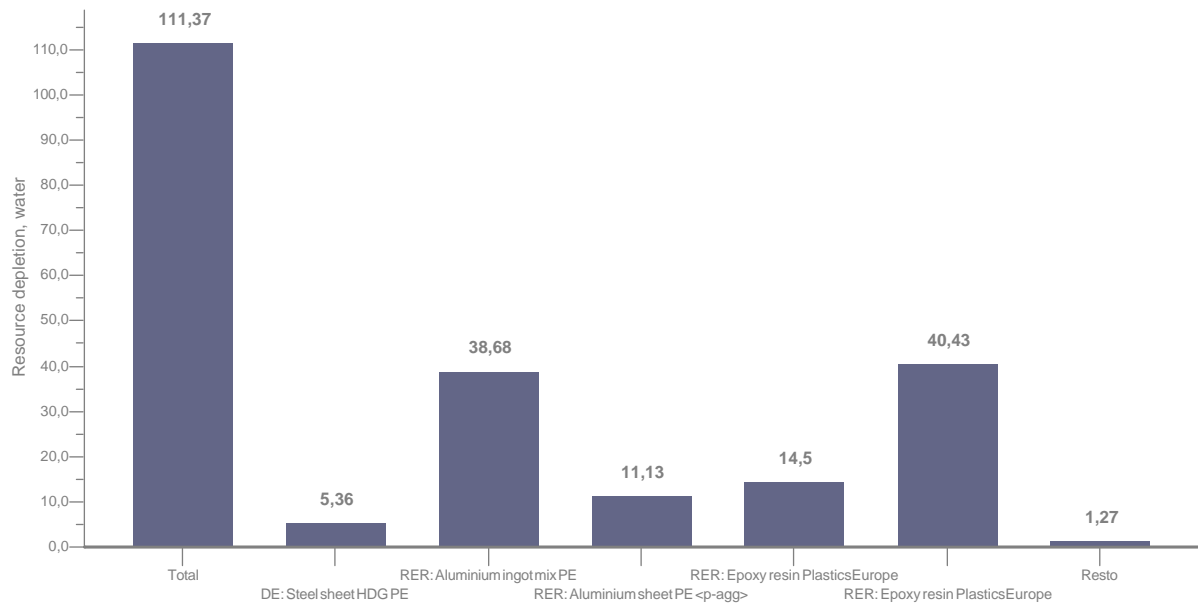


# Aerogerador com CD em cortiça e resina

## Eco tox

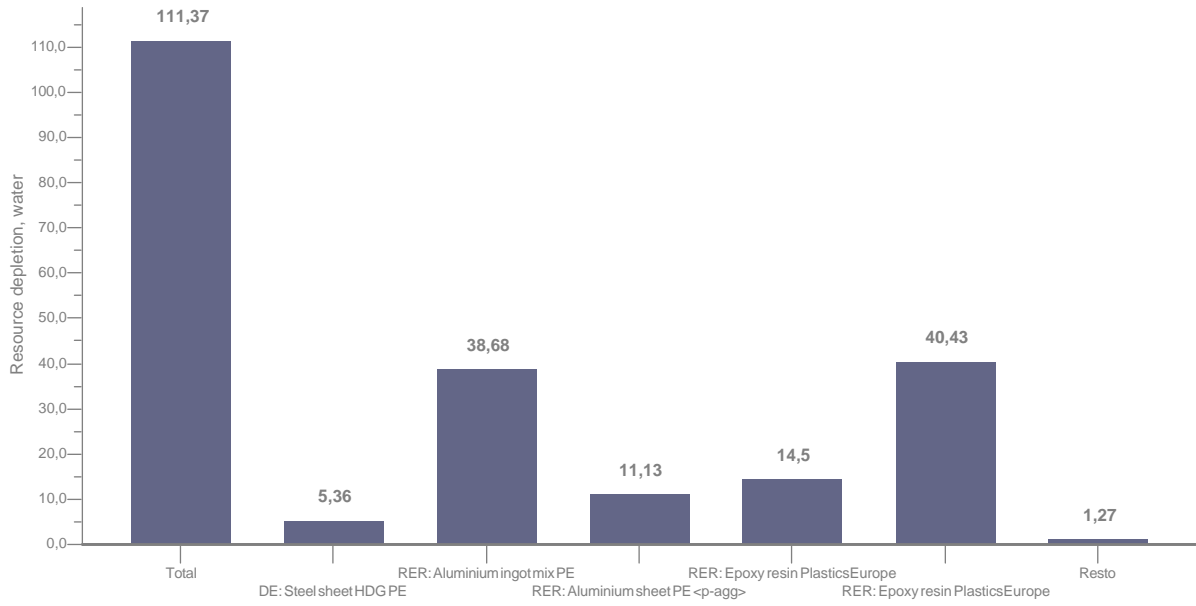


## Water

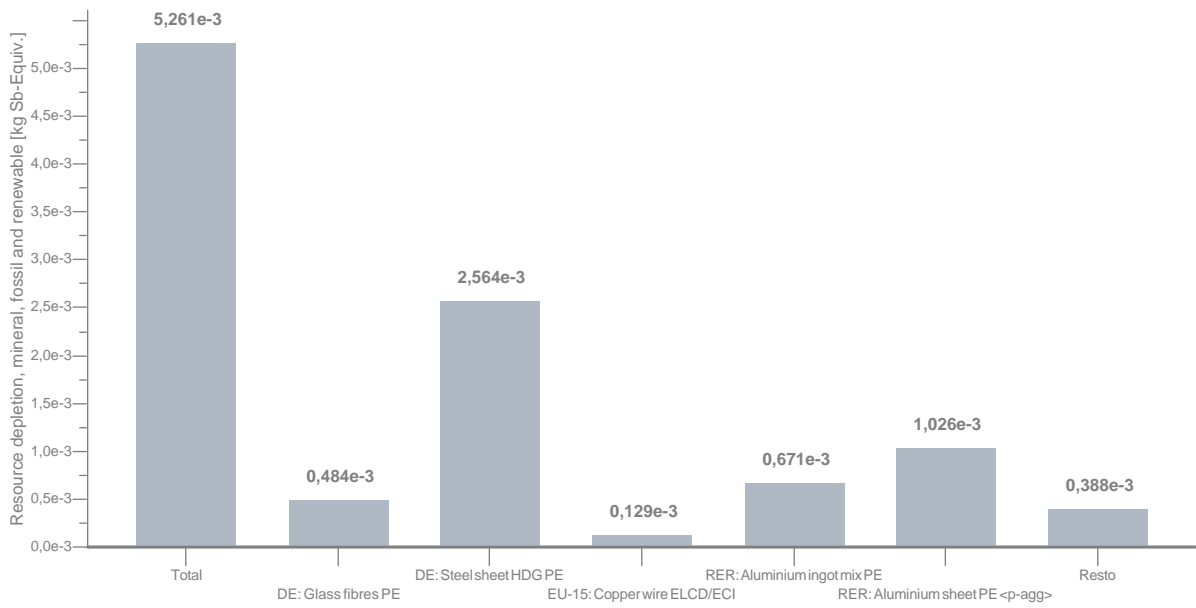


# Aerogerador com CD em cortiça e resina

## Water

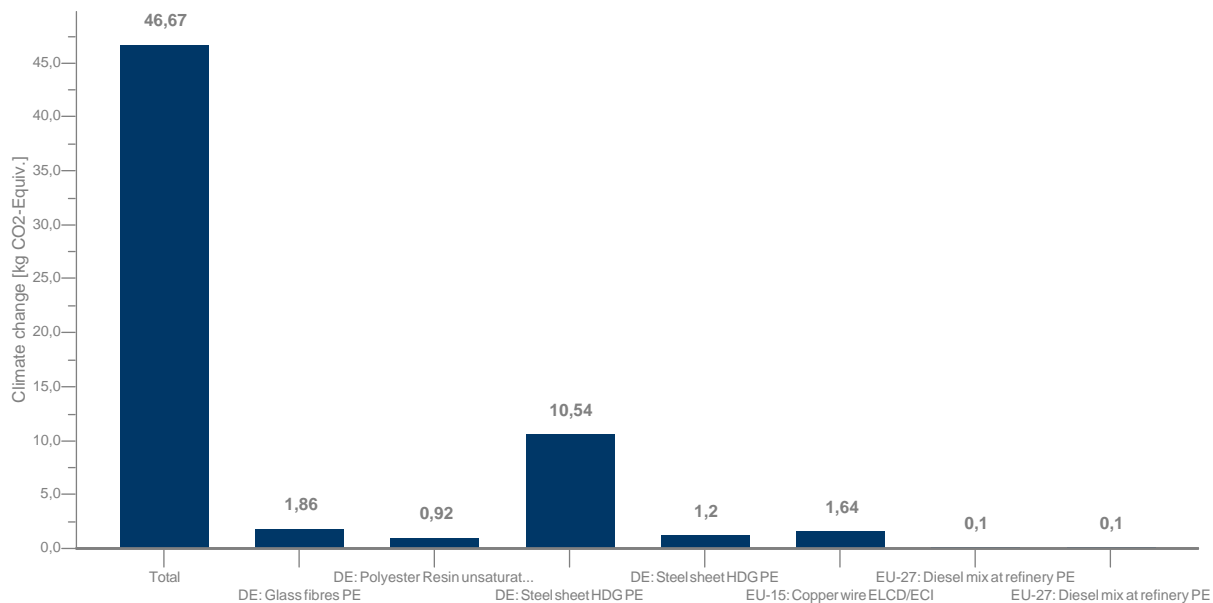


## ADP elements+fossil

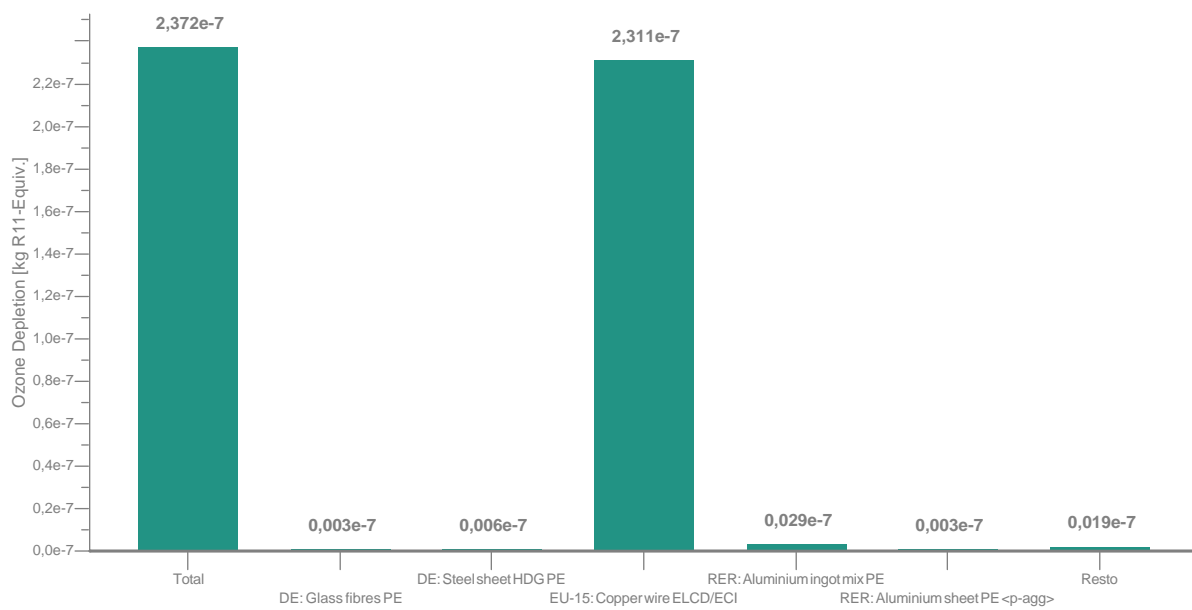


# Aerogerador com torre em madeira, CD e pás em cortiça e resina

## GWP

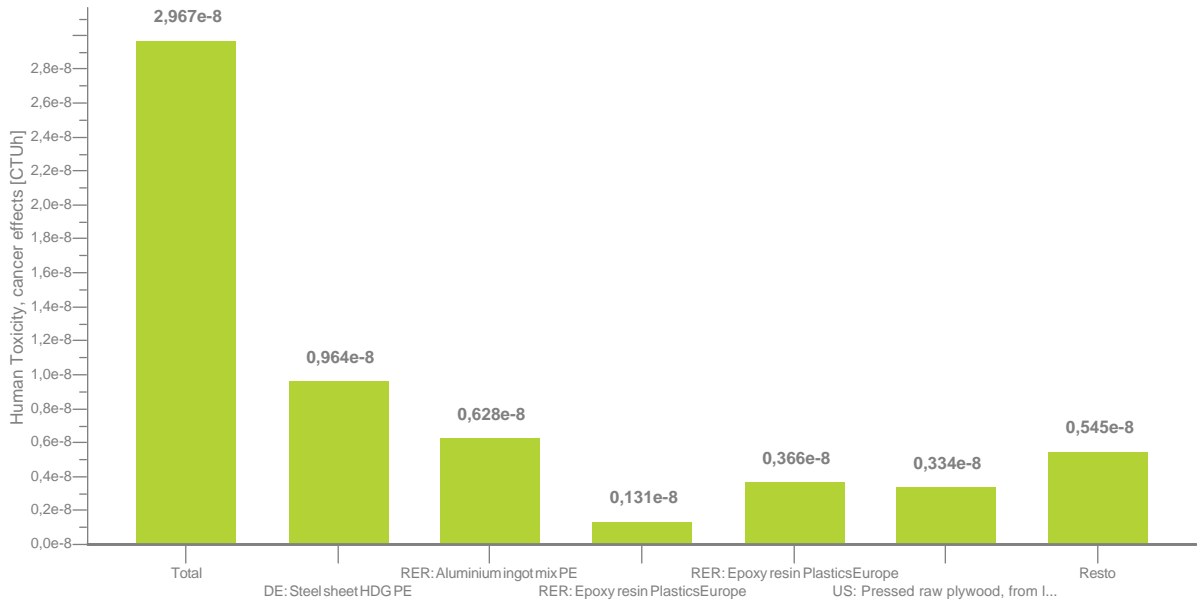


## ODP, steady state

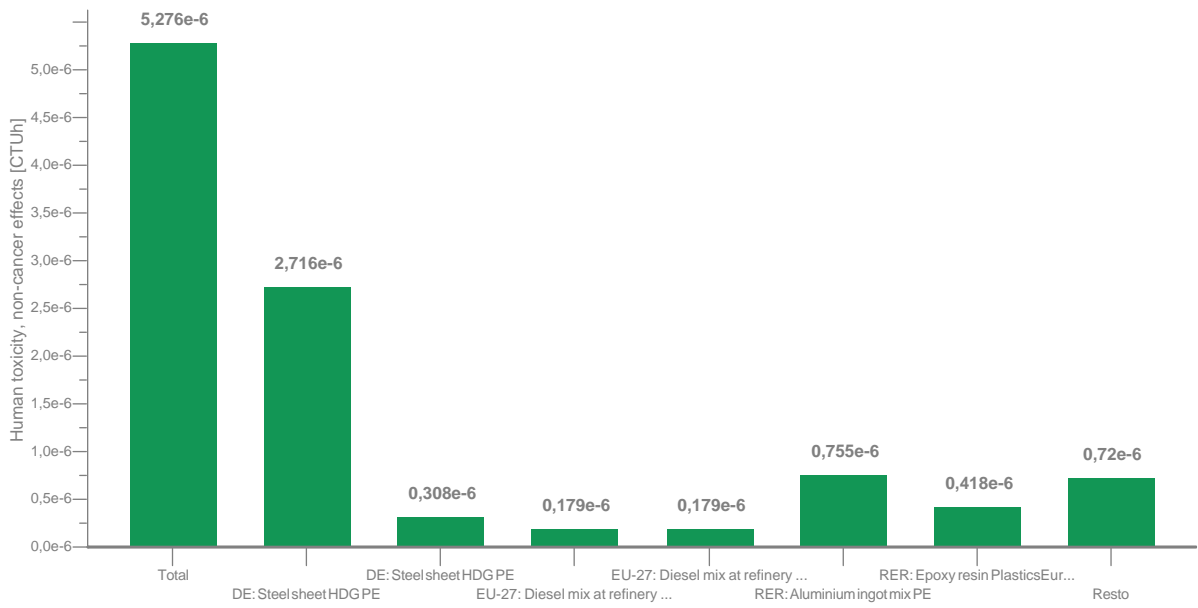


# Aerogerador com torre em madeira, CD e pás em cortiça e resina

### Human tox (cancer)

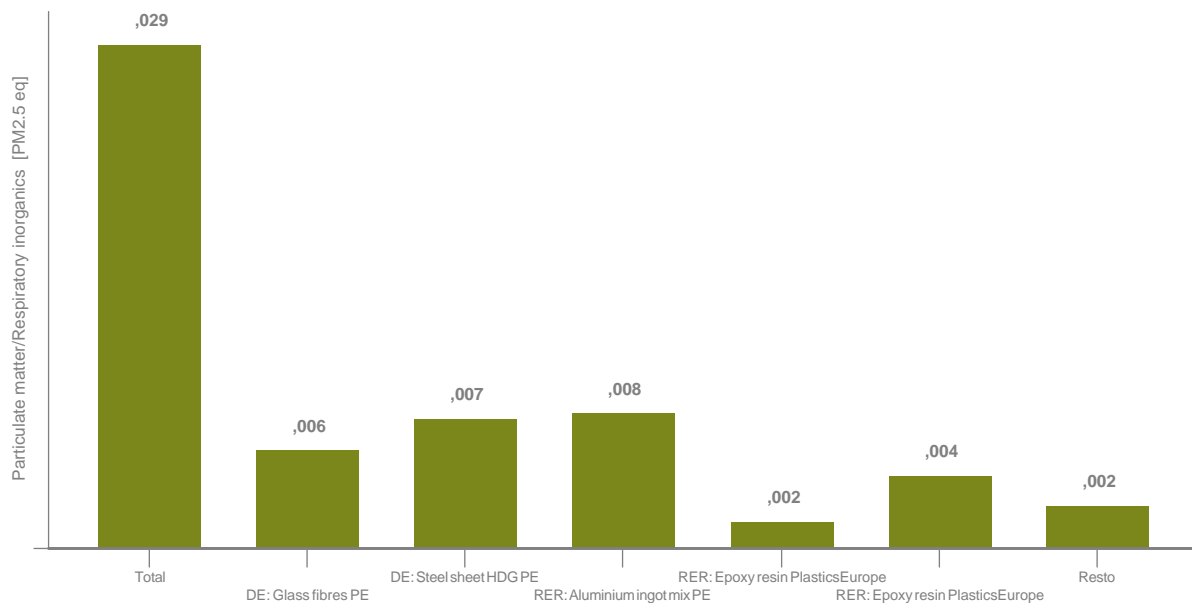


### Human tox (non cancer)

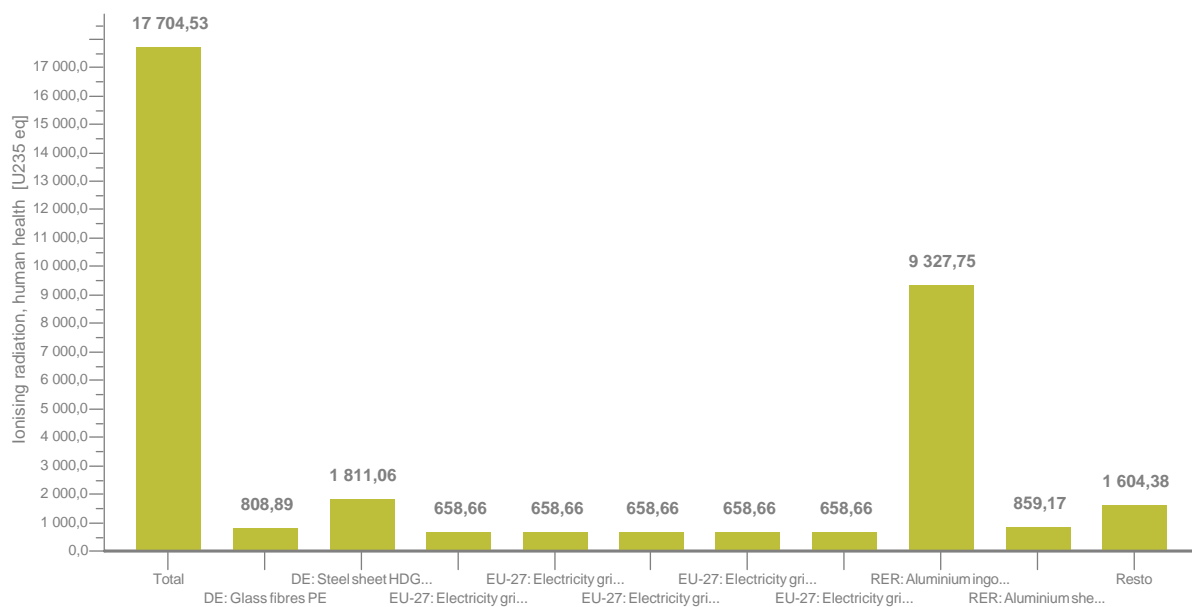


# Aerogerador com torre em madeira, CD e pás em cortiça e resina

## Particular matter

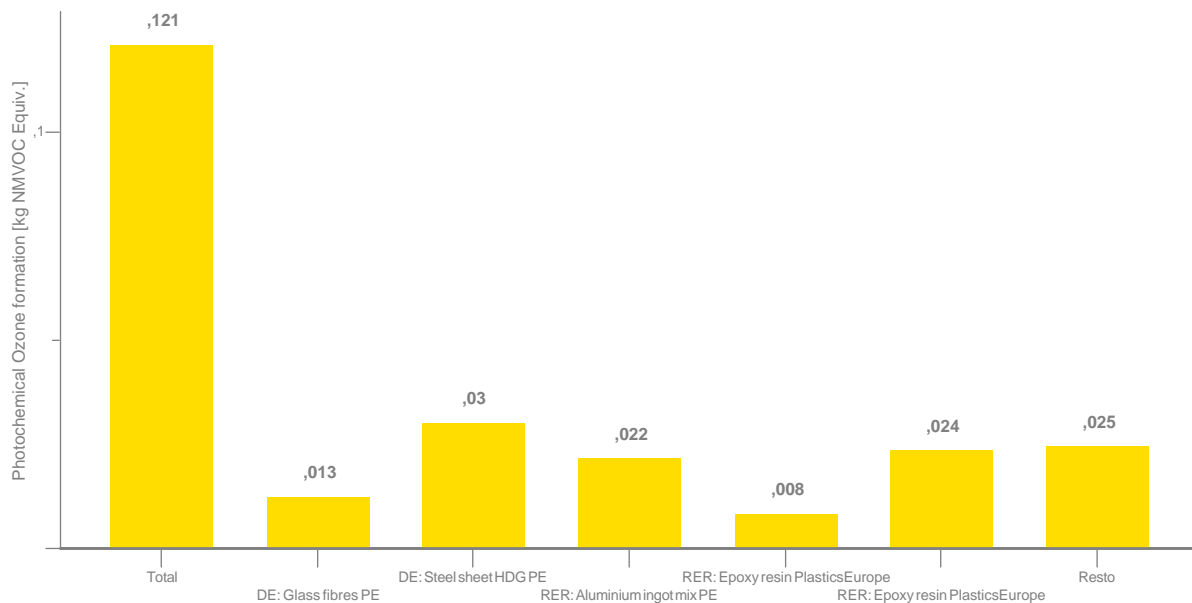


## Ionising radiation

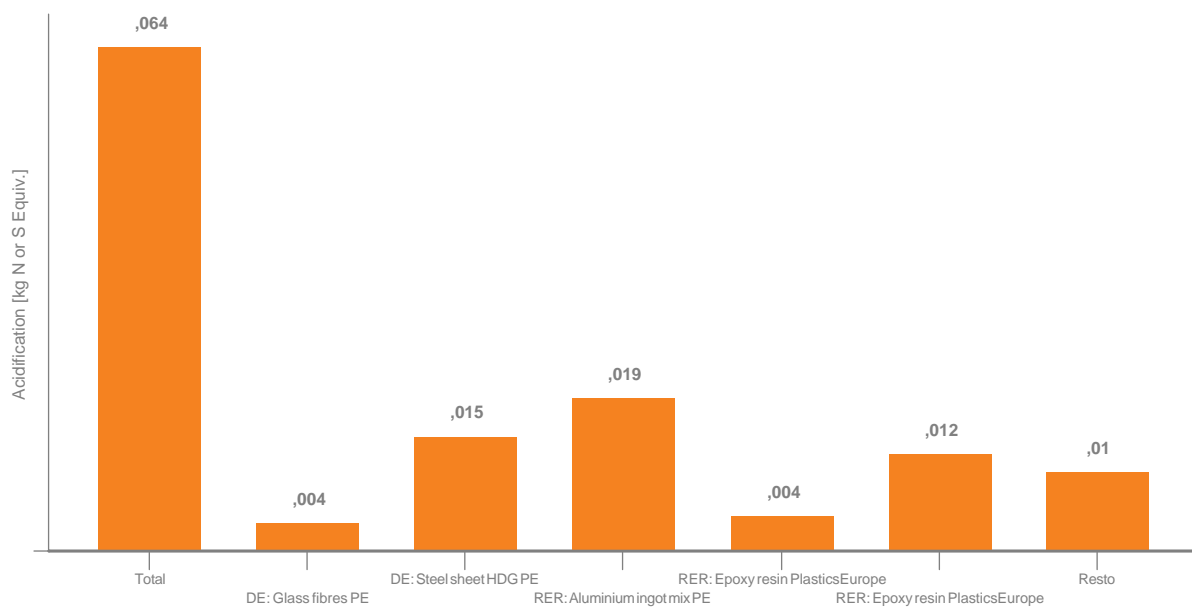


# Aerogerador com torre em madeira, CD e pás em cortiça e resina

## POCP

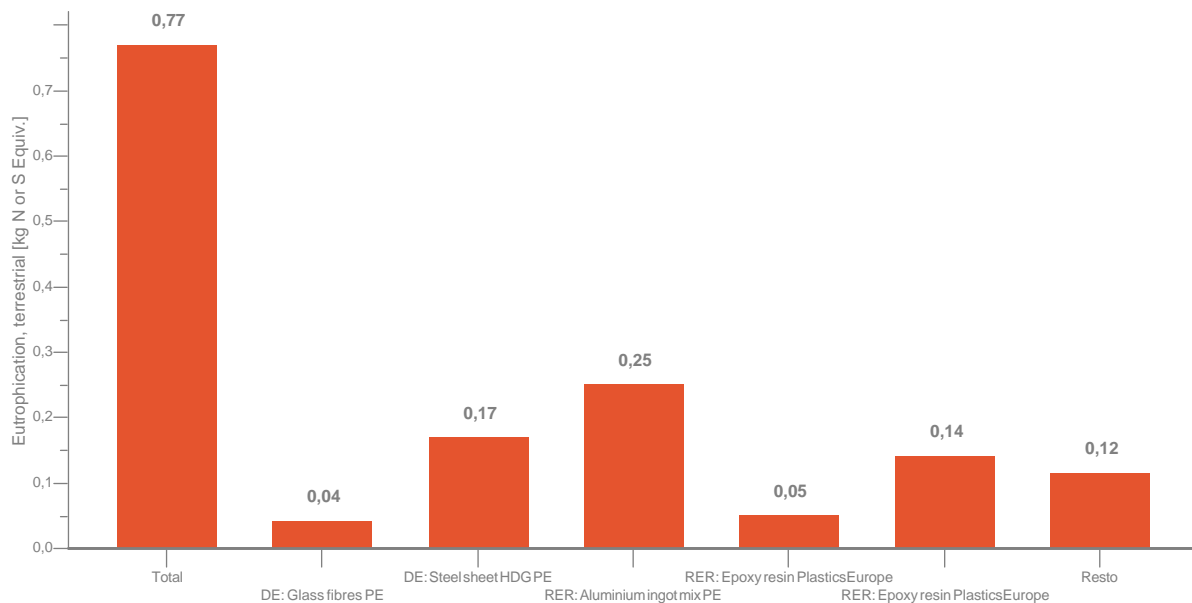


## AP

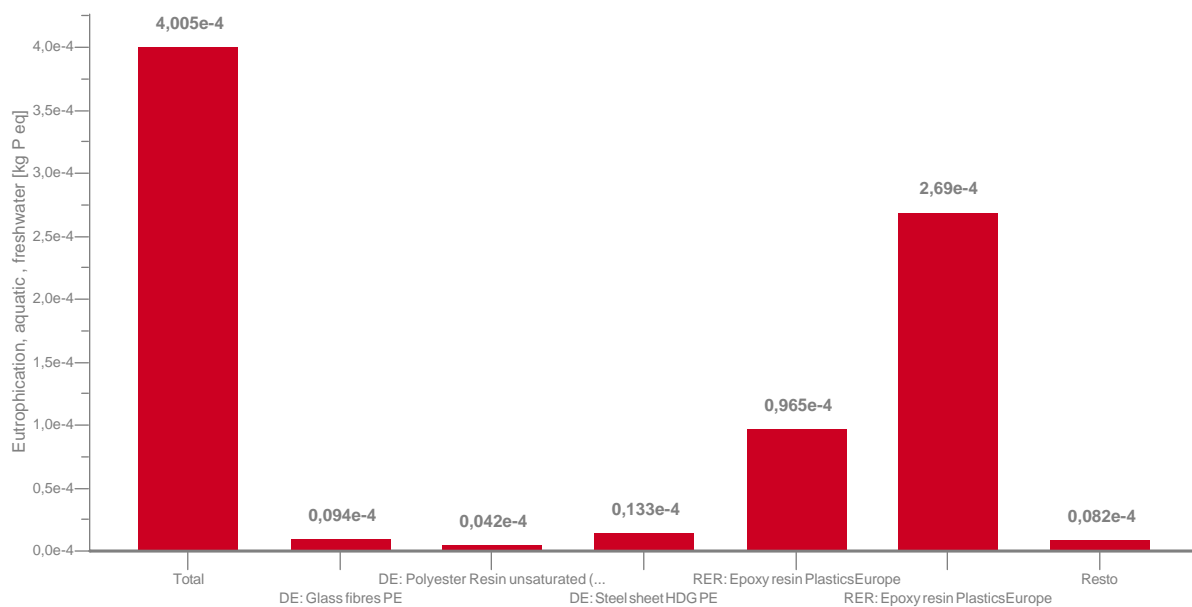


# Aerogerador com torre em madeira, CD e pás em cortiça e resina

EP

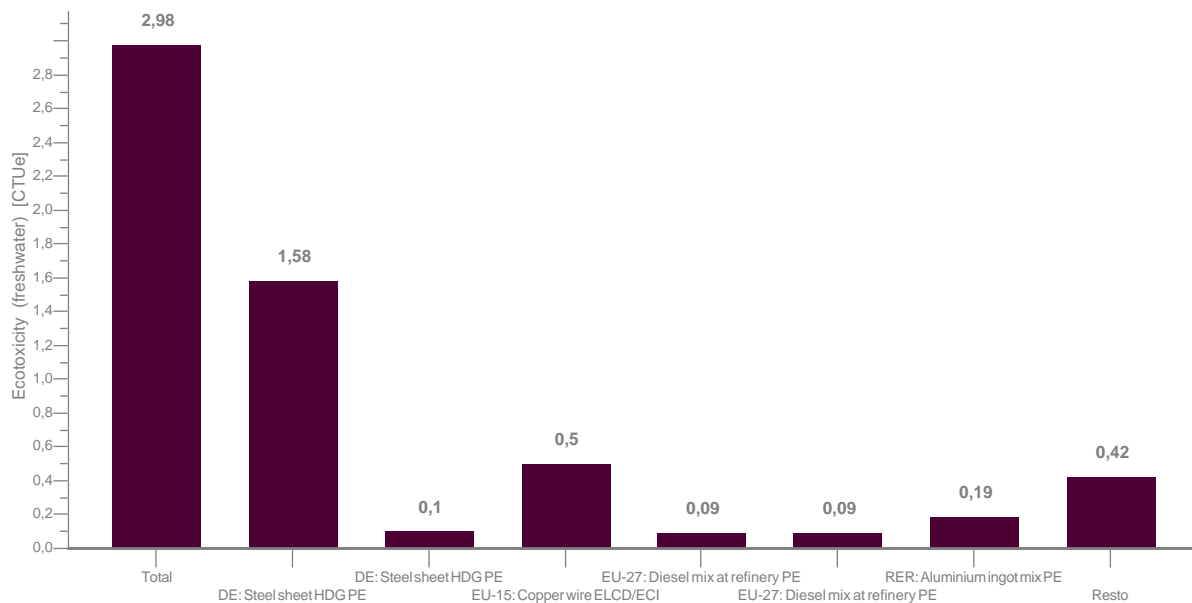


EP water

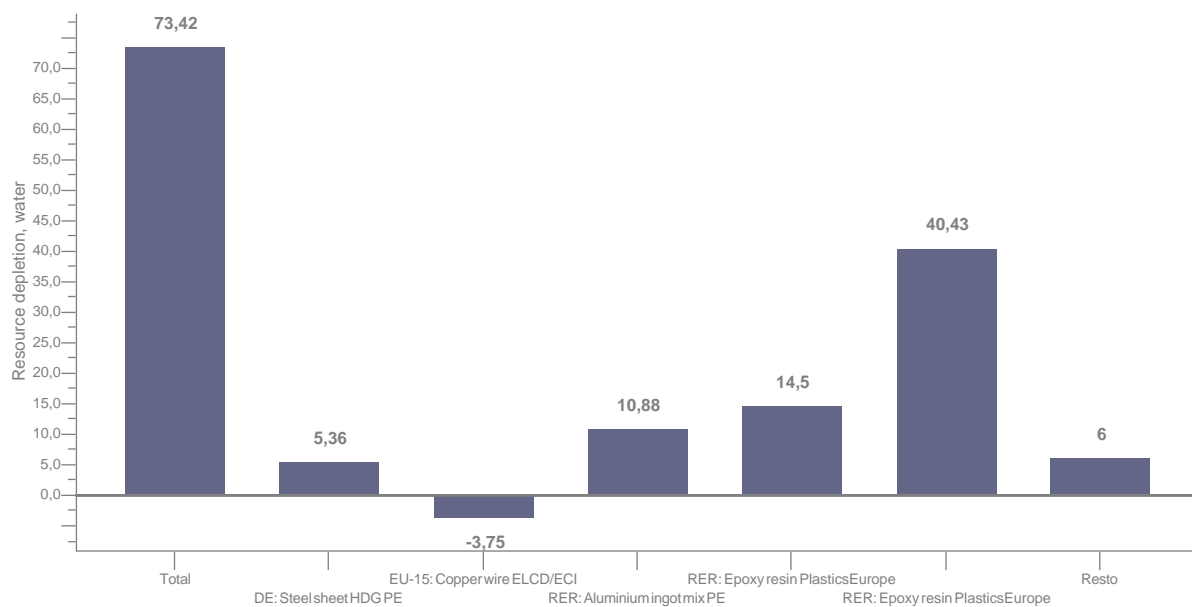


# Aerogerador com torre em madeira, CD e pás em cortiça e resina

Eco tox



Water



# Aerogerador com torre em madeira, CD e pás em cortiça e resina

