



**Tiago Joaquim  
Sousa Santos**

**Impactes ambientais no uso de cinzas na fertirrigação  
de plantas hortícolas**

Dezembro de 2016

---





**Tiago Joaquim Sousa  
Santos**

Impactes ambientais no uso de cinzas na fertirrigação de plantas hortícolas

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica da Professora Doutora Maria Isabel da Silva Nunes, Professora Auxiliar Convidada do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.



*"Do you want to see a miracle, son? Then be the miracle."*

Bruce Almighty



## **o júri**

Presidente

**Professora Doutora Maria Helena Gomes de Almeida Gonçalves Nadais**

Professora Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

vogal

**Doutora Célia Maria Dias Ferreira**

Investigadora da Escola Superior Agrária de Coimbra – Instituto Politécnico de Coimbra

vogal

**Professora Doutora Maria Isabel da Silva Nunes**

Professora Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro





## agradecimentos

Dedico este espaço a todos àqueles que foram importantes para a realização desta dissertação mas também a todos aqueles que foram importantes no meu percurso até esta etapa.

À Professora Doutora Maria Isabel da Silva Nunes, quero expressar a minha profunda gratidão pela orientação da dissertação, sentido crítico, suporte à elaboração deste documento, persistência perante os obstáculos surgidos ao longo do desenvolvimento do meu trabalho e ainda por toda atenção prestada, em todas as reuniões, presenciais ou por via virtual. Do mesmo modo, a sua boa disposição, conselhos e capacidade de motivação tiveram um papel crucial para enfrentar fases mais críticas. Além deste trabalho, a sua capacidade peculiar de ensino e métodos de incentivo ao rigor, precisão e autonomia tiveram um forte impacto na minha postura e abordagem de trabalho, ao longo de todo o meu ciclo de estudo. Por tudo isto, um muito obrigado.

À Doutora Diana Patoilo, pela disponibilidade e ajuda prestada no teste laboratorial de lixiviação de cinzas de biomassa.

Gostaria de agradecer ao Doutor António Rosa, dono da empresa Gotas Frescas que amavelmente forneceu os dados de inventário da sua empresa de hortícolas, essenciais a este trabalho, prestando os esclarecimentos que foram solicitados, e por me receber numa visita guiada à estufa de hidroponia.

Ao Michael Russo, pela prestação e auxílio em informações técnicas, de elevada relevância para este trabalho.

Ao João Ribeiro, pelo auxílio na revisão deste trabalho.

À Adriana Sousa, Tiago Sousa e João Pinto por formarmos o intitulado “Grupo Maravilha”, fruto de longas horas de trabalho, esforço, sacrifício e até discussões, que no final de tudo, mostram ser insignificantes face à nossa amizade soberana.

A todos aqueles que viveram e partilharam comigo os melhores anos da minha vida, e que me proporcionaram momentos únicos, tanto bons como maus. Todos eles contribuíram, de certa forma, para eu crescer e amadurecer.

Ao Programa Erasmus, que me proporcionou uma das melhores experiências da minha vida e que mostrou que o mundo é muito mais do que a nossa zona de conforto.

E, por último mas não menos importante, gostaria de expressar a minha imensa gratidão à minha família, pelo investimento na minha vida e oportunidade que me proporcionou: ser uma pessoa melhor e mais evoluída.



## palavras-chave

Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), impactes ambientais, cinzas de biomassa, fertirrigação, hidroponia, valorização material, lixiviação de cinzas

## resumo

Na estratégia nacional para a energia, no Horizonte 2020 visa a diminuição da dependência de Portugal dos combustíveis fósseis e ainda o cumprimento de metas europeias estabelecidas no contexto das alterações climáticas. Como tal, é enaltecida a promoção e prioridade de recursos energéticos renováveis na política energia nacional. Neste enquadramento, tem sido crescente o uso da biomassa florestal como combustível em processos de conversão energética e com isso acarreta inevitavelmente a geração de cinzas cuja gestão carece de um quadro legal. Atualmente, este subproduto é encarado comumente como um resíduo e eliminado em aterro. Os impactes ambientais e económicos inerentes a esta prática, aliados às propriedades intrínsecas das cinzas têm fomentado o desenvolvimento de opções de valorização, dentro das quais se inclui a reciclagem de nutrientes pela aplicação das cinzas no solo. Por outro lado, existe outra técnica de fertilização, denominada fertirrigação, na qual os nutrientes são fornecidos às plantas na forma dissolvida, normalmente com maior eficiência e menores impactes ambientais e económicos. Assim, os lixiviados (soluções aquosas com os constituintes solúveis) das cinzas de biomassa poderão ser usados na fertirrigação, porém esta opção carece de ensaios laboratoriais e/ou a outra escala, bem como de uma avaliação dos potenciais impactes ambientais e económicos.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar de forma comparada os impactes ambientais da valorização do lixiviado de cinzas de biomassa, num sistema de cultivo hidropónico em estufa, de uma espécie hortícola - alface. A ferramenta usada foi a Avaliação do Ciclo de Vida. Para tal, foram definidos dois cenários principais: (i) cenário convencional onde as cinzas são depositadas em aterro e são usados exclusivamente fertilizantes químicos na produção hidropónica, e (ii) cenário alternativo, com a valorização das cinzas (de fundo ou volantes), como fonte parcial de nutrientes no plano de fertilização. Foi adotada a metodologia CML 2001 *baseline* no cálculo dos impactes, nas categorias: depleção de recursos abióticos, acidificação, alterações climáticas, formação de agentes fotoquímicos e eutrofização. Na análise de inventário foram utilizadas informações *in situ* de uma unidade industrial onde é usada fertirrigação no cultivo de hortícolas, da base de dados *Ecoinvent v3.3* e ainda estudos bibliográficos de caracterização de lixiviados de cinza de biomassa, produzida em Portugal Continental.

Os resultados obtidos indicam que a produção e distribuição de eletricidade e ainda a infraestrutura “estufa”, como os principais contribuidores para as diferentes categorias de impacte. Uma possível causa para este facto poderá residir na baixa produtividade da unidade industrial considerada. Os impactes ambientais em cada categoria são muito semelhantes nos cenários estudados, todavia o cenário alternativo de valorização de cinzas volantes apresenta os menores impactes.

Este trabalho pretende dar um contributo para a disponibilização de dados relativos aos potenciais impactes ambientais da produção hidropónica de espécies hortícolas, bem como informações orientadoras relativamente a uma nova opção de valorização de cinzas de biomassa.



**keywords**

Life Cycle Assessment (LCA), environmental impacts, biomass ashes, fertigation, hydroponics, waste recovery, leaching of ashes

**abstract**

In the national energy strategy, Horizon 2020 aims to reduce Portugal's dependence on fossil fuels and meet European targets established in the context of climate change. Thus, the promotion and the priority of renewable energy resources in national energy policy are enhanced. In this context, the use of forest biomass as fuel in energy conversion processes has been increased as well as the production of ashes which management lacks a legal framework. Currently, this by-product is commonly classified as a waste and is usually landfilled. The environmental and economic impacts inherent to this practice, together with the intrinsic properties of the ashes, have promoted the development of recovery options, which include the recycling of nutrients by the application of ash on soil. On the other hand, there is another fertilization technique, so-called fertigation, in which nutrients are supplied to the plants in dissolved way, usually with higher efficiency and lower environmental and economic impacts. Thus, leachate (aqueous solutions with the soluble constituents) of the biomass ash can be used in fertigation. However, this option needs laboratory and/or other scaling-up tests as well as an environmental and economic impacts assessment.

In this context, the present work aims to assess the environmental impacts on use of biomass ash leachate to produce horticultural species - lettuce - in a greenhouse hydroponic system . The Life Cycle Assessment tool was used and two main scenarios were defined: (i) conventional scenario where the ashes are landfilled and only chemical fertilizers are used in the hydroponic production, and (ii) alternative scenario, where the ashes (bottom and fly ashes) are used as (partial) nutrients suppliers in the fertilization plan. The CML 2001 baseline methodology was adopted in the calculation of impacts, in the categories: depletion of abiotic resources, acidification, climate change, formation of photochemical agents and eutrophication. In the inventory analysis it was used in situ data from an industrial unit where fertigation is used in horticultural cultivation, Ecoinvent v3.3 database and also bibliographic studies of characterization of biomass ash leachates, produced in Continental Portugal.

The results indicate that the production and distribution of electricity and the "greenhouse" infrastructure are the main contributors to the different impact categories. One possible cause for this may be the low productivity of the plant. The environmental impacts in each category are very similar in all scenarios studied; however the alternative scenario of fly ash has the smallest impacts.

This work aims to contribute to the availability of data on the potential environmental impacts of the hydroponic production of horticultural species, as well as guiding information on a new alternative biomass ash valorization option.



## Índice

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	MOTIVAÇÃO E RELEVÂNCIA DO TEMA	1
1.2	OBJETIVOS E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
2.1	INTRODUÇÃO	5
2.2	BIOMASSA COMO RECURSO ENERGÉTICO	5
2.3	CINZAS DE BIOMASSA	6
2.3.1	<i>Origem das cinzas</i>	7
2.3.2	<i>Caracterização física e química</i>	13
2.3.3	<i>Estimativa da produção de cinzas</i>	17
2.3.4	<i>Gestão de cinzas</i>	18
2.4	FERTILIZAÇÃO	22
2.4.1	<i>Introdução</i>	22
2.4.2	<i>Tipos de fertilizantes</i>	22
2.4.3	<i>Nutrientes essenciais às plantas</i>	24
2.4.4	<i>Fatores condicionantes da biodisponibilidade de nutrientes</i>	29
2.4.5	<i>Excesso de fertilização</i>	30
2.5	FERTIRRIGAÇÃO E HIDROPONIA	30
2.5.1	<i>Conceitos e descrição das técnicas</i>	30
2.5.2	<i>Fatores importantes no cultivo por hidroponia</i>	34
2.5.3	<i>Culturas na hidroponia</i>	45
2.6	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	46
2.6.1	<i>Introdução</i>	46
2.6.2	<i>Metodologia</i>	47
2.6.3	<i>Definição do objetivo e âmbito</i>	47
2.6.4	<i>Análise de inventário do ciclo de vida</i>	49
2.6.5	<i>Avaliação de impactes do ciclo de vida</i>	49
2.6.6	<i>Interpretação</i>	51
2.7	CONCLUSÃO	51
<b>3</b>	<b>LIXIVIADOS DE CINZAS DE BIOMASSA</b>	<b>53</b>
3.1	INTRODUÇÃO	53
3.2	CARACTERIZAÇÃO DE LIXIVIADOS DE CINZAS VOLANTES E DE FUNDO	53
3.3	INFLUÊNCIA DO TEMPO DE LIXIVIAÇÃO NA MOBILIZAÇÃO DE ELEMENTOS QUÍMICOS – ENSAIO LABORATORIAL	57
3.4	CONCLUSÃO	59
<b>4</b>	<b>CULTIVO DE PLANTAS HORTÍCOLAS POR HIDROPONIA – CASO DE ESTUDO</b>	<b>61</b>
4.1	INTRODUÇÃO	61
4.2	CULTIVO HIDROPÓNICO	61
4.3	FLUXOS MÁSSICOS E ENERGÉTICOS	65
4.4	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS FERTILIZANTES	66
4.5	POTENCIAL DE REDUÇÃO DE FERTILIZANTES PELO USO DE CINZAS	67

4.5.1	<i>Cinzas de fundo</i> .....	68
4.5.2	<i>Cinzas volantes</i> .....	70
4.6	CONCLUSÃO .....	70
<b>5</b>	<b>APLICAÇÃO DA ACV À VALORIZAÇÃO DE CINZAS DE BIOMASSA</b> .....	<b>73</b>
5.1	INTRODUÇÃO .....	73
5.2	DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ÂMBITO .....	73
5.2.1	<i>Objetivo de estudo</i> .....	73
5.2.2	<i>Âmbito de estudo</i> .....	74
5.3	ANÁLISE DE INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA .....	81
5.3.1	<i>Processos</i> .....	81
5.3.2	<i>Cenário convencional</i> .....	94
5.3.3	<i>Cenários alternativos</i> .....	95
5.4	AValiaÇÃO DE IMPACTES DO CICLO DE VIDA .....	98
5.4.1	<i>Categorias de impacte</i> .....	98
5.4.2	<i>Método de cálculo</i> .....	101
5.5	INTERPRETAÇÃO .....	101
5.6	CONCLUSÃO .....	102
<b>6</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>104</b>
6.1	INTRODUÇÃO .....	104
6.2	CENÁRIO CONVENCIONAL .....	105
6.2.1	<i>Análise de inventário do ciclo de vida</i> .....	105
6.2.1	<i>Avaliação de impacte do ciclo de vida</i> .....	108
6.3	CENÁRIO ALTERNATIVO CF .....	112
6.3.1	<i>Análise de inventário d ciclo de vida</i> .....	112
6.3.2	<i>Avaliação de impacte do ciclo de vida</i> .....	114
6.4	CENÁRIO ALTERNATIVO CV .....	115
6.5	ANÁLISE COMPARATIVA DOS CENÁRIOS DE GESTÃO .....	115
6.6	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....	119
6.7	CONCLUSÃO .....	120
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA UM TRABALHO FUTURO</b> .....	<b>123</b>
7.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	123
7.2	PROPOSTA DE TRABALHO FUTURO .....	124
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>127</b>
	<b>ANEXOS</b> .....	<b>137</b>
	ANEXO A .....	137
	ANEXO B .....	138



## Índice de Figuras

Figura 2.1 - Tópicos incluídos na revisão bibliográfica do presente estudo. ....	5
Figura 2.2 - Representação esquemática do sistema de combustão em grelha, com a entrada do combustível, as várias fases da combustão e ainda a localização das entradas de ar (PA – ar primário; SA – ar secundário) (Yin, Rosendahl e Kær, 2008). ....	8
Figura 2.3 - Esquema de funcionamento de uma câmara de combustão de: (a) leito fluidizado borbulhante e (b) leito fluidizado circulante (Grammelis, 2011). ....	9
Figura 2.4 - Esquema representativo da formação de cinzas, durante a combustão de biomassa, em tecnologia de grelha. (Yin, Rosendahl e Kær, 2008). ....	10
Figura 2.5 - Representação dos mecanismos de formação de cinzas volantes (à esquerda) e de fundo (à direita) num processo de combustão de biomassa, em leito fluidizado (Pinto, 2011). ....	11
Figura 2.6 - Representação dos diferentes fluxos de cinza, numa central de combustão de biomassa em leito fluidizado (Tarelho et al., 2013). ....	12
Figura 2.7 - Distribuição de tamanhos de partículas, para cinzas de fundo (CF) e cinzas volantes (CV), resultantes da combustão de biomassa num leito fluidizado borbulhante (Tarelho, L. et al., 2013). ....	14
Figura 2.8 - Valores de pH e condutividade de cinzas de fundo (CF) e cinzas volantes (CV) resultantes da combustão de biomassa num leito fluidizado borbulhante ((Tarelho et al., 2013). ....	14
Figura 2.9 - Elementos químicos maioritários e alguns metais pesados nas CF e CV de uma unidade de LFB que utiliza como combustível casca de eucalipto e BFR - biomassa florestal residual (Tarelho et al., 2013). ....	15
Figura 2.10 - Evolução da produção de resíduos sólidos na indústria papelreira (CELPA, 2014). ....	17
Figura 2.11 - Destino dos resíduos sólidos produzidos pelo setor do papel, entre 2005 e 2014 (adaptado de CELPA (2014)). ....	19
Figura 2.12 - Esquema representativo de um sistema NFT e cultivo de alface em estufa (fonte: TudoHidroponia (2016) e ConoSul (2012) respetivamente). ....	33
Figura 2.13 - Tipos de substratos utilizados na hidroponia (Padova e Oliveira, 2000). ....	34
Figura 2.14 - Método de oxigenação da água de irrigação, por turbulência (Padova & Oliveira 2000). ...	42
Figura 2.15 - Relação entre pH e disponibilidade de nutrientes (Malavolta (1980) apud Padova e Oliveira (2000)). ....	43
Figura 2.16 - Relação entre a concentração de diferentes sais e a CE, a 25°C (Sonneveld et al. (1966) apud Sonneveld & Voogt (2009)). ....	44
Figura 2.17 - Fases de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ISO, 2006). ....	47
Figura 2.18 - Elementos da fase AICV (Vicente et al., 2004). ....	50
Figura 3.1 - Evolução do pH e condutividade elétrica ao longo tempo de lixiviação. ....	58
Figura 3.2 – Influência do tempo de lixiviação nas concentrações de Ca e K no lixiviado de cinzas volantes. ....	58
Figura 4.1 - Principais fluxos materiais e de energia do processo de produção de alfaces por hidroponia NFT. ....	62
Figura 4.2 - Esquema do sistema de fertirrigação da empresa “Gotas Frescas”. ....	62
Figura 4.3 - Fluxos de entrada e saída na estufa de cultivo hidropónico de alface, da empresa “Gotas Frescas” (fluxos cor-de-laranja e verde: [g]; fluxos azul e cinzento: [L]; fluxo amarelo: [kWh]). ....	66
Figura 4.4 - Fluxos de massa e energia elétrica na estufa de produção de alface por hidroponia, quando é usado lixiviado de cinzas de fundo na preparação da solução de hidroponia (fluxos cor-de-laranja e verde: [g]; fluxos azul e cinzento: [L]; fluxo amarelo: [kWh]). ....	69

<i>Figura 4.5 - Fluxos de massa e energia elétrica na estufa de produção de alface por hidroponia, quando é usado lixiviado na preparação da solução de fertirrigação de cinzas volantes (fluxos cor-de-laranja e verde: [g]; fluxos azul e cinzento: [L]; fluxo amarelo: [kWh]).</i>	70
<i>Figura 5.1 - Fases do ciclo de vida e fronteiras definidas para o cenário convencional.</i>	74
<i>Figura 5.2 - Fases do ciclo de vida e fronteira definida para o cenário alternativo.</i>	75
<i>Figura 5.3 - Estrutura do mercado de eletricidade existente no Ecoinvent (adaptado de Bauer &amp; Treyer (2013)).</i>	82
<i>Figura 5.4 - Mix energético em Portugal Continental para a produção de 1 kWh (ano 2012).</i>	83
<i>Figura 5.5 - Processo simplificado da produção de água destilada (Althaus et al., 2007).</i>	88
<i>Figura 5.6 - Fronteiras do sistema no tratamento de águas residuais (Doka, 2009).</i>	88
<i>Figura 5.7 - Cadeia de processos envolvidos na deposição em aterro (Doka, 2009).</i>	89
<i>Figura 5.8 - Fronteiras do cenário convencional.</i>	94
<i>Figura 5.9 - Fronteiras do alternativo CF.</i>	95
<i>Figura 5.10 - Fronteiras do cenário alternativo CV.</i>	97
<i>Figura 6.1 - Contribuição relativa de cada grupo de processos para a depleção de recursos abióticos no cenário convencional.</i>	106
<i>Figura 6.2 - Contribuição relativa de cada grupo de processos na emissão de poluentes atmosféricos no cenário convencional.</i>	106
<i>Figura 6.3 - Contribuição relativa de cada grupo de processos na emissão de poluentes eutrofizantes no cenário convencional.</i>	107
<i>Figura 6.4 - Contribuição relativa de cada grupo de processos do cenário convencional para cada uma das cinco categorias de impacto consideradas no presente estudo.</i>	108
<i>Figura 6.5 - Contribuição de cada grupo de processos para as Alterações Climáticas no cenário convencional.</i>	109
<i>Figura 6.6 - Contribuição de cada grupo de processos para a Eutrofização no cenário convencional.</i>	109
<i>Figura 6.7 - Contribuição de cada grupo de processos para a Acidificação no cenário convencional.</i>	110
<i>Figura 6.8 - Contribuição de cada processo para a Formação de Oxidantes Fotoquímicos (FOF) no cenário convencional.</i>	111
<i>Figura 6.9 - Contribuição de cada grupo de processos para a Depleção de Recursos Abióticos no cenário convencional.</i>	111
<i>Figura 6.10 - Contribuição relativa de cada grupo de processos para a depleção de recursos abióticos no cenário alternativo CF.</i>	112
<i>Figura 6.11 - Contribuição relativa de cada grupo de processos na emissão dos principais poluentes atmosféricos no cenário alternativo CF.</i>	113
<i>Figura 6.12 - Contribuição relativa de cada grupo de processos na emissão de poluentes eutrofizantes no cenário alternativo CF.</i>	114
<i>Figura 6.13 - Contribuição relativa de cada grupo de processos do cenário alternativo CF para cada uma das cinco categorias de impacto selecionadas no presente estudo.</i>	114
<i>Figura 6.14 - Avaliação de impactes ambientais de cada um dos cenários estabelecidos (tonalidade escura - cenário convencional, tonalidade intermédia – cenário alternativo CF e tonalidade clara cenário alternativo CV).</i>	116
<i>Figura 6.15 – Contribuição de cada processo de produção de fertilizantes para os indicadores das categorias de impactes do grupo “fertilizantes” (tonalidade escura - cenário convencional, tonalidade intermédia – cenário alternativo CF e tonalidade clara cenário alternativo CV)</i>	117
<i>Figura 6.16 - Contribuição de cada processo de tratamento de resíduos (águas residuais e resíduos de embalagem) para os indicadores das categorias de impactes do grupo “Gestão de</i>	

*resíduos” (tonalidade escura - cenário convencional, tonalidade intermédia – cenário alternativo CF e tonalidade clara cenário alternativo CV)..... 118*

*Figura 6.17 - Contribuição de cada tipo de transportes para os impactes ambientais do grupo dos transportes (tonalidade escura - cenário convencional, tonalidade intermédia – cenário alternativo CF e tonalidade clara cenário alternativo CV). ..... 118*

*Figura 6.18 - Influência no indicador de AA da variação dos parâmetros sujeitos à análise de sensibilidade: volume de águas residuais e distâncias de percursos. .... 119*

*Figura 6.19 - Influência no indicador de AA da variação dos parâmetros sujeitos à análise de sensibilidade: volume de águas residuais e distâncias de percursos. .... 120*

## Índice de Tabelas

*Tabela 2.1 - Tipologia de cinzas resultantes do processo de combustão. .... 13*

*Tabela 2.2- Composição química (% bs) de cinzas de vários tipos de biomassa. Compilado por Pinto (2011). ..... 16*

*Tabela 2.3 – Estimativa de produção de cinzas por centrais de cogeração operadas com biomassa (adaptado de Coelho (2010)). ..... 17*

*Tabela 2.4 - Tipos de fertilizantes minerais, de acordo com os critérios de Harold F. Reetz (2016). ..... 23*

*Tabela 2.5 - Descrição de dispositivos de injeção utilizados no sistema de fertirrigação (Kafkafi e Tarchitzky, 2011). ..... 31*

*Tabela 2.6 - Vantagens e desvantagens do uso de hidroponia (Florencio, Bastos e Aisse, 2006; Lieten et al., 2004) ..... 32*

*Tabela 2.7 - Quadro de compatibilidade de fertilizantes (adaptado de Roddy (2006)(apud Kafkafi e Tarchitzky (2011)). ..... 36*

*Tabela 2.8 - Fertilizantes N usados em estufas de cultivo (<sup>1</sup> para químicos puros). ..... 37*

*Tabela 2.9 - Fertilizantes de K usados na hidroponia (<sup>2</sup>Para químicos puros). ..... 38*

*Tabela 2.10 - Fertilizantes de P usados em hidroponia (<sup>1</sup>Para químicos puros.;<sup>2</sup>Trademarks). ..... 38*

*Tabela 2.11 - Fertilizantes de Mg utilizados na hidroponia (<sup>1</sup>Para químicos puros). ..... 38*

*Tabela 2.12 - Fertilizantes de Ca utilizados em hidroponia (<sup>1</sup>Valores máximos). ..... 39*

*Tabela 2.13 - Principais fertilizantes de micronutrientes usados na hidroponia. .... 40*

*Tabela 3.1 - Critérios aplicados na seleção de fontes bibliográficas, para composição do lixiviado das cinzas. .... 54*

*Tabela 3.2- Dados relativos às referencias bibliográficas utilizadas para este estudo. .... 55*

*Tabela 3.3 - Composição média de vários elementos na solução de lixiviação de cinzas de fundo e cinzas volantes. .... 56*

*Tabela 3.4 - Tempos de amostragem pré-definidos e análises efetuadas..... 57*

*Tabela 4.1 - Fertilizantes utilizados, em cada tanque, no processo de produção hidropónico. .... 63*

*Tabela 4.2 - Caracterização das embalagens de fertilizantes usadas na unidade industrial. .... 64*

*Tabela 4.3 - Composição da solução nutritiva usada na fertirrigação na estufa da empresa Gotas Frescas (\*ferro quelatado)..... 66*

*Tabela 4.4 - Potencial de redução de fertilizantes de acordo com os recursos utilizados. .... 68*

*Tabela 5.1 - Categorias de impacte ambiental usadas neste estudo e respetivos indicadores, fatores de caraterização e modelo de caracterização (Heijungs et al., 1992). ..... 80*

*Tabela 5.2 – Processos usados na produção e distribuição de energia elétrica em Portugal Continental. .... 84*

*Tabela 5.3 - Tipologia de transporte de matérias e produtos pressuposta no âmbito deste estudo. .... 90*

<i>Tabela 5.4 - Dados de consumo de combustível assumidos para cada tipologia de transporte considerada neste estudo. ....</i>	<i>91</i>
<i>Tabela 5.5 - Mapa transportes para cada cenário definido. ....</i>	<i>93</i>
<i>Tabela 5.6 - Fatores de depleção de recursos abióticos de alguns combustíveis fósseis (Guinée et al. 2002). ....</i>	<i>98</i>
<i>Tabela 5.7 - Potenciais de acidificação de alguns gases (Huijbregts 1999). ....</i>	<i>99</i>
<i>Tabela 5.8 - Potenciais de aquecimento global de alguns GEE (IPCC 2006). ....</i>	<i>100</i>
<i>Tabela 5.9 - Potenciais de formação de oxidantes fotoquímicos de alguns compostos (Derwent et al. 1998; Jenkin &amp; Hayman 1999). ....</i>	<i>100</i>
<i>Tabela 5.10 - Potenciais de Eutrofização (PE) (Heijungs et al. 1992). ....</i>	<i>101</i>
<i>Tabela 5.11 - Cenários de estudo e respetivos parâmetros de inventário sujeitos à análise de sensibilidade. ....</i>	<i>102</i>
<i>Tabela 5.12 Função e unidade funcional do sistema. ....</i>	<i>102</i>
<i>Tabela 6.1 - Categorias estabelecidas, e respetivos processos agregados, na análise de ICV e ACV deste estudo. ....</i>	<i>104</i>

## Siglas e Acrónimos

AA	Alterações Climáticas	[kg CO <sub>2</sub> eq]
AC	Acidificação	[kg SO <sub>2</sub> eq]
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida	
AICV	Avaliação de Impactes do Ciclo de Vida	
Alt	Alternativo	
BFR	Biomassa Florestal Residual	
$\bar{C}$	Concentração	[mg/L]
CE	Condutividade Elétrica	[mS/cm]
CEC	Capacidade Permuta iões	
CF	Cinzas de Fundo	
CH	Suíça	
Conv	Convencional	
CTB	Central Termoelétrica a Biomassa	
CV	Cinzas Volantes	
DRA	Depleção de Recursos Abióticos	[kg Sb eq.]
DRA	Direção Regional do Ambiente	
ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais	
EU	Eutrofização	[kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq]
FOF	Formação de Oxidantes Fotoquímicos	[kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq]
GEE	Gases Efeito de Estufa	
GLO	Global	
HDPE	Polietileno de alta densidade	
ICV	Inventário do Ciclo de Vida	
ISO	<i>International Standart Organization</i>	
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>	
LDPE	Polietileno de baixa densidade	
LFB	Leito fluidizado Borbulhante	
LFC	Leito fluidizado Circulante	
LPDE	Polietileno de baixa densidade	
NFT	<i>Nutrient Film Technique</i>	
PAG <sub>100</sub>	Potencial de Aquecimento Global para um horizonte temporal de 100 anos	
PDRA	Potencial de Depleção de Recursos Abióticos	
PE	Potencial de Eutrofização	
PFOF	Potencial de Formação de Oxidantes Fotoquímicos	
PO	Potencial Osmótico	
PT	Portugal	
RER	Europa	
UE	União Europeia	
UF	Unidade Funcional	
UNECE	Comissão Económica das Nações Unidas	

VLE	Valores Limite Emissão
HFC	Hidrofluorcarbonetos

## Nomenclatura Química

Al	Alumínio
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de alumínio
As	Arsénio
B	Boro
C	Carbono
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	Glicose
Ca	Cálcio
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Nitrato de cálcio
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de cálcio
Ca <sup>2+</sup>	Ião cálcio
Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Silicato de cálcio
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de cálcio
CaO	Óxido de cálcio
Cd	Cádmio
CdCl <sub>2</sub>	Cloreto de cádmio
CH <sub>4</sub>	Metano
Cl	Cloro
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
Cr	Crómio
Cu	Cobre
Cu <sup>2+</sup>	Ião cobre
Fe	Ferro
Fe <sup>2+</sup>	Ião Fe (II)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Ferro(III)
Fe <sup>3+</sup>	Ião Fe (III)
H	Hidrogénio
H <sub>2</sub> O	Água
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Ião didrogenofosfato
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Ácido fosfórico
Hg	Mercúrio
HNO <sub>3</sub>	Ácido Nítrico
HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ião hidrogenofosfato
K	Potássio
K <sup>+</sup>	Ião potássio
K <sub>2</sub> O	Óxido de potássio
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sulfato de potássio
KH <sub>2</sub> PO <sub>5</sub>	Fosfato monopotássico

KNO <sub>3</sub>	Nitrato de potássio
KOH	Hidróxido de potássio
Li	Lítio
Mg	Magnésio
Mg <sup>2+</sup>	lão magnésio
Mg <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sulfato de magnésio
MgO	Óxido de magnésio
Mn	Manganês
MnO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	lão permanganato
N	Nitrogénio
N total	Nitrogénio total
N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso
Na	Sódio
Na <sub>2</sub> O	Óxido de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	lão amónio
Ni	Níquel
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	lão nitrato
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrogénio
O	Oxigénio
O <sub>2</sub>	Oxigénio (estado gasoso)
P	Fósforo
P total	Fósforo total
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Pentóxido de fósforo
Pb	Chumbo
PbCl <sub>2</sub>	Cloreto de chumbo
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	lão fosfato
S	Enxofre
Sb	Antimónio
Se	Selénio
Si	Silício
SiO <sub>2</sub>	Óxido de silício
SO <sub>2</sub>	Dióxido de enxofre
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	lão sulfato
SO <sub>x</sub>	Óxidos de enxofre
Th	Tório
TiO <sub>2</sub>	Dióxido de titânio
Zn	Zinco
Zn <sup>2+</sup>	lão zinco





# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO E RELEVÂNCIA DO TEMA

A Resolução do Conselho de Ministros nº 29/2010 estabelece a estratégia nacional para a Energia com o Horizonte 2020, que tem como objetivos a diminuição da dependência de Portugal dos combustíveis fósseis e o cumprimento das metas energéticas europeias estabelecidas no contexto das alterações climáticas. Para tal, é enaltecida a promoção e prioridade dos recursos energéticos renováveis na política energética nacional.

Portugal, apesar de ser um país com escassos recursos energéticos de origem fóssil, é detentor de um enorme potencial de exploração de fontes de energia renovável. Destas, a biomassa possui um grande potencial de exploração. Neste contexto, a biomassa pode ser definida como a matéria orgânica de origem vegetal ou animal, que pode ser utilizada como fonte de energia renovável, sob a forma de eletricidade, calor ou combustível (Marques, 2013).

Atualmente, a procura deste recurso tem crescido em setores industriais como o da cortiça e pasta de papel, que incorporam unidades de combustão dedicadas e de cogeração. Nestas é utilizada biomassa florestal residual (BFR) como combustível para produção de calor e eletricidade (Tarelho *et al.*, 2013).

Um dos problemas associados ao uso da biomassa como combustível sólido é a geração de grandes quantidades de um resíduo sólido com propriedades reativas: as cinzas (Demirbas, 2004). Embora não exista legislação que regule a sua gestão, a sua existência é premente, não só do ponto de vista económico mas também ambiental (Sá *et al.*, 2013).

A operação de gestão mais comum das cinzas provenientes da queima de biomassa é a deposição em aterro. No entanto, a crescente preocupação ambiental e a escassez de locais para construção de novos aterros resultaram num aumento das taxas de deposição, tornando cada vez mais importante a realização de estudos de métodos/alternativas de valorização deste resíduo.

Uma das opções de valorização mais conhecidas de cinzas é a sua aplicação no solo. Propriedades intrínsecas como o elevado teor de nutrientes e o forte carácter alcalino tornam esta opção atrativa do ponto de vista de reciclagem de nutrientes no solo, e da redução do uso de fertilizantes.

Paralelamente, o rápido crescimento da população mundial coloca sérios desafios à produção global de alimentos e, conseqüentemente, à sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Mózner, Tabi e Csutora, 2012). A intensificação da agricultura tem potenciado quer o declínio da fertilidade do solo quer a sua erosão, levando a um aumento das quantidades de fertilizantes aplicados para maximizar a produtividade (Ayala e Prakasa Rao, 2002). No entanto, os fertilizantes aplicados de forma tradicional não são utilizados eficientemente pelas culturas, o que resulta num excesso de nutrientes que, por lixiviação e escoamento superficial, provoca a contaminação de solos e massas de água (Mózner, Tabi e Csutora, 2012).

A fertirrigação surge neste contexto como uma técnica de fertilização que maximiza a eficiência da aplicação de fertilizantes, ao promover a sua aplicação nas zonas com maior atividade radicular das plantas. Ao mesmo tempo, são minimizados os custos de produção e potenciada a proteção do ambiente e o uso sustentável dos recursos hídricos. Nesta técnica, os fertilizantes são dissolvidos na água de irrigação que, por sua vez, os transporta até às plantas (Kafkafi e Tarchitzky, 2011).

A fertirrigação é praticada em culturas no solo, em substratos, e forçosamente na hidroponia. Nesta técnica de cultivo o solo é substituído por uma solução aquosa, contendo (idealmente) todos os nutrientes necessários às plantas (Resh, 1997). Relativamente a esta técnica, encontram-se na literatura vários estudos efetuados acerca da reciclagem de nutrientes a partir da valorização de resíduos, nomeadamente aplicados a águas residuais (Mavrogianopoulos, Vogli e Kyritsis, 2002) e resíduos orgânicos (Mackowiak *et al.*, 1996).

A composição das cinzas de biomassa confere-lhes potencial de valorização como fonte de nutrientes, passível de ser usada na hidroponia, em detrimento do uso de fertilizantes químicos industriais. Porém, é importante avaliar os impactes ambientais decorrentes desta opção de valorização e compará-los com a realidade do cenário de gestão mais comum atualmente: a deposição em aterro.

## 1.2 OBJETIVOS E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho visa a avaliação dos impactes ambientais associados à integração de cinzas de biomassa, como fonte de nutrientes, num plano de fertilização de uma planta hortícola cultivada pela técnica de hidroponia.

Na condução deste estudo foram estudados dois cenários:

- Cenário convencional (ou cenário base), no qual são usados exclusivamente fertilizantes químicos industriais na produção da planta hortícola, e as cinzas biomassa são depositadas em aterro;
- Cenário alternativo, no qual as cinzas de biomassa são desviadas do aterro para serem usadas, a par com fertilizantes químicos convencionais, no plano de fertilização para a produção da planta hortícola de estudo.

A ferramenta usada neste trabalho foi a *Life Cycle Assessment* (LCA) ou Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), cuja metodologia se encontra descrita na norma ISO 14044:2006.

Para atingir os objetivos estabelecidos, foi elaborada uma revisão bibliográfica sobre a produção de cinzas de biomassa e respetiva prática de gestão atual, e sobre o sistema de fertirrigação e hidroponia, apresentada no Capítulo 2. Ainda no mesmo capítulo, são descritas cada uma das fases da metodologia de ACV, segundo as normas ISO 14040 (ISO, 2006) e ISO 14044 (ISO, 2006).

No Capítulo 3 é abordada a composição média do lixiviado de cinzas, com base em referências bibliográficas.

Posteriormente, no Capítulo 4, é efetuada a caracterização da unidade industrial que pratica o método de fertirrigação no cultivo de hortícolas, bem como o cálculo do potencial de redução de fertilizantes.

A aplicação da ACV à valorização de cinzas de biomassa é abordada no Capítulo 5, iniciando-se com a definição de objetivo e âmbito, seguida da recolha de dados de inventário e, por último, a apresentação da metodologia de avaliação de impactes.

O Capítulo 6 é reservado para apresentação e discussão dos resultados obtidos pela aplicação da metodologia de ACV.

Por fim, as principais conclusões resultantes deste estudo são apresentadas no Capítulo 7, juntamente com algumas propostas de trabalhos futuros.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 INTRODUÇÃO

Para uma visão integrada do presente estudo, é necessário um enquadramento geral das diversas áreas envolventes. Neste sentido, o presente capítulo está dividido em quatro tópicos, de acordo com o representado na figura seguinte.



Figura 2.1 - Tópicos incluídos na revisão bibliográfica do presente estudo.

No estudo de valorização de um resíduo num processo, é fundamental o conhecimento da caracterização do material como a composição química, origem e propriedades potenciais na sua aplicação. Neste contexto, o Subcapítulo 2.3 está reservado ao tópico “cinzas de biomassa”. Como já referido, o processo de valorização de cinzas em estudo é a sua aplicação no processo de produção agrícola de plantas hortícolas, na qual a importância dos nutrientes e fertilização são das variáveis mais importantes, sendo por isso abordadas no Subcapítulo 2.4. A técnica de produção agrícola usada é a fertirrigação sem solo, designada de hidroponia, ficando uma breve descrição desta técnica reservada ao Subcapítulo 2.5. Por último, no Subcapítulo 2.6 encontra-se uma breve abordagem à metodologia de ACV, com a definição das principais fases correspondentes.

### 2.2 BIOMASSA COMO RECURSO ENERGÉTICO

A utilização da biomassa em processos de combustão apresenta grandes vantagens devido a algumas propriedades físicas intrínsecas, como elevada volatilidade ou elevada reatividade. Alguns dos problemas mais frequentemente associados à sua utilização são o elevado teor de humidade ou a composição elementar bastante variável (Demirbas, 2004). Tal variabilidade advém de vários

fatores, tais como: método de desbaste e tipo de solo (Thy *et al.*, 2006), crescimento e fatores de produção; clima; época de armazenamento; origens geográficas da biomassa (Ahmaruzzaman, 2010; Saidur *et al.*, 2011; Wiselogle *et al.*, 1996) ou ainda o pré-tratamento a que a biomassa pode ser submetida. Para este último, um dos processos conhecidos é a lixiviação com água, que permite a redução dos teores de metais alcalinos e cloretos (Anexo A). Todavia, apesar dos benefícios, este tipo de procedimento implica um aumento dos custos associados ao processo de combustão (Jenkins *et al.*, 1998; Koppejan e Loo, Van, 2008; Nordgren *et al.*, 2013).

Num processo de combustão, a análise da composição e propriedades do combustível é um elemento chave para a maximização da eficiência, pois estas poderão ser responsáveis por inúmeros problemas operacionais do processo (Vassilev *et al.*, 2010). Para além disso, é de referir que os tipos de biomassa utilizados, bem como os teores de inorgânicos presentes em cada tipo, influenciam não só o processo de combustão em si mas também a quantidade de energia gerada (Anexo B). Por outras palavras, o conteúdo energético do combustível é inversamente proporcional à quantidade de inertes presentes na biomassa (McKendry, 2002). Além disso, é expectável que um maior teor de inertes neste combustível esteja associado não só a uma maior produção de cinzas, mas também a problemas operatórios durante o processo de conversão energética. Para o caso frequente de combustão em leito fluidizado, um combustível com uma fração inorgânica mais rica em silício (Si), sódio (Na) e potássio (K) poderá ter maior tendência a causar problemas como a aglomeração do material do leito, incrustações e corrosão, que diminuem a eficiência e tempo de vida dos equipamentos (Fang e Jia, 2012; Sá *et al.*, 2013; Werkelin *et al.*, 2011).

## 2.3 CINZAS DE BIOMASSA

Concettualmente, a cinza de biomassa pode ser definida como a fração não-combustível resultante do processo de combustão, incluindo o grosso da fração mineral da biomassa original (Khan *et al.*, 2009). Dependendo da eficiência de combustão, a cinza pode apresentar alguma matéria orgânica residual não queimada (Vassilev *et al.*, 2013). Estas cinzas são distintas das cinzas de carvão, podendo apresentar maiores concentrações de certos elementos como metais alcalinos e ainda sílica (Grammelis, 2011).

Nos últimos anos, a promoção da utilização da biomassa como fonte de combustível para a produção de energia térmica e elétrica tem aumentado substancialmente não só em Portugal, mas também em toda a União Europeia (UE). Inevitavelmente, o aumento da utilização deste combustível é acompanhado por um aumento dos resíduos de combustão, nomeadamente as cinzas.

Deste modo, esta tendência sublinha a importância do desenvolvimento de opções de valorização que promovam a utilização eficiente das cinzas, do ponto de vista económico e ambiental.

Neste âmbito, ao longo do presente subcapítulo serão abordados vários aspetos relevantes sobre este material como a origem, a composição, o potencial de valorização, entre outros.

### 2.3.1 Origem das cinzas

As cinzas de biomassa são, maioritariamente, produzidas por processos de conversão termoquímica. O processo mais utilizado é a combustão, sendo responsável por 97% da produção mundial de bioenergia (Demirbas, 2004). Outros processos encontram-se em fase de desenvolvimento para aplicação à escala industrial, como a gasificação e a pirólise (Tarelho *et al.*, 2013).

Para a combustão, o dimensionamento da unidade pode ser de pequena escala (para aquecimento doméstico, com potências de alguns KWth) até grande escala (com potência superior a 200 MWth). Em Portugal, a tecnologia de combustão em leito fluidizado é a predominante em unidades industriais de combustão de biomassa, dedicadas e de cogeração (Tarelho *et al.*, 2013). Nestas, o combustível utilizado é a biomassa florestal residual, que é composta maioritariamente pela “fração remanescente do abate de árvores (que inclui topos, ramos, cascas e cepos) e do processamento da madeira da indústria de madeira e pasta de papel” para as duas principais espécies de floresta portuguesa: o eucalipto (*Eucalyptus globulus*) e o pinheiro (*Pinus pinaster*) (Tarelho *et al.*, 2013).

#### 2.3.1.1 Tecnologias de conversão energética

Dentro do processo de combustão, existem vários tipos de tecnologia, nomeadamente a combustão em grelha, leito fixo, leito fluidizado e em leito pulverizado. De acordo com Saidur *et al.* (2011), Tarelho *et al.* (2013) e Grammelis (2011), a combustão em leito fluidizado é considerada a melhor tecnologia à escala industrial. Esta proporciona vantagens inerentes da operação isotérmica a temperaturas relativamente mais baixas e ainda a flexibilidade de uso de combustível de baixa qualidade (elevado teor de cinzas e/ou baixo poder calorífico). Para este tipo de tecnologia, o combustível utilizado pode ser exclusivamente biomassa ou uma mistura de biomassa e outro combustível, como o carvão (Yin, Rosendahl e Kær, 2008).

Nas subsecções seguintes, será feita uma caracterização das tecnologias de combustão mais utilizadas: combustão em grelha e em leito fluidizado.

##### Combustão em grelha

A combustão em grelha foi o primeiro sistema de combustão usado para combustíveis sólidos. Atualmente é usado principalmente na combustão de biomassa, mas também em pequenas centrais de cogeração alimentadas a biomassa. Um sistema de combustão em grelha compreende quatro etapas fundamentais (*vide* Figura 2.2): o alimentador de combustível, a grelha, a entrada de ar primário e secundário, e ainda o coletor de cinzas.

Numa primeira fase, o combustível é introduzido na fornalha, de forma automática. Este é transportado, longitudinalmente, pela grelha que se situa abaixo da câmara de combustão, permitindo a entrada e distribuição de ar primário, por baixo desta. As grelhas podem ser

classificadas como grelhas estacionárias, grelhas móveis, grelhas recíprocas ou grelhas vibratórias (Yin, Rosendahl e Kær, 2008).

O sistema de injeção de ar, muito importante para a eficiência de combustão, está dividido em ar primário e ar secundário. O ar primário, ou ar de combustão, é distribuído com o movimento da grelha, funcionando o ar secundário como meio de promoção da redução da formação de  $\text{NO}_x$  na zona de *burnout*, promovendo igualmente a mistura de gases do leito de combustão (Yin, Rosendahl e Kær, 2008).

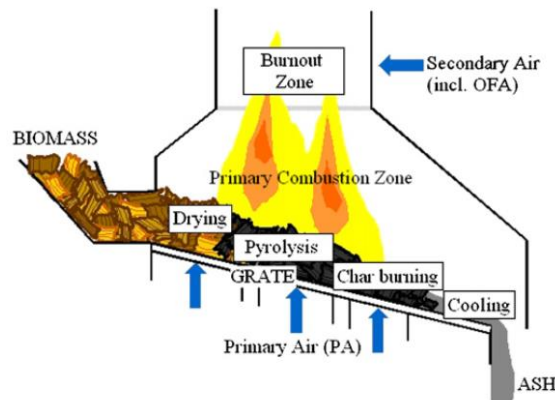


Figura 2.2 - Representação esquemática do sistema de combustão em grelha, com a entrada do combustível, as várias fases da combustão e ainda a localização das entradas de ar (PA – ar primário; SA – ar secundário) (Yin, Rosendahl e Kær, 2008).

### Combustão em leito fluidizado

A tecnologia de combustão em leito fluidizado foi desenvolvida em 1970 com o intuito de ser aplicada à produção de energia a partir de carvões com alto teor de enxofre. O princípio geral desta tecnologia reside na queima do combustível numa massa de ar suspensa de partículas inertes (leito). Comparativamente à massa de combustível, a massa de leito utilizada é bastante superior (2% e 98%, respetivamente), o que, aliado à grande capacidade calorífica do material, permite uma estabilização do fluxo energético, apesar das variações do poder calorífico do combustível. Esta tecnologia permite ainda o controlo de emissões atmosféricas como  $\text{SO}_x$  e  $\text{NO}_x$ , através da utilização de aditivos no material do leito, como dolomite ou calcário, que têm a função de absorver o enxofre libertado. O controlo das emissões de  $\text{NO}_x$  é efetuado a partir da estabilização da temperatura de combustão entre os 800 e 900°C (Grammelis, 2011).

O material do leito é normalmente constituído por material inerte, como areia (sílica) e/ou cinza, com a possível adição de carbonato de cálcio como adsorvente. O leito está localizado na base da caldeira, sob uma placa com bocais de distribuição de ar. Através destes é feita a introdução de ar primário, que provoca forças de arrasto das partículas que vão contrabalançar a força gravítica das mesmas, até se atingir uma velocidade de fluidização adequada. Dependendo da velocidade do ar primário, distinguem-se dois tipos de combustão em leito fluidizado: borbulhante (LFB) e circulante (LBC). No LFB, a velocidade do ar é relativamente baixa sendo que as partículas inertes mantêm-se no leito, apesar de estarem em movimento. Num LFC, parte do material do leito está constantemente a ser elutriado, devido à velocidade do ar primário ser relativamente elevada. Para



manter um rácio de material do leito/combustível constante, as partículas inertes são recolhidas em ciclones e reintroduzidas na fornalha. Em ambos os sistemas, a temperatura de operação é relativamente baixa, na gama dos 800-900°C. O processo de combustão, para os sistemas apresentados, encontra-se esquematizado na figura seguinte.

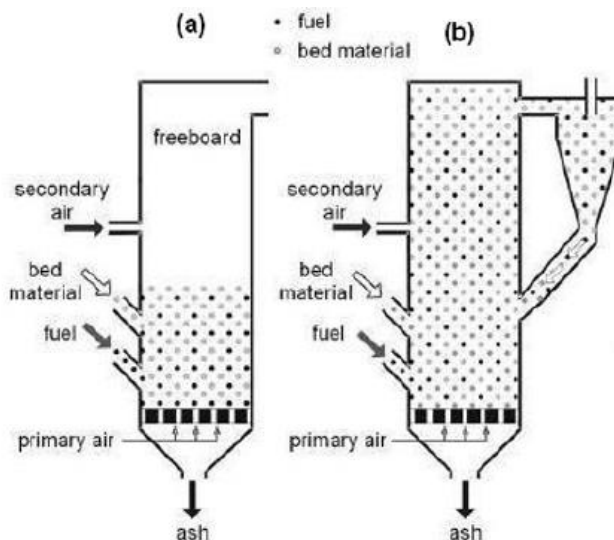


Figura 2.3 - Esquema de funcionamento de uma câmara de combustão de: (a) leito fluidizado borbulhante e (b) leito fluidizado circulante (Grammelis, 2011).

### 2.3.1.2 Processo de formação de cinzas

O processo de formação de cinzas, durante a combustão de biomassa, varia consoante a tecnologia de conversão energética utilizada. Deste modo, nas subsecções seguintes é descrita sumariamente a formação de cinzas para cada tecnologia anteriormente referida.

#### Combustão em grelha

A formação e emissão de matéria particulada na combustão de biomassa tem sido alvo de atenção devido à possibilidade de presença de elementos tóxicos em concentrações relativamente altas. A formação de cinzas durante a combustão de biomassa em grelha encontra-se representada na Figura 2.4.

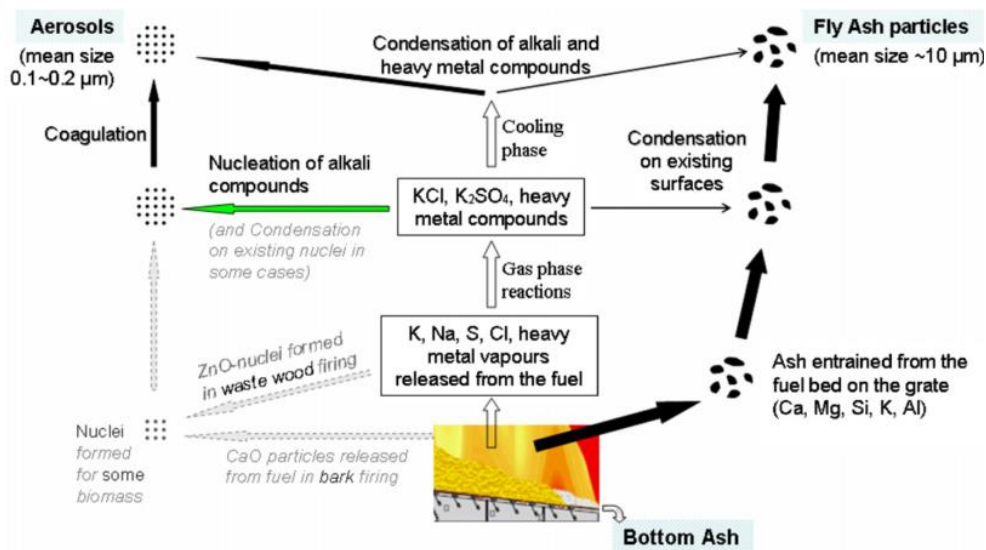


Figura 2.4 - Esquema representativo da formação de cinzas, durante a combustão de biomassa, em tecnologia de grelha. (Yin, Rosendahl e Kær, 2008).

Parte dos elementos orgânicos contidos no combustível podem ser libertados e formar espécies inorgânicas e matéria particulada, enquanto que o remanescente forma as cinzas de fundo. Na Figura 2.4, pode observar-se a formação de três fluxos de matéria particulada: (i) os aerossóis, com partículas de diâmetro entre 0,1 e 0,2  $\mu\text{m}$ , formados a partir de processos de nucleação e condensação da fase gasosa; (ii) as cinzas volantes, que consistem em resíduos de cinza não volatilizáveis, apresentando diâmetro médio de 10  $\mu\text{m}$ ; (iii) as partículas de maior dimensão, que constituem as cinzas de fundo. Este último fluxo mássico depende de vários fatores como tipo de grelha utilizado e ainda as propriedades do resíduo (Yin, Rosendahl e Kær, 2008). Uma parte significativa das cinzas volantes é retida pelos sistemas de despoeiramento do efluente gasoso.

Os metais mais voláteis, como é o caso do mercúrico (Hg), tório (Th) ou selénio (Se), são completamente vaporizados e libertados na atmosfera com o gás de combustão ou condensados nas superfícies dos aerossóis e partículas de cinza volante (Yin, Rosendahl e Kær, 2008).

### Combustão em leito fluidizado

À semelhança da combustão em grelha, num sistema de combustão em leito fluidizado são formados dois tipos de cinza: cinzas de fundo e cinzas volantes. As cinzas de fundo consistem maioritariamente em partículas de quartzo agregadas, e são formadas a partir da deposição de cinzas sobre a superfície da areia, bem como pela difusão de K, Na e Zn no material do leito (areia). As cinzas volantes são formadas pela nucleação de espécies volatilizadas. Destas, as partículas de diâmetros inferiores são formadas por processos que dependem de fatores como a coagulação na fornalha. As cinzas volantes mais grosseiras são constituídas pelas espécies não-voláteis da cinza, e formam-se por coalescência e aglomeração. A estrutura aglomerativa destas partículas torna-as eficazes na adsorção de espécies voláteis, podendo ter um efeito significativo na tendência de deposição de partículas (Lind *et al.*, 2000).

A formação de ambos os tipos de cinza pode ser visualizado esquematicamente na Figura 2.5.

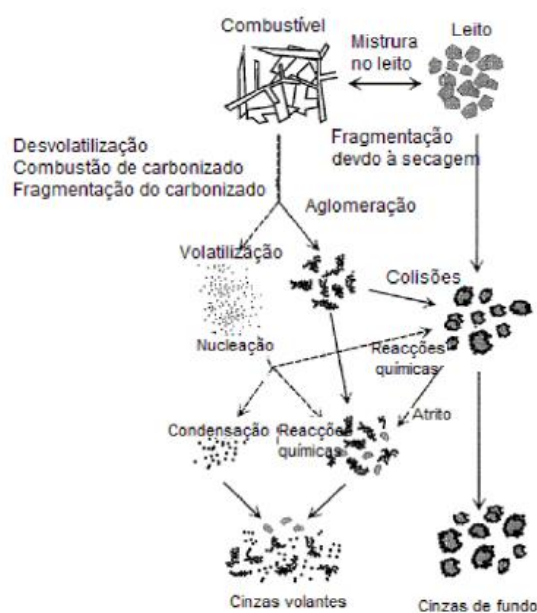


Figura 2.5 - Representação dos mecanismos de formação de cinzas volantes (à esquerda) e de fundo (à direita) num processo de combustão de biomassa, em leito fluidizado (Pinto, 2011).

Os fenómenos de aglomeração são acentuados pela presença de metais alcalinos e sílica, provocando uma diminuição do ponto de fusão das cinzas. Apesar de uma fração significativa de metais alcalinos ser libertada para a fase gasosa, especialmente com a presença de cloro, a fração restante, na fase sólida, é suficiente para originar problemas de aglomeração (Grammelis, 2011).

Relativamente aos metais pesados, o fracionamento destes pelos vários fluxos de cinza depende de vários fatores, tais como: temperatura de combustão, distribuição de ar no leito, propriedades químicas e físicas do combustível, distribuição de tamanhos das partículas nas cinzas volantes, e ainda concentrações destes metais nos gases circundantes (Oberberger *et al.*, 1997). Uma fração relativamente pequena destes elementos mantém-se no leito, enquanto que a fração maioritária é arrastada com as cinzas volantes (Grammelis, 2011).

Elementos não voláteis, como Fe, Cr, Cu e Al, têm tendência a formar óxidos e a acumular-se em partículas grosseiras de cinza, que são recolhidas nos sistemas de despoejamento do efluente gasoso (Khan *et al.*, 2009).

A maioria dos elementos voláteis é adsorvida em partículas finas de cinza, pois a grande área superficial destas partículas atua como um dissipador de vapores metálicos (Oberberger, Brunner e Bärnthaler, 2006). Consequentemente, quantidades significativas de metais pesados voláteis escapam, pela chaminé, nas partículas finas. Elementos como o cloro, assim como metais alcalinos, facilitam a transferência de metais voláteis, como o Cd, Pb, As e Zn para as cinzas volantes na forma de cloretos e óxidos (Khan *et al.*, 2009).

Elementos como Cd e Pb são convertidos em  $CdCl_2$  /  $PbCl_2$  durante o processo de combustão. O Zn pode ser também volatilizado como cloreto. No entanto, devido à formação de formas de óxido estáveis, uma quantidade significativa de Zn mantém-se nas cinzas do combustível, podendo ser

recuperado no sistema de despoejamento. Os elementos As e Sb apresentam um comportamento semelhante, porém as concentrações são tipicamente menores (Grammelis, 2011).

### 2.3.1.3 Fluxos de cinzas

De acordo com Tarelho *et al.* (2013), na combustão em leito fixo, a maior fração mássica de cinzas corresponde às cinzas de fundo, enquanto que na tecnologia de leito fluidizado são as cinzas volantes que predominam.

Porém, segundo este autor, a mesma tecnologia operada com combustíveis distintos na sua composição pode originar diferentes quantidades relativas de cinzas de fundo e cinzas volantes. Esta hipótese aplica-se particularmente à tecnologia de combustão em leito fluidizado, em que as cinzas de fundo podem representar a maior fração mássica no caso de utilização de biomassa de baixa qualidade. Tal efeito é provocado por elevados teores de material inerte (partículas de solo florestal) que é introduzido no processo de combustão juntamente com a biomassa.

Numa central de conversão termoquímica, a produção de cinzas pode ter fluxos distintos (*vide* Figura 2.6) que são, posteriormente, misturados e geridos conjuntamente (Tarelho *et al.*, 2013).

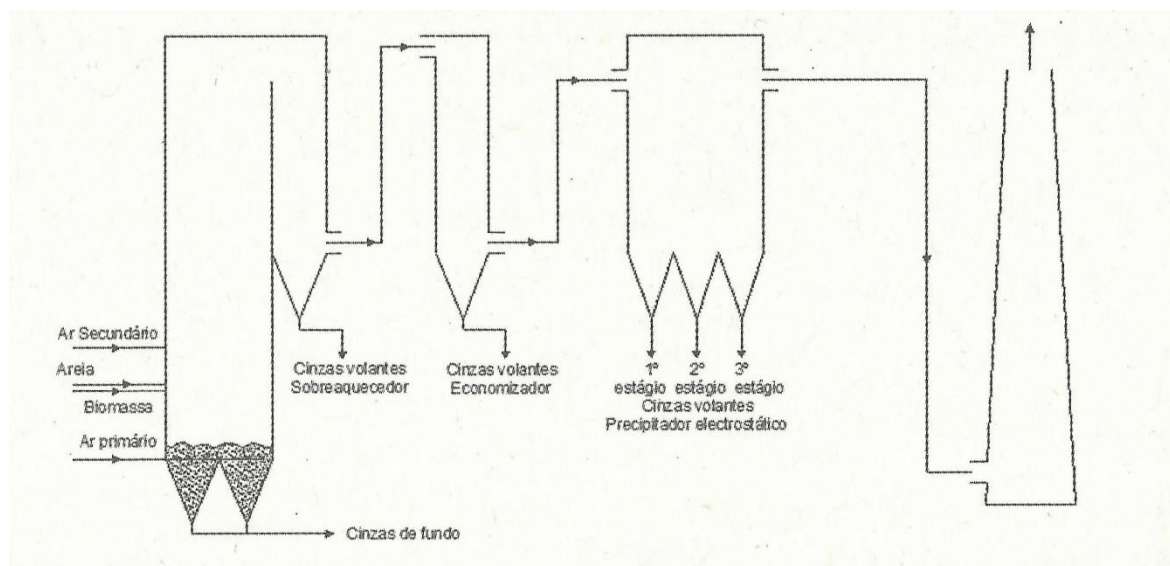


Figura 2.6 - Representação dos diferentes fluxos de cinza, numa central de combustão de biomassa em leito fluidizado (Tarelho *et al.*, 2013).

De modo geral, os principais fluxos de cinza são as cinzas de fundo e as cinzas volantes que, de acordo com a Tabela 2.1, são recolhidas em diferentes fases ao longo de uma central de conversão termoquímica.

Tabela 2.1 - Tipologia de cinzas resultantes do processo de combustão.

<i>Fluxos de cinzas</i>		<i>Descrição</i>
<i>Cinzas de fundo</i>		As cinzas de fundo correspondem às partículas de maior tamanho, retidas na câmara de combustão (na grelha de combustão ou misturadas com partículas do leito, conforme a tecnologia).
<i>Cinzas volantes</i>	“grosseira” – recolhida em separadores ciclónicos	As cinzas volantes são partículas caracterizadas por uma granulometria mais fina e, devido a isso, são arrastadas com o gás de combustão, podendo ser recolhidas em sobre-aquecedores e economizadores e equipamentos de despoejamento (ciclones, filtro de mangas, precipitadores electrostáticos), de acordo com a sua dimensão (Koppejan e Loo, Van, 2008; Tarelho <i>et al.</i> , 2015).
	“fina” – recolhida em precipitadores electrostáticos (Khan <i>et al.</i> , 2009)	

De acordo com alguns autores (Augusto, Bakker e Meredieu, 2008; Stankowski, Maciorowski e Gibczynska, 2012; Vassilev *et al.*, 2013; Zevenhoven-Onderwater *et al.*, 2001), a geração de cinzas num processo de combustão de biomassa depende de vários fatores como:

- Tipo e origem da biomassa utilizada (espécie e origem da planta, parte anatómica da planta, idade da planta, etc.);
- Transporte e armazenamento da biomassa;
- Condições operatórias (tempo de residência, pré-tratamento do combustível, temperatura de combustão);
- Tecnologia de despoejamento.

Estes fatores influenciam certas propriedades das cinzas, particularmente a distribuição de tamanhos, a morfologia e microestruturas, a densidade e a porosidade, a área superficial, o pH, a mineralogia e ainda a composição química da lixiviação (Tarelho *et al.*, 2013). Alguns destes parâmetros serão abordados no subcapítulo seguinte.

### 2.3.2 Caracterização física e química

A caracterização das cinzas resultantes da combustão de biomassa é essencial não só para o conhecimento e controlo do seu impacto na eficiência da combustão, mas também na gestão ambiental deste resíduo.

### 2.3.2.1 Distribuição de tamanhos

A dimensão média das cinzas de fundo é superior à das cinzas volantes. Por outro lado, estas últimas possuem uma menor massa volúmica e uma maior área específica (Tarelho *et al.*, 2013). Um exemplo de distribuição de tamanhos de partículas para cinzas de fundo e volantes, provenientes de um leito fluidizado, pode ser observada na Figura 2.7.

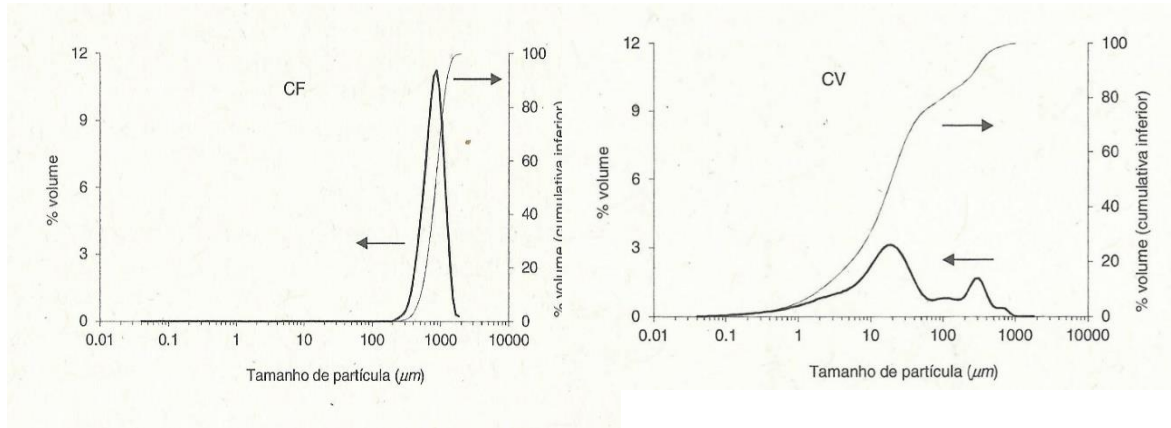


Figura 2.7 - Distribuição de tamanhos de partículas, para cinzas de fundo (CF) e cinzas volantes (CV), resultantes da combustão de biomassa num leito fluidizado borbulhante (Tarelho, L. *et al.*, 2013).

Em termos granulométricos, as CF são maioritariamente constituídas por partículas com tamanhos entre 400 e 2000  $\mu\text{m}$  ao passo que as CV apresentam uma distribuição de tamanhos de partículas mais extensa, entre 10 e 100  $\mu\text{m}$ .

### 2.3.2.2 pH e condutividade elétrica

As cinzas possuem características alcalinas, com pH na gama 10-13. Na figura seguinte encontram-se representados valores experimentais de pH obtidos na caracterização de CF e CV provenientes de um leito fluidizado, que comprovam esta informação..

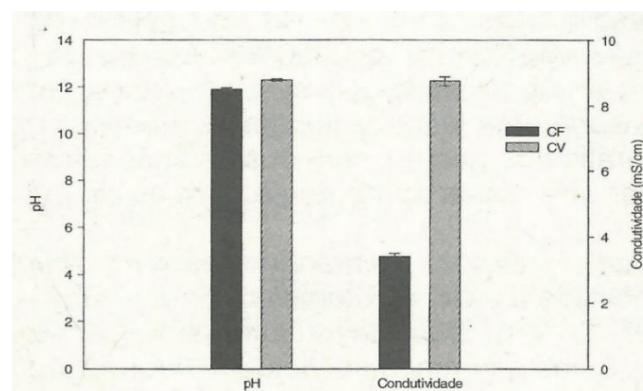


Figura 2.8 - Valores de pH e condutividade de cinzas de fundo (CF) e cinzas volantes (CV) resultantes da combustão de biomassa num leito fluidizado borbulhante (Tarelho *et al.*, 2013).

O pH e a condutividade elétrica dos lixiviados das cinzas dependem da composição das mesmas. Assim, para o exemplo ilustrado na Figura 2.8, verifica-se que as CF possuem um pH ligeiramente inferior ao das CV, e uma condutividade elétrica significativamente mais baixa.

Este fenómeno está relacionado com as características de solubilidade dos compostos e elementos químicos presentes em cada tipo de cinzas (Tarelho *et al.*, 2013).

É expectável que os fatores elencados no final do subcapítulo anterior não só influenciem a geração de cinzas, mas também a sua composição e características, onde se incluem o pH e a condutividade elétrica aqui em discussão.

### 2.3.2.3 Composição química

Como já referido, a composição química das cinzas é fortemente influenciada pelo tipo de biomassa utilizado como combustível, bem como pela tecnologia de combustão utilizada (Ingerslev *et al.*, 2011; Tarelho *et al.*, 2013).

Um exemplo da variação da composição dos principais fluxos de cinza, de acordo com a tecnologia de combustão utilizada, nomeadamente leito fluidizado (LFB) e leito fixo (G), pode ser observada na Figura 2.9.

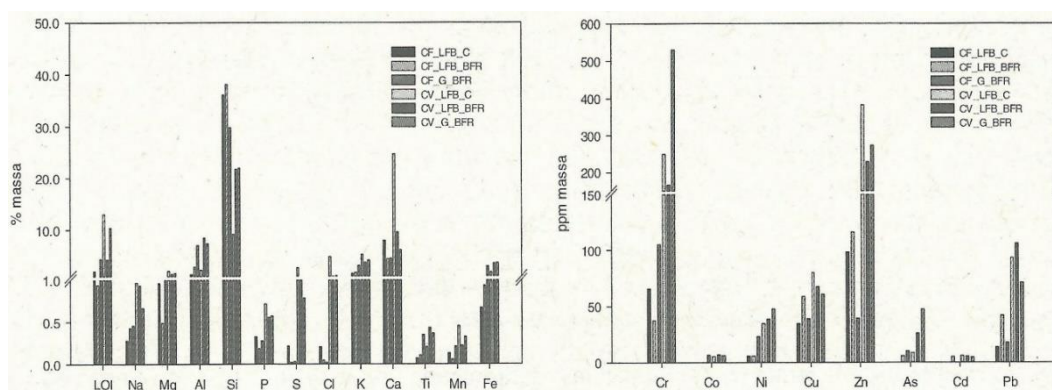


Figura 2.9 - Elementos químicos maioritários e alguns metais pesados nas CF e CV de uma unidade de LFB que utiliza como combustível casca de eucalipto e BFR - biomassa florestal residual (Tarelho *et al.*, 2013).

Genericamente, os elementos químicos maioritários na composição inorgânica das cinzas são o Si, Ca, K, Al, e o Fe. As concentrações de certos elementos, como o Si, estão implicitamente relacionados com as características da tecnologia de combustão, como é o caso da tecnologia de leito fluidizado, na qual é usada areia como leito (Tarelho *et al.*, 2013).

As CV são mais enriquecidas em elementos químicos da componente inorgânica da biomassa como Ca, Na, Mg, K e P, relativamente às CF. A relativa abundância de metais pesados nas CV é fruto dos processos físico-químicos a que esses elementos estão sujeitos durante a combustão termoquímica da biomassa (Tarelho *et al.*, 2013), referidos no Subcapítulo 2.3.1.2.

A concentração dos microelementos é também bastante variável. Pela Figura 2.9, o microelemento com maior concentração é o Fe, o que vai ao encontro do reportado por outros autores (Demeyer,

Voundi Nkana e Verloo, 2001). Porém, a presença de metais pesados como Pb, Cd, Ni, Cu pode condicionar a valorização deste resíduo nos solos (Khan *et al.*, 2009). De acordo com o estudo em análise e com resultados de outros autores (Dahl *et al.*, 2009; Demeyer, Voundi Nkana e Verloo, 2001; Narodoslowsky e Obernberger, 1996), estes metais tendem a concentrar-se essencialmente nas cinzas volantes.

Outros elementos presentes nas cinzas como o Mn e o B, geralmente em concentrações elevadas, conferem às cinzas propriedades semelhantes aos agentes de calagem convencionais (Demeyer, Voundi Nkana e Verloo, 2001).

Relativamente à influência do tipo de biomassa na composição das cinzas, na Tabela 2.2 encontram-se compilados os resultados de vários autores.

Tabela 2.2- Composição química (% bs) de cinzas de vários tipos de biomassa. Compilado por Pinto (2011).

Biomassa	SiO <sub>2</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Referência
Florestal	20,65	47,55	10,23	5,05	2,99	7,20	1,42	2,91	1,60	0,40	Zevenhoven-Onderwater <i>et al.</i> (2001)
Casca de eucalipto	10,04	57,74	9,29	2,35	3,10	10,91	1,12	3,47	1,86	0,12	Theis <i>et al.</i> (2006)
Estilha de Pinheiro	68,18	7,89	4,51	1,56	7,04	2,43	5,45	1,19	1,20	0,55	Tortosa Masiá <i>et al.</i> (2007)
Oliveira	10,24	41,47	25,16	10,75	2,02	3,03	0,88	2,65	3,67	0,13	Vamvuka e Kakaras (2011)
Casca de arroz	77,20	2,46	12,59	0,98	0,55	2,71	0,50	1,18	1,79	0,04	Thy <i>et al.</i> (2006)

### 2.3.2.4 Mineralogia

Em termos mineralógicos, Vassilev *et al.* (2013) classifica os compostos presentes na cinza, de acordo com a sua formação e origem, em:

- Elementos primários - elementos existentes na biomassa original, que se mantêm na cinza após combustão;
- Secundários - elementos formados durante a combustão;
- Terciários - elementos formados durante a fase de transporte e armazenamento da cinza, antes da sua utilização.

O carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) destaca-se como o componente maioritário nas cinzas (Demeyer, Voundi Nkana e Verloo, 2001). Todavia, outros minerais de cálcio podem ser encontrados nas cinzas como CaO, Ca(OH)<sub>2</sub> e Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>. Segundo Vassilev *et al.* (2013), os minerais podem ser ordenados por ordem crescente de abundância na cinza da seguinte forma: silicatos > óxidos e hidróxidos > sulfatos > fosfatos > carbonatos > cloretos > nitratos. Para temperaturas de combustão abaixo dos 500°C, predominam os carbonatos e bicarbonatos, enquanto que acima de 1000°C prevalecem os óxidos (Etiégni e Campbell, 1991).



### 2.3.3 Estimativa da produção de cinzas

As informações relativas às quantidades de cinzas produzidas atualmente em centrais termoelétricas e de cogeração a biomassa são bastante escassas.

Apesar desta omissão, Obernberger e Supancic (2009) estimam uma produção anual cerca de 5,6 milhões de toneladas, para a EU-27. No entanto, este mesmo estudo aponta para um aumento da produção de cinzas de biomassa, na EU-27, na ordem das 15,5 milhões de toneladas anuais, se forem atingidas as metas para a Europa 2020, relativamente ao consumo de energia primária proveniente da biomassa.

Em Portugal, a associação de indústria papeleira avança que a produção de cinzas por este sector, no ano de 2014, rondou as 100 Mt (CELPA, 2014). A evolução da produção de cinzas, entre outros fluxos de resíduos, por este tipo de indústria, pode ser visualizada na Figura 2.10.

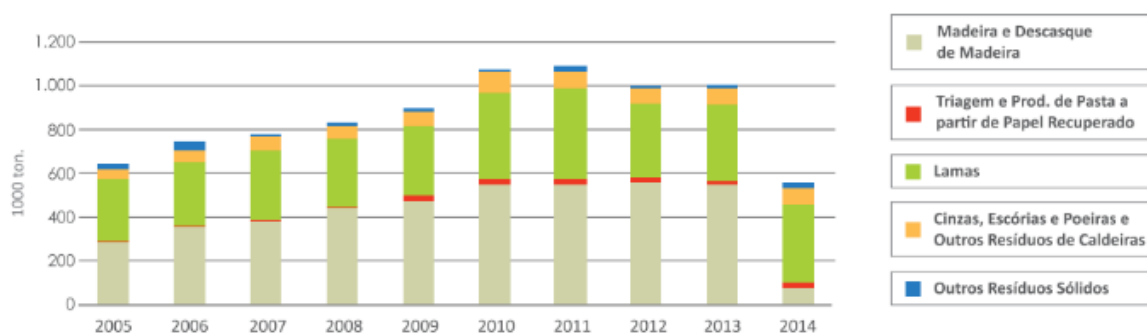


Figura 2.10 - Evolução da produção de resíduos sólidos na indústria papeleira (CELPA, 2014).

Para outros setores industriais, como CTB, a informação escasseia. No entanto, Coelho (2010) estimou uma produção de cerca de 90100 t/ano em 2010 e uma produção futura de cerca de 204800 t/ano (vide Tabela 2.3).

Tabela 2.3 – Estimativa de produção de cinzas por centrais de cogeração operadas com biomassa (adaptado de Coelho (2010)).

Produção anual [t bs/ano]	CF	CV	Total
<b>Ano 2010</b>	35865	54237	90102
<b>Futuro</b>	69837	135003	204840

## **2.3.4 Gestão de cinzas**

### ***2.3.4.1 Enquadramento legal***

De acordo com a legislação em vigor (Decreto-Lei n.º 73/2011, 2011), o responsável pela gestão das cinzas é o produtor, o que se revela um problema prático para as indústrias.

Em Portugal, as cinzas de biomassa são classificadas como um resíduo sólido, classificado nas seguintes subcategorias, de acordo com a sua tipologia (Portaria 209/2004 de 3 de março):

- i. Código 100101 – cinzas, escórias e poeiras de caldeiras
- ii. Código 100103 – cinzas volantes
- iii. Código 100124 - areias de leito fluidizado

Como não existem orientações para uma gestão adequada deste resíduo, ele é habitualmente depositado em aterro (Subcapítulo 2.3.4.2). Esta operação de gestão é regulamentada pela Diretiva n.º 1999/31/CE, de 26 de abril, tendo sido transposta para o direito nacional pelo Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de agosto, onde são estabelecidos os critérios de admissão de resíduos por classes de aterros. De acordo com a hierarquia de gestão de resíduos, a eliminação em aterro constitui a última operação de gestão a adotar.

Para o caso das cinzas de biomassa, a aplicação no solo com vista à reciclagem de nutrientes é a opção de valorização que maior potencial apresenta.. Porém, como ainda não existe legislação específica ao nível da UE que regule esta prática, são adotados os critérios de utilização agrícola de lamas de depuração (Decreto-Lei n.º 276/2009, 2009).

De acordo com a decisão do Parlamento Europeu e do Conselho, 2008, as substâncias resultantes de um processo produtivo, cujo principal objetivo não seja a sua própria produção, são considerados subprodutos, e não resíduos. O estabelecimento desta desclassificação (da categoria de resíduo) é alvo de alguns critérios, nomeadamente benefícios ambientais e económicos que provenham da utilização de certas categorias de resíduos, dentro das quais as cinzas e escórias se incluem.

### ***2.3.4.2 Gestão em Portugal e noutros países europeus***

A gestão das cinzas acarreta implicações consideráveis a nível económico e ambiental, no que concerne à sustentabilidade das políticas de biomassa para a energia.

A deposição de cinzas em aterro acarreta custos económicos para as indústrias, por taxação de deposição de resíduos, mas também impactes ambientais negativos.

Algumas empresas e operadores de resíduos têm procurado soluções de valorização material das cinzas como a sua aplicação no solo ou a incorporação em materiais de construção (Tarelho *et al.*, 2013). Todavia, na bibliografia consultada, não foram encontrados dados sobre quantitativos

especificamente para este resíduo, mas apenas em conjunto com outro resíduo (lamas) e apenas para o setor da indústria papelreira.

Em Portugal, de acordo com dados da associação das indústrias de papel (CELPA, 2014), 16% da totalidade da produção de resíduos, correspondentes a lamas e cinzas resultantes da queima de biomassa, foram aplicados na agricultura e compostagem, enquanto que 18% dos resíduos produzidos foram eliminados em aterro, sem especificar a tipologia dos mesmos. Esta informação encontra-se ilustrada na figura seguinte.

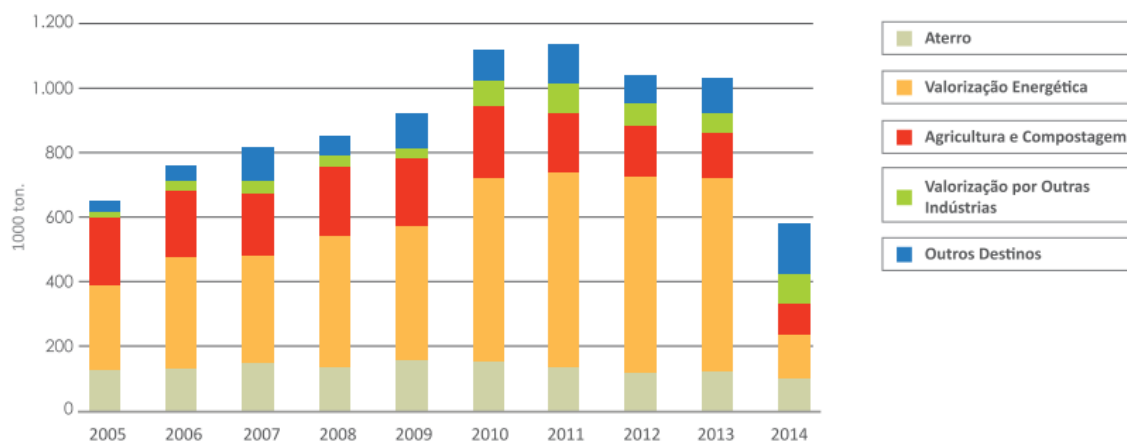


Figura 2.11 - Destino dos resíduos sólidos produzidos pelo setor do papel, entre 2005 e 2014 (adaptado de CELPA (2014))

A formulação de soluções para a aplicação das cinzas de modo eficiente do ponto de vista ambiental e económico é um importante objetivo a alcançar não só em Portugal, mas por toda a Europa.

De acordo com Obernberger e Supancic (2009), algumas das estratégias de utilização das cinzas já são implementadas, em alguma extensão, em países europeus como Suíça, Finlândia, Áustria e Alemanha. No entanto, a sua aplicação generalizada é frequentemente impedida pela falta de legislação, logística e ainda problemas económicos e técnicos, como a falta de conhecimento e formação de operadores das unidades de combustão e agricultores.

Países como a Suécia têm desenvolvido um programa que visa o desenvolvimento de orientações e recomendações técnicas e ambientais para a gestão adequada de cinzas. Este programa está dividido em vários tópicos, como a reciclagem de cinzas em solo florestal, aplicações geotécnicas em aterros sanitários e ainda valores limite de aplicação do resíduo, dependendo de certos parâmetros como mobilidade de metais (Ribbing, 2007).

Na Noruega, as cinzas têm sido aplicadas em solos florestais, fomentando a reciclagem de nutrientes. Ingerslev *et al.* (2014) avançam que independentemente da formulação, preparação ou dose de aplicação da cinza no solo florestal, a sua aplicação proporciona um efeito de calagem à superfície do solo e, simultaneamente, o aumento da concentração de certos nutrientes (e metais pesados).

### 2.3.4.3 Opções de valorização e algumas limitações

De acordo com alguns autores (Demeyer, Voundi Nkana e Verloo, 2001; Masiá *et al.*, 2007), a presença de alguns macronutrientes na composição das cinzas em quantidades significativas, como o Ca, P, K, Mg, e outros micronutrientes (Fe, Mn, Zn, etc.) permite que as cinzas possam ser adequadamente valorizadas. Além disso, as quantidades elevadas de Ca originam um elevado pH (usualmente > 12), o que confere às cinzas potencial tamponizante, embora durante um tempo limitado, devido à lixiviação de certos compostos (Demeyer, Voundi Nkana e Verloo, 2001; Tarelho *et al.*, 2013).

A aplicação das cinzas na agricultura ou em solos florestais permite a reciclagem de nutrientes para as plantas e ainda a correção da acidez no solo, fechando assim o ciclo de vida da “biomassa para a energia”. Assim, existe um potencial de redução do uso de recursos naturais (na produção de fertilizantes químicos), emissões para o ambiente e ainda a implementação de economia circular (Sá *et al.*, 2013).

Relativamente a outras opções de valorização, algumas características das cinzas, como área superficial ou a presença de inqueimados, tornam-nas adequadas para uma série de fins como: aplicação em tratamento físico-químicos de águas residuais, adsorventes para tratamento de efluentes gasosos, catalisadores para processos químicos (*e.g.* produção de biodiesel); recuperação de elementos químicos com interesse industrial e sequestro de carbono, através de reações de carbonatação, entre outras (Alves *et al.*, 2013; Tarelho *et al.*, 2013).

As características de cada tipo particular de cinza assumem um papel essencial na determinação da opção de valorização mais adequada. Por exemplo, de acordo com Grammelis *et al.* (2006), as cinzas de casca de arroz, devido ao seu alto teor de sílica, podem ser valorizadas como um isolador, adsorvente, aditivo em cimento e betão e ainda como um substituto de sílica. Já as cinzas de palha de trigo e cana de açúcar têm sido apontadas como aditivos minerais na produção de betão de melhor qualidade (Martirena *et al.*, 2006; Yu *et al.*, 1999).

Além dos benefícios ambientais, a valorização das cinzas traz inúmeras outras vantagens como por exemplo o retorno financeiro para as indústrias (menos despesas com taxas de deposição) e a substituição de recursos naturais em processos de produção (Ahmaruzzaman, 2010).

Em contrapartida ao referido anteriormente, as características de cada tipo de cinza também podem revelar-se limitantes para certo tipo de aplicação. Por exemplo, de acordo com Obernberger e Supancic (2009), a presença de quantidades relativamente elevadas de Cl nas cinzas limita a aplicação no processo de produção de cimento, pois este elemento é responsável pela corrosão das vigas de aço, utilizadas no cimento reforçado. A presença de inqueimados (carbono) pode também limitar a aplicação deste subproduto como aditivo em cimento e betão (Martirena *et al.*, 2006). Por outro lado, a presença de metais pesados e poluentes orgânicos, embora em menor extensão, é também um fator limitante do uso de cinzas de biomassa (Obernberger e Supancic, 2009).

Quando aplicadas no solo, não são verificados efeitos fitotóxicos nas plantas, por bioacumulação

de metais pesados (Silva, 2016). No entanto, são reportados efeitos ecotóxicos na atividade microbiana do solo (Odlare e Pell, 2009).

Para contornar algumas destas limitações, são aplicados pré-tratamentos às cinzas, de forma a melhorar a qualidade destas. Para a incorporação de argamassas, Modolo (2014) reportou que as cinzas, após um processo de lavagem ou lixiviação, apresentaram uma diminuição significativa de cloretos, o que permite a valorização deste resíduo, sem comprometer a qualidade do produto final. Na aplicação em planos de fertilização, a ausência de azoto e as dimensões finais das cinzas volantes requerem pré-tratamento por densificação em mistura com outros materiais ou por “pelletização” ou granulação com suplemento azotado (Silva, Tarelho e Figueiredo, 2013).

Na prática, vários autores (Park *et al.*, 2005; Rautaray, Ghosh e Mitra, 2003; Saarsalmi *et al.*, 2012), com base em experiências de campo, têm estudado os efeitos de fertilização das cinzas, aplicadas em bruto, mas também aplicadas juntamente com lamas biológicas de depuração de efluentes líquidos, composto de resíduos sólidos urbanos e até fertilizantes químicos. Por outro lado, e como já referido, a sua adição ao solo pode contribuir para aumentar a concentração de metais pesados no solo, apesar da variedade dos resultados/conclusões reportados na bibliografia (Augusto, Bakker e Meredieu, 2008; Demeyer, Voundi Nkana e Verloo, 2001; Saarsalmi *et al.*, 2012).

Os estudos sobre a aplicação de cinzas no solo são normalmente acompanhados (ou antecidos) de testes de lixiviação. Neste contexto, são vários os exemplos que se encontram na literatura. Por exemplo, Ribeiro (2013) estudou o efeito da carga de aplicação de cinza volante em solo agrícola, à escala laboratorial, e observou que quanto maior for a carga de aplicação do material, maior o efeito da mobilização de certos elementos como: Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn e Cu, ao contrário do verificado para o P. Para os macronutrientes, o elemento mais mobilizado foi o K e para os micronutrientes foi o Fe. Sá *et al.* (2013) estudou a lixiviação para três tipos de cinza de biomassa: *Eucalyptus sp.*, *Quercus pyrenaica* e *Pinus pinaster*. A composição química dos lixiviados revelou que a concentração de elementos seguia a ordem decrescente: Ca > K > Mg > Na > Mn > P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> > Fe. Relativamente a sulfatos e cloretos, as concentrações eram diminutas.

Outras informações importantes a ter em conta na eficácia da fertilização das cinzas prendem-se com as características do solo, da cultura e comunidades microbianas no solo, etc., de modo a estabelecer a dose de aplicação apropriada.

## 2.4 FERTILIZAÇÃO

### 2.4.1 Introdução

O aumento da população implica um aumento das necessidades de alimentos e, em consequência, maior produção agrícola e intensificação da utilização dos solos. De acordo com a FAO – *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, estima-se que até 2050 terá de haver um aumento da produção agrícola de cerca de 60% para responder às necessidades do aumento populacional (Harold F. Reetz, 2016). Face a esta procura crescente de alimentos, uma das medidas a implementar poderá passar pela adoção de regimes mais eficientes de fertilização (Esperança, 2013). A prática intensiva de agricultura altera o ciclo de reposição natural dos nutrientes no solo, provocando uma depleção dos mesmos. O défice de fornecimento de nutrientes às plantas, por sua vez, vai resultar na diminuição da fertilidade do solo, à qual vem associado um decréscimo da produtividade das explorações agrícolas (Stoorvogel, Smaling e Windmeijer, 1993). A adição de fontes de nutrientes externas (fertilizantes) é um dos métodos mais utilizados na prevenção deste problema, salvaguardando as condições de crescimento das espécies vegetais e ainda o teor de matéria orgânica do solo (Esperança, 2013).

Concettualmente, os fertilizantes são “substâncias minerais ou orgânicas, naturais ou sintéticas, que fornecem, quantitativamente, os nutrientes ao solo para suprir as necessidades das plantas” (IFDC e UNIDO, 1996; Sheldrick, Syers e Lingard, 2002). A aplicação destes tem como objetivo suprir as necessidades nutricionais do crescimento e desenvolvimento das culturas, e, ao mesmo tempo, aumentar o rendimento destas (IFA e UNEP, 2000; Morris *et al.*, 2007; Raun *et al.*, 2002; Sheldrick, Syers e Lingard, 2002; Tilman *et al.*, 2002). Assim, a dose de aplicação vai depender das necessidades nutricionais das plantas que, por sua vez, varia de espécie para espécie (Cunha, 2007). Além disso, a dose de aplicação vai depender ainda da composição dos fertilizantes, cujo conteúdo de nutrientes é limitado. Na prática, a eficácia de um fertilizante é relativamente limitada no tempo e, frequentemente, são fornecidos mais nutrientes do que é necessário à planta. Este excesso pode ser “perdido” por lixiviação e/ou escoamento superficial, causando contaminação de solos e recursos hídricos (Masarirambi *et al.*, 2012; Mózner *et al.*, 2012; Kaleem Abbasi, Shah e Adams (2003) apud Esperança (2013)).

### 2.4.2 Tipos de fertilizantes

Os fertilizantes podem ser classificados em três grupos:

1. **Fertilizantes minerais** - são formados genericamente por sais minerais, ou compostos orgânicos como a ureia, que facilmente são convertidos em sais. Estes fertilizantes podem ser distinguidos por três critérios essenciais (Harold F. Reetz, 2016): (i) método de produção, que pode ser natural (extraído da natureza e com pouco processamento) ou

sintético (manufatura em processos industriais); (ii) número de nutrientes (fertilizantes simples ou fertilizantes compostos); (iii) tipos de combinação. Na tabela seguinte está compilada a categorização dos fertilizantes inorgânicos de acordo com os critérios de (Harold F. Reetz, 2016).

Tabela 2.4 - Tipos de fertilizantes minerais, de acordo com os critérios de Harold F. Reetz (2016).

Critérios		Descrição
Método de produção	Natural	Como encontrado na natureza ou com pouco processamento
	Sintético	Manufaturado em processos industriais
Número de nutrientes	Simple	Apenas um nutriente
	Multi-nutrientes	2, 3 ou mais nutrientes
Tipos de combinação	Fertilizantes misturados	Mistura física de dois ou mais fertilizantes simples ou multi-nutrientes
	Fertilizantes complexos	Dois ou mais nutrientes quimicamente combinados ( <i>e.g.</i> , nitrofosfato)
Condição física	Sólido	Cristalizado ou granulado
	Líquido	Soluções e suspensões
	Gasoso	Líquido sob pressão ( <i>e.g.</i> , amónia)
Modo de ação	Rápida	Solúvel em água e imediatamente disponível
	Lenta	Necessária transformação para a forma solúvel

2. **Fertilizantes orgânicos** - consistem em compostos orgânicos resultantes da decomposição de resíduos orgânicos de origem vegetal ou animal (Blackshaw, Semach e Janzen, 2002). A variedade de resíduos orgânicos usados é extensa, desde estrumes da decomposição anaeróbica de excrementos sólidos e líquidos de animais, até resíduos agrícolas e industriais (Hebbar *et al.*, 2004; Lal, 2004; Liang *et al.*, 2012; Trazzi, Caldeira e Colombi, 2012).

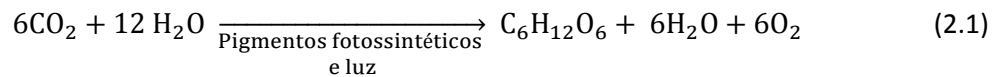
Os fertilizantes orgânicos podem ser distinguidos consoante a sua origem: animal, vegetal ou mistos (mistura de ambos) (Hebbar *et al.*, 2004). Este tipo de fertilizante é constituído por uma matriz de nutrientes, microrganismos e substâncias promotoras de crescimento das plantas. Devido a estas características, são frequentemente aplicados em solos agrícolas (Masarirambi *et al.*, 2012), podendo contribuir para a redução da dependência de aplicação de fertilizantes químicos e ainda melhorar as propriedades físicas e químicas do solo (Ayala e Prakasa Rao, 2002; Chambers, Smith e Pain, 2000). Ao contrário da maioria dos fertilizantes minerais, este tipo de fertilizantes tem uma taxa de libertação de nutrientes mais prolongada (Esperança, 2013).

3. **Fertilizantes organominerais** - tal como o nome indica, este tipo de adubo resulta de uma mistura de fertilizantes minerais e orgânicos. Estes fornecem simultaneamente os

principais nutrientes necessários às plantas, a partir de fontes minerais, e ainda matéria orgânica, que potencia a eficiência dos nutrientes e, ao mesmo tempo, melhora as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (Nutrisafra, 2013).

### 2.4.3 Nutrientes essenciais às plantas

Cada um dos nutrientes necessários às plantas, disponíveis no solo ou fornecidos por meio de fertilização sob a forma de iões, desempenha um papel específico no desenvolvimento das células vegetais, bem como no processo metabólico das plantas. Os nutrientes necessários em maior quantidade (também denominados de macronutrientes) são: C, O, H, N, P, K, Ca, Mg e S (Harold F. Reetz, 2016; IFDC e UNIDO, 1996). Destes macronutrientes, os elementos C, O e H são obtidos pelas plantas através do processo físico-químico da fotossíntese:



Os outros macroelementos (N, P, K, Ca e Mg) dividem-se entre nutrientes primários (N, P, K) e nutrientes secundários (Ca, Mg, e S). Outros nutrientes necessários às plantas em menor quantidade são designados micronutrientes e incluem Mn, Cu, Zn, Mo ou B (Harold F. Reetz, 2016). Estes tornam-se biodisponíveis através de reações bióticas e abióticas, que dependem de vários fatores como as condições do meio (solo) e a quantidade de compostos mineralógicos existentes.

#### 2.4.3.1 Nutrientes primários

Os nutrientes primários são os principais nutrientes requeridos pelas plantas e que, frequentemente, limitam o seu crescimento. São eles o N, K e P:

##### Nitrogénio

O nitrogénio (N) é o elemento mineral mais importante na nutrição das plantas, sendo o principal constituinte dos aminoácidos, proteínas e ácidos nucleicos. É fundamental no processo de crescimento das plantas, o que faz com que seja necessário em grandes quantidades pelas culturas (Harold F. Reetz, 2016; SQM, 2016).

No caso de fornecimento deficiente deste elemento, os principais sintomas que atingem a cultura são a redução do seu desenvolvimento e o amarelecimento da planta, começando pelas suas partes mais velhas (SQM, 2016). Por outro lado, o excesso deste nutriente pode proporcionar igualmente problemas para as culturas. Os principais sintomas são o crescimento exagerado das plantas mas com caules finos e tenros (frágeis), o que os torna mais sensíveis a “agressões externas”: pragas e doenças, granizo, etc (Cunha, 2007).



A utilização do nitrogénio pelas plantas depende da forma como este nutriente se encontra disponível, e ainda da etapa de crescimento das plantas. Este pode estar disponível na forma inorgânica de amónio ( $\text{NH}_4^+$ ) ou nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) (Harold F. Reetz, 2016). Para que as plantas possam utilizar o amónio ( $\text{NH}_4^+$ ), é necessário que este se torne biodisponível através de reações de nitrificação.

O  $\text{NO}_3^-$  é a forma dominante de N disponível para as plantas, sendo que este não se desloca através da água. Os problemas comuns de poluição de nitratos em águas subjacentes a solos deve-se à sua fraca capacidade de absorção de aniões, o que resulta na lixiviação deste composto (Harold F. Reetz, 2016).

### Potássio

O papel do potássio nas culturas está interligado com a qualidade e produção destas, sendo que um aumento dos níveis de potássio melhora o desenvolvimento da planta (SQM, 2016). Mais especificamente, a função do potássio é contribuir para a síntese de proteínas, processos fotossintéticos e transporte de açúcares das folhas para os frutos. Consequentemente, um elevado fornecimento deste nutriente irá sustentar o papel das folhas no crescimento de frutos. A ação do potássio na síntese de proteínas reforça a conversão do nitrato absorvido pelas plantas, contribuindo para uma melhor eficiência do fornecimento de N. Para além disso, o potássio é responsável pelo potencial osmótico da planta (turgescência das células), o que permite que a planta mantenha uma hidratação adequada em condições de *stress* como salinidade ou carência de água. Por exemplo, em culturas de tomate com grandes concentrações deste nutriente, os consumos de água são relativamente inferiores face ao verificado em culturas onde este elemento se apresenta em défice.. O fornecimento deste nutriente às culturas é considerado ideal quando ocorre sob a forma de nitrato de potássio (Schmitt e Rehm, 2002; SQM, 2016).

Os sintomas de deficiência de K nas plantas incluem o aparecimento de folhas verdes escuras, hastes curtas e entrenós curtos, necroses nas bordas das folhas mais velhas e redução da massa e área foliar da planta (SQM, 2016).

No solo, o catião  $\text{K}^+$  é a forma imediatamente disponível para as plantas, mas também mais sujeita a lixiviação (Sparks, 1987). A extensão da lixiviação destes iões tem tendência a depender mais da quantidade de água que percola o solo, do que da textura e características do solo propriamente ditas. Este fenómeno pode ser contrariado, de certa forma, pela neutralização dos solos (IFDC e UNIDO, 1996). Uma outra fonte de perda de K pode ser também a erosão superficial dos solos.

### Fósforo

O papel do fósforo (P) é essencialmente estrutural, fazendo parte dos metabolitos energéticos (trifosfato de adenosina - ATP) e também de cloroplastos. Os metabolitos energéticos armazenam a energia proveniente da fotossíntese, que é utilizada pela planta em zonas específicas. Os metabolitos são essenciais em todos os processos onde há divisão celular, como na frutificação e meristemas radiculares. Nestes locais de crescimento, a concentração de P pode ser 10 vezes superior à média da concentração da planta, o que indica a elevada necessidade de fornecimento

desta energia (IFDC e UNIDO, 1996; SQM, 2016). Para além disso, a disponibilidade de P proporciona a rápida maturação das plantas e ainda o aumento da resistência a doenças causadoras de apodrecimento radicular e a variações climáticas desfavoráveis (Wood, Mullins e Hajek, 2003).

Em solos ácidos, este elemento é absorvido essencialmente sob a forma de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , enquanto que em solos neutros e alcalinos a forma predominante é  $\text{HPO}_4^{2-}$ . Ambas as formas são aproveitadas pela planta, apesar de a mais eficiente ser o  $\text{HPO}_4^{2-}$  (SQM, 2016). A disponibilidade de P é assim fortemente dependente da acidez do meio, bem como da humidade dos solos (IFDC e UNIDO, 1996).

Quando existe adição de fertilizantes ricos em P, as formas de ortofosfato são convertidas a uma variedade de compostos, com influência não só do pH do solo, mas também da própria presença de outros elementos como Ca, Fe ou Al. Por sua vez, os compostos formados são convertidos ao longo do tempo a compostos ainda mais estáveis ou insolúveis, graças a um conjunto de processos de sorção, relativamente irreversíveis, conhecidos como fixação do fósforo. Este processo depende da quantidade de P efetivamente disponível no solo, controlando assim a eficácia da fertilização (IFDC e UNIDO, 1996).

A deficiente nutrição em fósforo pode trazer “consequências dramáticas ao crescimento das plantas, levando as folhas a adquirir uma tonalidade verde escura, de aspeto apagado, que com o tempo se transforma em roxo e púrpura, acabando por secar e eventualmente cair. O número de jovens rebentos diminui, formando talos finos e curtos com folhas pequenas” (Cunha, 2007).

#### **2.4.3.2 Nutrientes secundários**

Como já referido, os nutrientes secundários são o cálcio, o magnésio e o enxofre. Apesar de serem também eles muito importantes para o saudável crescimento das plantas, não são requeridos em quantidades tão significativas como os nutrientes primários.

##### Cálcio

A principal função do cálcio nas plantas é a estabilização e manutenção da integridade das membranas celulares. O cálcio facilita a coesão das células, sendo ainda necessário à estabilização do seu pH, o que permite manter o equilíbrio com outros iões e ácidos orgânicos. O cálcio é também importante no crescimento das raízes e na resistência da planta aos ataques patogénicos e à deterioração durante o armazenamento da cultura (Easterwood, 2002; SQM, 2016). Além disso, este elemento é responsável pela firmeza de frutos, retardamento da senescência e permite que as folhas sejam capazes de continuar o processo de fotossíntese (SQM, 2016).

O défice de cálcio nas culturas prejudica o seu desenvolvimento (raízes e rebentos) e consequente, o rendimento de produção. No solo, um défice de Ca provoca uma diminuição do pH, tornando o solo menos produtivo.

Os sintomas da carência deste elemento variam entre espécies mas, geralmente, observa-se necroses dos ápices e das pontas das folhas jovens, acompanhadas de deformações das mesmas.

As folhas tendem a adquirir um aspeto velho e seco, com as bordaduras com aparência dentada (Cunha, 2007; SQM, 2016).

### Magnésio

No solo, o Mg tem origem na decomposição de rochas contendo minerais como dolomite ou olivina. Uma vez no solo, este elemento pode ser absorvido pelos microrganismos e plantas (na forma iónica), lixiviado ou adsorvido nas partículas circundantes (Schwartzkopf, 1972). Quando acontece este último fenómeno, o Mg é considerado não permutável, pois é libertado a taxas demasiado baixas para suprir as necessidades de agricultura de alta intensidade.

Do ponto de vista biológico, este elemento desempenha um papel vital na fotossíntese, pois é o ião central da molécula de clorofila, estando assim envolvido em inúmeras reações enzimáticas (Schwartzkopf, 1972; SQM, 2016). Além disso, promove a absorção de P, está envolvido na síntese de caroteno e lípidos, bem como no controlo de turgescência das células, manutenção do balanço iónico e balanço de pH (SQM, 2016). A carência de magnésio provoca sintomas, nomeadamente, em folhas mais velhas das plantas, surgindo cloroses entre as nervuras e na borda das folhas. Este efeito é mais acentuado nas folhas da base da planta (Cunha, 2007).

A carência deste elemento é mais frequente em solos ácidos, arenosos e solos orgânicos muito ricos em carbonato de cálcio (Cunha, 2007).

### Enxofre

No solo, grande parte do enxofre existente à superfície encontra-se associado à matéria orgânica, tendo de ser mineralizado à forma de sulfato para se tornar disponível para as plantas. O sulfato pode ser imobilizado aquando da decomposição bacteriana de resíduos de culturas ricos em carbono. À semelhança do N, o S é um elemento bastante móvel, com tendência a ser lixiviado (Baird, 1991).

O enxofre é essencial na promoção da atividade e desenvolvimento de enzimas e vitaminas e na produção de proteínas na planta. É também responsável pelo crescimento das raízes e da planta, produção de sementes e aumento da resistência da planta ao frio. A deficiência de S é pouco frequente, apresentando sintomatologia muito semelhante à da carência de N (Cunha, 2007).

### **2.4.3.3 Micronutrientes**

O boro, manganês, ferro, zinco e cobre são os principais micronutrientes das plantas. As suas funções e os efeitos da sua ausência no crescimento das plantas são descritos neste subcapítulo.

### Boro

Este micronutriente desempenha vários papéis nas plantas, como a participação na absorção catiónica de nutrientes (tal como o Ca) e em processos metabólicos. A nível celular, este nutriente

é essencial à rigidez da membrana celular, sendo requerido em áreas da planta com grande atividade metabólica, como rebentos e ápices de raízes e em processos como a divisão e alongação celular. É também importante na síntese das paredes celulares, nomeadamente na síntese de pectina e lignina. Além disso, tem um papel crucial na germinação do pólen e no crescimento do tubo polínico (SQM, 2016).

A deficiência deste elemento pode ser localizada na planta, não sendo, habitualmente, evidente em toda ela (SQM, 2016).

### Manganês

A função do manganês nas plantas é regular a permeabilidade das membranas celulares e ativar enzimas. Participa na fotossíntese e respiração celular e influencia ainda o metabolismo do nitrogénio (SQM, 2016).

### Ferro

À semelhança do manganês, o ferro ativa um certo número de enzimas, estando envolvido na síntese de clorofila, fotossíntese, respiração e processo de metabolismo de N. Este elemento tem a particularidade de apresentar baixa mobilidade uma vez encontrado no xilema das plantas (SQM, 2016).

### Zinco

Nas plantas, o zinco desempenha o papel de ativador de enzimas e está envolvido em processos como metabolismo de N, fotossíntese e ainda na síntese do aminoácido triptofano, precursor necessário para o ácido indol-3-acético (IAA). Este ácido é uma hormona fundamental no crescimento e desenvolvimento regular dos rebentos, folhas e frutas das plantas. Além disso, este nutriente desempenha um papel-chave na formação da pigmentação da fruta (SQM, 2016).

Os sintomas associados à deficiência de zinco são mais recorrentes em folhas novas, onde o zinco não pode ser mobilizado de tecidos velhos para tecidos novos, devido à sua limitada mobilidade (SQM, 2016). Em culturas, os sintomas são evidentes em plantações de fruta, em que o tipo de crescimento observado é o nanismo: entrenós curtos e folhas pequenas enfermas. Adicionalmente, a qualidade e coloração da fruta diminuem. Outros sintomas como sintomas necróticos podem ser confundidos com sintomas de deficiência de Mn e Fe (SQM, 2016).

Relativamente a outros elementos, pode haver competição entre Cu e Fe no complexo de Zn (SQM, 2016).

### Cobre

O cobre é um nutriente essencial na regulação da transpiração da planta. É absorvido pelas plantas não só sob a forma de  $\text{Cu}^{2+}$ , mas também em formas mais complexas. Ao nível da absorção, apresenta competição com o  $\text{Zn}^{2+}$  (SQM, 2016).

Nas plantas, o cobre participa num grande número de processos de oxidação-redução, sendo um deles o sistema enzimático de oxidase ascórbico. O produto deste processo, o ácido ascórbico ou a vitamina C, tem efeito protetor contra a oxidação. Além do mais, este nutriente está associado a várias enzimas, como ativador ou como constituinte e ainda favorece a fixação de nitrogénio atmosférico de legumes (SQM, 2016).

Quando se encontra em défice, a sintomatologia inclui o murchar das folhas mais jovens, a ondulação do pecíolo e da folha subsequente, e a inclinação dos caules. Em casos mais graves, as folhas tornam-se torcidas e frágeis, acabando por ceder. Outros sintomas envolvem a redução de lignificação. Na prática, estes sintomas são facilmente confundíveis com a carência de outros elementos como o P, Fe, Mo, Zn e S (SQM, 2016).

Em concentrações superiores ao necessário, este elemento é utilizado como fungicida e algicida. Valores superiores a 300 mg/kg no solo, considerados fitotóxicos, provocam alterações nas raízes, adquirindo estas uma cor escura, perda de robustez e inchaço, levando a falhas no desenvolvimento. Para além destes sintomas, o excesso de Cu afeta a fase de oxidação de Fe, limitando a absorção deste pela planta, à semelhança do verificado para o P (SQM, 2016).

#### **2.4.4 Fatores condicionantes da biodisponibilidade de nutrientes**

De acordo com IFDC e UNIDO (1996), os principais fatores que determinam a biodisponibilidade dos nutrientes no solo são o pH e a capacidade de troca catiónica.

##### ***2.4.4.1 pH do solo***

A gama ideal de valores de pH, do ponto de vista de maximização da biodisponibilidade de nutrientes para as culturas, depende da tipologia de solo, da cultura e ainda da rotação de culturas. De acordo com Harold F. Reetz (2016), esta maximização é atingida para valores entre 6,5 e 7,0. Fora desta gama de valores, os nutrientes podem formar compostos não assimiláveis pelas plantas. Para valores muito inferiores (abaixo de 4,5-5,0), as culturas são muito afetadas pela deficiência de nutrientes como P (formação de sulfatos de ferro e sulfatos de alumínio) e Mg, e ainda pela toxicidade de alguns elementos como Al e Mn. Para valores de pH mais elevados, pode ocorrer deficiência de nutrientes, como é o caso do P, que forma compostos insolúveis com Ca e Mg.

Assim, a correção do pH do solo é fundamental para favorecer a mobilização e biodisponibilidade dos nutrientes para as culturas.

##### ***2.4.4.2 Capacidade de troca catiónica do solo***

A par da fotossíntese, a capacidade de permuta de catiões (CEC) é considerada fundamental no crescimento das plantas.

Conceitualmente, a CEC é o “somatório das cargas negativas dos coloides do solo que podem ser neutralizadas por cátions da solução do solo”. Esta propriedade é influenciada pelo tipo de materiais do solo, sendo que os materiais orgânicos possuem maior CEC quando comparados com coloides inorgânicos. Deste modo, um solo rico em matéria orgânica possui maior capacidade de retenção de cátions (nutrientes), o que potencia menores perdas por lixiviação e, por conseguinte, o aumento da concentração e biodisponibilidade destes (IFDC e UNIDO, 1996).

Solos com baixo valor de pH apresentam geralmente menor potencial de permuta de íons, resultando numa CEC reduzida (Ketterings, Reid e Rao, 2007).

Em suma, uma capacidade de troca catiónica equilibrada confere aos solos a capacidade de reter os elementos necessários ao crescimento saudável das plantas.

#### **2.4.5 Excesso de fertilização**

O excesso de nutrientes provoca alterações negativas na sua biodisponibilidade para as plantas. Um exemplo é o fornecimento em excesso de potássio, que pode interferir na absorção de magnésio e fósforo por algumas plantas, devido a efeitos antagonísticos. Como a absorção de fósforo depende por sua vez da absorção de magnésio, um efeito de escala é observado nesta situação (Masarirambi *et al.*, 2012).

Dependendo dos fertilizantes aplicados em excesso e dos nutrientes que estes disponibilizam, esta prática pode também provocar alterações nutricionais das culturas. Practices & Desai (1988) e Mozafar (1993) comprovaram que a sobre-aplicação de fertilizantes ricos em N afeta não só a qualidade da planta, mas também a quantidade de vitamina C e nitrato.

A necessidade de aumentar a eficiência do uso de fertilizantes, seja por fatores económicos ou ambientais, fomentou o desenvolvimento de outras técnicas de fertilização e de cultivo, que serão abordadas no subcapítulo seguinte.

## **2.5 FERTIRRIGAÇÃO E HIDROPONIA**

### **2.5.1 Conceitos e descrição das técnicas**

A fertirrigação consiste numa técnica de fertilização em que os fertilizantes são dissolvidos na água de irrigação e esta, por sua vez, transporta os nutrientes até às culturas (Martinez Hernandez, Bar-Yosef e Kafkafi, 1991). De acordo com Hagin, Sneh e Lowengart-Aycicegi (2002), Hebbar *et al.* (2004) e Hultberg, Carlsson e Gustafsson (2013), esta técnica agrícola promove um aumento da eficiência do uso de fertilizante e, por conseguinte, a maximização do rendimento das culturas e minimização da poluição. Para além disso, esta técnica permite o cultivo em áreas desertas, com temperaturas

tipicamente muito elevadas, pois a água de irrigação é conduzida a cada planta da cultura minimizando, assim, as perdas por evaporação (Kafkafi e Tarchitzky, 2011).

O desenvolvimento de sistemas de suporte de fertilização tem sido extenso, com especial interesse no cultivo em substrato. As culturas produzidas em substrato são caracterizadas por desenvolverem um pequeno volume de raízes que é responsável por grandes variações de nutrientes e sais no sistema radicular. Para este método de cultivo, vários fatores determinam a composição da solução de nutrientes, como a sua absorção ao longo da produção das culturas e o armazenamento e disponibilidade dos mesmos nutrientes no ambiente radicular (Sonneveld e Voogt, 2009).

Porém, com a implementação de restrições e regulamentação sobre a emissão de poluentes ambientais nas últimas décadas do século XX, houve necessidade de um controlo intensivo do fornecimento de nutrientes em sistemas de substrato. Paralelamente a isto, o uso da água de irrigação, em circuito fechado, tem sido desenvolvido para aplicação em larga escala (Voog and Sonneveld, 1997). Neste sistema, as variáveis de controlo baseiam-se na medição da condutividade elétrica (potencial osmótico) da água de irrigação e cronometragem desta, das quantidades e concentrações de fertilizantes e do pH (Kafkafi e Tarchitzky, 2011; Sonneveld e Voogt, 2009).

Os sistemas de irrigação utilizados neste processo dependem das necessidades das culturas. Assim, existem dois tipos de sistema: por gravidade e pressurizados. O primeiro é apenas aplicado a sistemas de irrigação operando à pressão atmosférica, em que a água de irrigação flui em canais abertos. Esta é gotejada a partir de um tanque de armazenamento, situado a uma cota superior à do canal. No segundo sistema, o fertilizante é injetado na rede de irrigação através de um equipamento próprio para o efeito, classificado de acordo com a pressão pretendida (Kafkafi e Tarchitzky, 2011). Na tabela seguinte encontram-se descritos os dispositivos usados no sistema de fertirrigação.

Tabela 2.5 - Descrição de dispositivos de injeção utilizados no sistema de fertirrigação (Kafkafi e Tarchitzky, 2011).

Tipos de injeção	Descrição
<b>Aparelho de Venturi</b>	O funcionamento reside no princípio de sucção de <i>Venturi</i> , em que a pressão induzida pelo fluxo de água de irrigação suga a solução de fertilizantes dos tanques para o sistema de irrigação.
<b>Pressão diferencial</b>	A pressão diferencial é criada por uma válvula borboleta, que desvia parte da água de irrigação para um tanque, hermeticamente fechado, onde é colocado o fertilizante. À saída do tanque, a água contém uma certa concentração deste fertilizante, dependente da solubilidade e quantidade do mesmo.
<b>Pressão positiva</b>	Bombas de injeção adicionam um volume de solução de fertilizantes ao volume de água de irrigação, até ser atingido um rácio pré-estabelecido. Neste sistema é reconhecida a precisão e capacidade de fornecer com rigor quantidades pré-determinadas de nutrientes.

No caso da fertirrigação sem solo, a hidroponia pode ser definida como a “técnica de cultivo protegido de plantas sem o solo como suporte, na qual os nutrientes são fornecidos às raízes através de uma solução formulada de acordo com as necessidades da cultura que se deseja cultivar” (Florencio, Bastos e Aisse, 2006; Hebbar *et al.*, 2004; Graves (1983), Lensen & Collins (1985), Resh (1996) apud Padova e Oliveira (2000)). Esta técnica é caracterizada pela grande produtividade e qualidade das culturas, com a minimização do desperdício de água, assim como de fertilizantes e ainda pela acessibilidade de plantação (Padova e Oliveira, 2000).

A hidroponia não é um método de cultivo recente, estando documentado desde há milhares de anos. Contudo, o seu desenvolvimento foi mais acentuado nas últimas décadas do século XX, tornando-se mais “competitivo em relação a outras forma de produção comercial” (Cooper (1973) apud Padova e Oliveira (2000)). As principais vantagens e desvantagens da hidroponia são apresentadas na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Vantagens e desvantagens do uso de hidroponia (Florencio, Bastos e Aisse, 2006; Lieten *et al.*, 2004).

Vantagens	Desvantagens
<b>Versatilidade da instalação e localização das infraestruturas (possibilidade de proximidade aos grande centros consumidores)</b>	Mão-de-obra qualificada (controlo frequente da condutividade elétrica (CE) e pH)
<b>Área de implementação menor</b>	Preparação e manuseamento da solução nutritiva
<b>Controlo das necessidades hídricas e, assim, mínimo de desperdícios de água e nutrientes</b>	Custo de implementação pode ser avultado
<b>Ciclos culturais mais curtos e redução do número de operações em cada um deles</b>	Dependência energética, no caso de sistemas automáticos
<b>Possibilidade de produção de várias culturas, em qualquer estação do ano (fora de sazonalidade), com baixa dependência de adversidades climáticas</b>	
<b>Maior rendimento de produção por área</b>	
<b>Maior facilidade ergonómica</b>	
<b>Rápido retorno económico</b>	
<b>Não exige rotação de cultura</b>	

De acordo com a tabela anterior, esta técnica de cultivo permite uma produção em grande escala com uma menor área de implementação, podendo localizar-se junto a centros consumidores ou áreas inférteis para a agricultura convencional. Porém, a mão-de-obra qualificada é essencial para maximizar o rendimento de produção, pois esta técnica é sensível a erros de operação, por parte dos produtores/operadores. A ocorrência destes erros pode ocasionar perdas significativas para as culturas (Padova e Oliveira, 2000).

Outros fatores importantes para a maximização da produção de culturas por hidroponia são: a qualidade dos fertilizantes utilizados, sementes utilizadas, qualidade da água de irrigação e ainda a



formulação da solução nutritiva. Neste método de cultivo, os fertilizantes devem ser isentos de substâncias insolúveis, não por serem prejudiciais às culturas, mas por causarem problemas de obstrução nos sistemas de irrigação por gotejamento, usados na fertirrigação (Kafkafi e Tarchitzky, 2011; Sonneveld e Voogt, 2009). Outros fatores a ter em conta na implementação da hidroponia incluem ainda as condições do local como luminosidade, temperatura, fotoperíodo e humidade relativa (Padova e Oliveira, 2000).

Segundo Florencio et al. (2006), as principais técnicas de hidroponia são:

1. **Deep Film Technique (DFT)** - também denominada por *floating*, é caracterizada por não ter canais de cultivo, mas sim uma mesa de cultivo em que a solução nutritiva forma uma lâmina profunda na qual as raízes das plantas ficam submersas;
2. **Aeroponia** - sistema em que as raízes das plantas ficam suspensas recebendo a solução nutritiva por nebulizações regulares, de modo a manter uma humidade relativa de 100% no ambiente radicular;
3. **Nutrient Film Technique (NFT)** - também denominada de técnica do fluxo laminar de nutrientes. Este sistema é caracterizado pelo fornecimento da solução fertilizante ao longo de canais de cultivo, de forma intermitente, às raízes das plantas. A intermitência da irrigação tem como objetivo a disponibilização de oxigénio às raízes das plantas (Zonta, 2010). A Figura 2.12 apresenta um esquema de funcionamento deste sistema.

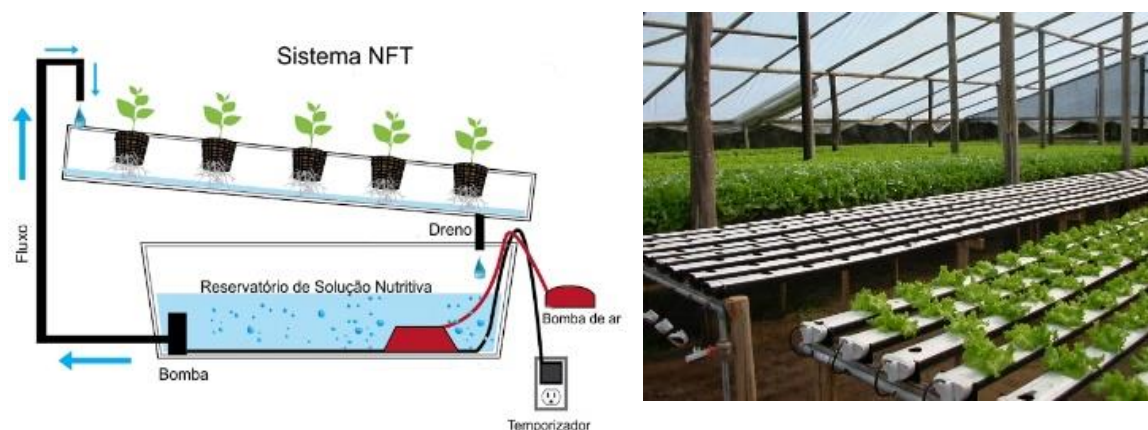


Figura 2.12 - Esquema representativo de um sistema NFT e cultivo de alface em estufa (fonte: TudoHidroponia (2016) e ConoSul (2012) respetivamente).

Os componentes deste sistema são então, genericamente, um tanque de solução nutritiva, um sistema de bombeamento, canais de cultivo e um sistema de retorno ao reservatório. A solução nutritiva é bombeada até aos canais de cultivo, de modo a formar-se um pequeno filme de água, e é escoada até ao canal coletor, onde a solução é retornada para o reservatório, pela ação da gravidade (2% a 4% de declive) (Padova e Oliveira, 2000).

A configuração dos canais de cultivo, nomeadamente a conformação, profundidade e largura, influenciam a qualidade final da planta. Por exemplo, no caso de culturas de sistema radicular relativamente extenso, deve-se optar por canais de cultivo que permitam o desenvolvimento adequado do sistema radicular destas plantas. A tubulação de polipropileno apresenta os melhores

resultados pois não permite a passagem de luz (evitando a proliferação de algas) e, além disso, é um material não tóxico. A tubagem é sempre revestida de cor branca para refletir os raios solares (Furlani (1998) apud Padova e Oliveira (2000)).

Neste sistema, mais importante do que as quantidades nutricionais assimiladas pela cultura é a provisão relativamente constante de nutrientes na solução, ao passo que quando o cultivo é feito em solo, a implementação do plano de fertilização deve ter em conta a quantidade de nutrientes disponível no próprio solo (Furlani *et al.* (1999) apud Padova e Oliveira (2000)).

## 2.5.2 Fatores importantes no cultivo por hidroponia

Neste subcapítulo apresentam-se os fatores importantes a ter em conta quando se projeta ou opera um sistema de cultivo por hidroponia. Todavia, como alguns deles também são comuns ao cultivo em substrato, por vezes é feita alusão a estes tipos de cultivo também.

### 2.5.2.1 Substratos

No cultivo em hidroponia, as plantas desenvolvem um pequeno volume de raízes, na ausência ou na presença de substrato. Um substrato pode ser definido como um agregado inerte (que não reage com a solução nutritiva) que pode ter várias funções como suporte e meio de enraizamento (Florencio, Bastos e Aisse, 2006). O material constituinte pode ser orgânico ou inorgânico, de acordo com o esquema seguinte.

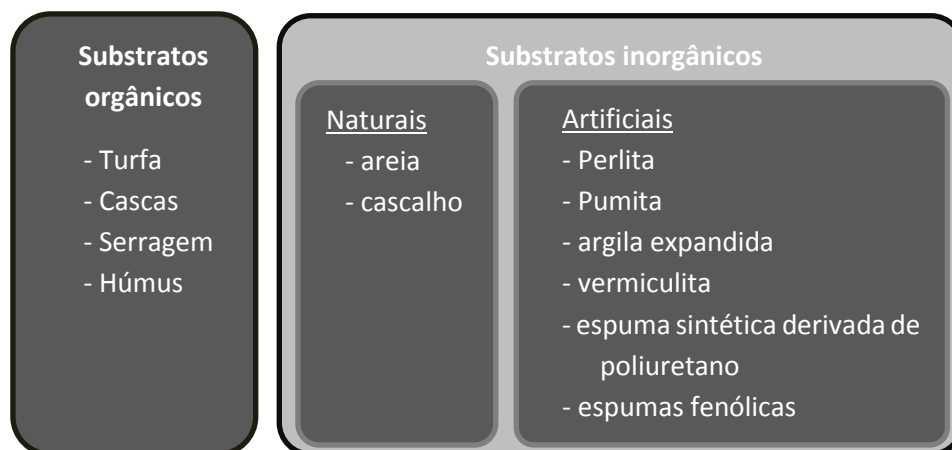


Figura 2.13 - Tipos de substratos utilizados na hidroponia (Padova e Oliveira, 2000).

Na prática, autores como Furlani (1998)(apud Padova e Oliveira (2000)) recomendam a utilização de espumas fenólicas na operação de mudas de plantas, devido às propriedades estéreis do material, baixo custo e fácil manuseio. Para além disso, este material possui características importantes como grande capacidade de retenção de água e boa drenagem, o que favorece a operação de transplântio de plantas.

### **2.5.2.2 Fertilizantes**

A aplicação de fertilizantes tem como função otimizar as condições físico-químicas do ambiente radicular, nomeadamente a disponibilidade dos nutrientes e controlo do pH.

Devido à importância dos fertilizantes, é crucial o conhecimento das propriedades físico-químicas respetivas. Os fertilizantes podem ser adquiridos na forma líquida ou sólida, sendo que, de acordo com Kafkafi & Tarchitzky (2011), a forma sólida constitui uma alternativa menos dispendiosa em operações de grande escala. O mesmo autor refere que a escolha de fertilizantes deve ter em conta alguns fatores como o tipo de planta e a fase de crescimento, a qualidade da água de irrigação e o preço e disponibilidade do fertilizante. Por último, a compatibilidade entre fertilizantes usados na água de irrigação é importante para evitar o fenómeno de precipitação na solução nutritiva. A Tabela 2.7 apresenta a compatibilidade entre fertilizantes e ácidos utilizados na fertirrigação.

Note-se que, relativamente às doses de aplicação, estas são estabelecidas de acordo com as necessidades da cultura, tipo de solo e sistema de gestão da cultura (Sne *et al.*, 2006). Dependendo das características do sistema de injeção, as doses de fertilizantes a adicionar podem ser: (i) quantitativas, no caso de injeção por pressão diferencial; ou (ii) em proporção, para injeção por pressão positiva.

Tabela 2.7 - Quadro de compatibilidade de fertilizantes (adaptado de Roddy (2006)(apud Kafkafi e Tarchitzky (2011)).

	Ureia	Nitrato de amónio	Sulfato de amónio	Nitrato de cálcio	Nitrato de potássio	Cloreto de potássio	Sulfato de potássio	Fosfato de amónio	Sulfato de:				Quelato de:				Sulfato de magnésio	Ácido fosfórico	Ácido sulfúrico	Ácido Nítrico
									Mn	Cu	Zn	Fe	Mn	Cu	Zn	Fe				
Ureia	Compatível																			
Nitrato de amónio	Compatível	Compatível																		
Sulfato de amónio	Compatível	Compatível	Compatível																	
Nitrato de cálcio	Compatível	Compatível	Não compatível	Compatível																
Nitrato de potássio	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível															
Cloreto de potássio	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível														
Sulfato de potássio	Compatível	Compatível	Compatibilidade reduzida	Não compatível	Compatível	Compatibilidade reduzida	Compatível													
Fosfato de amónio	Compatível	Compatível	Compatível	Não compatível	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível												
Sulfato de:	Mn	Compatível	Compatível	Não compatível	Compatível	Compatível	Compatibilidade reduzida	Não compatível	Compatível											
	Cu	Compatível	Compatível	Não compatível	Compatível	Compatível	Compatibilidade reduzida	Não compatível	Compatível											
	Zn	Compatível	Compatível	Não compatível	Compatível	Compatível	Compatibilidade reduzida	Não compatível	Compatível											
	Fe	Compatível	Compatível	Não compatível	Compatível	Compatível	Compatibilidade reduzida	Não compatível	Compatível											
Quelato de:	Mn	Compatível	Compatível	Compatibilidade reduzida	Compatível	Compatível	Compatível	Compatibilidade reduzida	Compatível	Compatível										
	Cu	Compatível	Compatível	Compatibilidade reduzida	Compatível	Compatível	Compatível	Compatibilidade reduzida	Compatível	Compatível										
	Zn	Compatível	Compatível	Compatibilidade reduzida	Compatível	Compatível	Compatível	Compatibilidade reduzida	Compatível	Compatível										
	Fe	Compatível	Compatível	Compatibilidade reduzida	Compatível	Compatível	Compatível	Compatibilidade reduzida	Compatível	Compatível										
Sulfato de magnésio	Compatível	Compatível	Compatível	Não compatível	Compatível	Compatível	Compatibilidade reduzida	Não compatível	Compatível	Compatível										
Ácido fosfórico	Compatível	Compatível	Compatível	Não compatível	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível	Compatibilidade reduzida	Compatível									
Ácido sulfúrico	Compatível	Compatível	Compatível	Não compatível	Compatível	Compatível	Compatibilidade reduzida	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível									
Ácido Nítrico	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível	Não compatível	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível	Compatível		

Legenda

Compatível



Compatibilidade reduzida



Não compatível



De acordo com a Tabela 2.7, deve evitar-se a mistura de soluções de fertilizantes que contenham cálcio com fosfatos ou sulfatos quando o pH na solução não é suficientemente ácido. Outros cuidados aquando da mistura de fertilizantes prendem-se com a temperatura após a mistura dos fertilizantes (ocorrência de reações endotérmicas) e ainda a corrosão (Kafkafi e Tarchitzky, 2011).

No que toca à composição dos fertilizantes, é comum as indústrias de fertilizantes expressarem o conteúdo destes produtos como óxidos (*e.g.* K<sub>2</sub>O e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, etc.). Em alguns casos, estes produtos não são constituídos unicamente por um sal ou composto, mas contêm substâncias residuais (Sonneveld e Voogt, 2009).

Nos fertilizantes incluem-se alguns hidróxidos, ácidos e carbonatos. A solubilidade destes químicos dita a sua aplicação: os mais solúveis são usados na preparação de soluções de fertilização e ajuste de pH destas mesmas soluções, para culturas em substrato; os menos solúveis são usados para ajuste de pH dos solos e substratos. Por vezes, para sistemas de irrigação por gotejamento, são usados ácidos para ajuste de pH de águas de irrigação mais alcalinas (grande concentração de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) (Sonneveld e Voogt, 2009).

### Fertilizantes N

Os fertilizantes de N utilizados na agricultura fornecem este nutriente sob a forma de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ou ureia (*vide* Tabela 2.8). No cultivo em solo, todas as formas anteriores são usadas, enquanto que para o crescimento em hidroponia, o NO<sub>3</sub><sup>-</sup> é o mais aplicado, seguido de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> em pequenas quantidades. Neste tipo de cultivo, o NH<sub>4</sub><sup>+</sup> pode ser adicionado à solução de nutrientes para controlo de pH. Já a ureia não é utilizada em hidroponia, porque deve ser degradada por microrganismos a compostos mais simples antes de ser utilizada pelas plantas (se tal não acontecer, pode ser fitotóxica) (Kafkafi e Tarchitzky, 2011).

Tabela 2.8 - Fertilizantes N usados em estufas de cultivo (<sup>1</sup> para químicos puros).

Fertilizante	Fórmula química	%N	% outros
Nitrato de amónio	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	35	
Nitrochalk	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> +CaCO <sub>3</sub>	21-27	
Sulfato de amónio	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	21	24 S
Nitrato de cálcio	5[Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O].NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	15,5	18 Ca
Solução de nitrato de cálcio	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	17 <sup>1</sup>	24 Ca <sup>1</sup>
Ureia	CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	46	
Solução de ácido nítrico	HNO <sub>3</sub>	22 <sup>1</sup>	

### Fertilizantes K

A lista de fertilizantes K usados na hidroponia encontra-se na Tabela 2.9. Dos apresentados, o fertilizante mais usado para fins de fortalecimento da cultura é o sulfato de potássio. O composto KCl é usado em aplicações especiais, como substituto de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, quando o Cl é necessário na solução

de nutrientes, e quando a concentração deste é muito baixa na água de irrigação (Sonneveld e Voogt, 2009).

Tabela 2.9 - Fertilizantes de K usados na hidroponia (<sup>2</sup>Para químicos puros).

Fertilizante	Fórmula química	%K <sub>2</sub> O	%K	% Outros
Sulfato de potássio	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	54	45	18 S
Sulfato de magnésio e potássio	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> MgSO <sub>4</sub>	29	24	20 S; 6 Mg
Nitrato de potássio	KNO <sub>3</sub>	46	38	13 N
Cloreto de potássio	KCl	62	52	48 Cl
Hidróxido de potássio	KOH	84 <sup>2</sup>	70 <sup>2</sup>	

### Fertilizantes P

Na hidroponia são usados fertilizantes de alta solubilidade, à base de ortofosfatos, como NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> e H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (*vide* Tabela 2.10). Ultimamente tem sido introduzido o uso de polifosfatos específicos na água de irrigação para prevenir a precipitação de Ca e Mg e, assim, diminuir a probabilidade do obstrução do sistema de irrigação. No entanto, a composição destes compostos não é conhecida (Sonneveld e Voogt, 2009).

Tabela 2.10 - Fertilizantes de P usados em hidroponia (<sup>1</sup>Para químicos puros.;<sup>2</sup>Trademarks).

Fertilizante	Fórmula química/designação comercial	%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%P	% Outros
Fosfato monopotássico	NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	60	26	12 N
Ácido fosfórico	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	72 <sup>1</sup>	32 <sup>1</sup>	
Polifosfato	Super FK <sup>2</sup>	16	6.7	22 K
	Vitaphoska <sup>2</sup>	31	13	41 K

### Fertilizantes Mg

Da lista de fertilizantes usados na hidroponia como fonte de magnésio (*vide* Tabela 2.11), o sal Epsom é usado quando se pretende uma dissolução rápida. No entanto, quando se requer baixas quantidades de SO<sub>4</sub><sup>-</sup> na solução de nutrientes, são maioritariamente usados os fertilizantes com nitrato. Devido ao facto de o Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O ser higroscópico, na maioria das vezes, este sal é vendido em solução concentrada (Sonneveld e Voogt, 2009).

Tabela 2.11 - Fertilizantes de Mg utilizados na hidroponia (<sup>1</sup>Para químicos puros).

Fertilizante	Fórmula química	%MgO	% Mg	% outros
Sal Epsom	MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	16	10	13S
Nitrato de magnésio	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	15	9	11 N
Solução de nitrato de magnésio	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sup>1</sup>	27 <sup>1</sup>	16 <sup>1</sup>	19N <sup>1</sup>

### Fertilizantes de Ca

O fornecimento de Ca ao solo tem uma outra função, além da disponibilização deste nutriente:: controlo do pH. Em hidroponia, este elemento pretende-se na forma solúvel, sendo que o fertilizante mais usado é o  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ . Outros fertilizantes existentes que contenham sais de Ca, apesar de mais acessíveis e amplamente usados, contêm elevados teores de substâncias insolúveis, pelo que raramente são utilizados na hidroponia. Porém, em algumas situações, pode ser utilizado na solução nutritiva o composto  $\text{CaCl}_2$ , em vez de KCl (*vide* Tabela 2.12) (Kafkafi e Tarchitzky, 2011).

Tabela 2.12 - Fertilizantes de Ca utilizados em hidroponia (<sup>1</sup>Valores máximos).

Fertilizante	Fórmula química	%CaO	%Ca	% outros
Cloreto de cálcio	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	38	27	47 Cl

### Fertilizantes de Si

O Si não é um elemento essencial, mas é benéfico para algumas culturas. Na hidroponia, a disponibilidade deste elemento pode ser insuficiente. À semelhança de qualquer nutriente, o uso de fertilizantes pode colmatar a sua carência natural. Todavia, este elemento não é solúvel em água, sendo que a sua precipitação poderá trazer complicações no sistema de irrigação das culturas. Algumas formas coloidais fornecem este elemento na forma de um gel, em combinação com alguns elementos em grandes concentrações, como Li e Na, para manter o gel estável. Como os dois elementos referidos são tóxicos para as plantas, este composto torna-se inadequado como fertilizante. Em alternativa, compostos de Si como o metassilicato de potássio são estabilizados com KOH e comercializados em forma de gel concentrado (Sonneveld e Voogt, 2009).

### Micro nutrientes

Na hidroponia são também necessários suplementos de micronutrientes, para melhorar o desempenho das culturas. O mesmo raramente acontece com as culturas desenvolvidas no solo, pois estes elementos estão presentes, naturalmente, na maior parte dos solos. Estes micronutrientes podem ser fornecidos, da mesma forma, pela água de irrigação (Sonneveld e Voogt, 2009).

A disponibilidade dos micronutrientes é fortemente influenciada pelo pH: altos valores de pH reduzem a absorção de todos os micronutrientes, com exceção do Mo, em que a absorção aumenta com o aumento de pH (Lucas & Davis (1961) apud Sonneveld e Voogt (2009)).

Os principais fertilizantes de micronutrientes estão listados na Tabela 2.13. Destes, os que contêm  $\text{SO}_4$  são mencionados como os mais eficazes e mais acessíveis às culturas. No caso dos compostos ricos em Fe, estes contêm quelatos, produzidos artificialmente. O tipo de quelatos a usar é determinado pelo pH do solo (Sonneveld e Voogt, 2009).

Tabela 2.13 - Principais fertilizantes de micronutrientes usados na hidroponia.

Fertilizante	Fórmula química	%elemento essencial	Comentários
Sulfato de manganésio	MnSO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O	32 Mn	
Sulfato de zinco	ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	23 Zn	
Sulfato de zinco	ZNSO <sub>4</sub> .6H <sub>2</sub> O	24 Zn	47 Cl
Borax	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .10H <sub>2</sub> O	11 B	
Ácido Bórico	H <sub>3</sub> BO <sub>4</sub>	17B	
Sulfato de cobre	CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O	25 Cu	
Molibdato de sódio	Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	40 Mo	
Quelato de ferro	Fe-EDTA	13 Fe	pH<6
Quelato de ferro	Fe-DTPA	3-11 Fe	pH<7,5
Quelato de ferro	Fe-EDDHA	5-6 Fe	Todos os valores de pH

De acordo com Marschner e Marschner (1995), existem outros elementos que podem ser essenciais ou benéficos para o desenvolvimento das plantas, como o Cl. Em horticultura, particularmente, quantidades de Cl superiores àquelas que são idealmente necessárias não são recomendadas, devido à interação do Cl com a absorção de Ca (Voogt e Sonneveld, 2004).

#### Fertilizantes compostos

Dos inúmeros fertilizantes compostos produzidos industrialmente, os mais adequados para a fertirrigação contêm elementos principais como N, P e K, mas também Mg, micronutrientes e quantidades significativas de SO<sub>4</sub>. A composição de cada fertilizante é ajustada a um certo tipo de cultura e método de aplicação. Em comparação com os fertilizantes simples, os compostos tem a vantagem de serem fáceis de manusear, devido às características de granulação e boa solubilidade para uso em fertirrigação. Em contrapartida, os fertilizantes simples permitem a manipulação de elementos específicos, relativamente às necessidades nutricionais (Voogt e Sonneveld, 2004).

#### Fertilizantes de libertação lenta

Os fertilizantes de libertação lenta são caracterizados pela libertação gradual de nutrientes, durante um determinado período de tempo. Estes podem ser simples ou compostos. Este tipo de fertilizantes não é largamente usado na hidroponia porque a irrigação frequente fornece todos os nutrientes necessários à planta, durante todo o seu ciclo de produção (Voogt e Sonneveld, 2004).



### 2.5.2.3 *Qualidade da água de irrigação e oxigenação*

A qualidade da água de irrigação afeta a composição da solução de nutrientes, assim como a sua própria reutilização. Idealmente, as concentrações de elementos inorgânicos para a implementação de um sistema de recirculação devem ser baixas, ou, mais concretamente, iguais ou inferiores às concentrações de assimilação pelas plantas. Esta condição verifica-se quando é usada água da chuva ou água dessalinizada. No entanto, quando são utilizadas massas de águas superficiais ou subterrâneas, estas podem conter concentrações substanciais de elementos inorgânicos superiores às requeridas pelas culturas, pelo que a recirculação pode ser limitada (Sonneveld e Voogt, 2009).

Perante a presença de elementos inorgânicos ou de bicarbonatos, a composição da solução de nutrientes tem que ser reajustada. Mais concretamente, quando a água de irrigação apresenta concentrações de elementos inorgânicos, como nutrientes e sais residuais, superiores às concentrações de absorção das culturas, deve ser efetuada uma redução (ou mesmo interrupção) da adição dos respetivos nutrientes.

Além disso, a situação anterior pode levar à acumulação elevada de sais minerais e nutrientes em excesso na zona radicular das plantas, o que pode implicar uma drenagem sistemática da água de irrigação e, conseqüentemente, uma adição sistemática de nutrientes. Por último, a presença de concentrações substanciais de bicarbonatos provoca um aumento drástico de pH, que pode ser colmatado, por exemplo, pela adição de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) (Sonneveld e Voogt, 2009).

Relativamente à frequência de irrigação, esta deve ser equilibrada com a oxigenação do sistema radicular e com as condições de evapotranspiração (quando este fenómeno se verifica a taxas muito elevadas, a frequência de irrigação deve aumentar).

Assim, da mesma forma que a qualidade da água é um fator determinante, a oxigenação também o é, pois influencia fortemente a absorção de água e nutrientes pelas culturas. O arejamento insuficiente pode causar hipoxia nas raízes das plantas, comprometendo o desempenho destas (Morard e Silvestre, 1996; Morard, Lacoste e Silvestre, 2000; Urrestarazu e Mazuela, 2005). Caso o fornecimento de oxigénio seja um fator limitante, o arejamento forçado é uma opção, assim como a adição de peróxido de potássio, embora esta seja mais dispendiosa (Urrestarazu e Mazuela, 2005; Zeroni, Gale e Ben-Asher, 1983). Situações de arejamento deficiente podem verificar-se quando existe uma colmatagem dos poros no substrato de hidroponia, podendo levar à interrupção das trocas gasosas entre a atmosfera e a rizosfera (Urrestarazu e Mazuela, 2005).

Tomando como exemplo o caso prático de um sistema NFT, a oxigenação da água pode ser feita por dois métodos: (i) no final dos canais de cultivo ou (ii) por uma válvula de *Venturi*. O primeiro método consiste na configuração da ligação entre o final de cada calha para o canal coletor, de forma a promover a turbulência da água (*vide* Figura 2.14).



Figura 2.14 - Método de oxigenação da água de irrigação, por turbulência (Padova e Oliveira, 2000).

Para o segundo método de oxigenação da água, é colocada uma válvula de *Venturi* no sistema de retorno da solução nutritiva, de modo a ocorrer a introdução de ar nesta solução (Furlani *et al.*, 1999).

#### **2.5.2.4 Preparação de solução de fertilizantes e absorção de nutrientes**

Segundo Furlani *et al.* (1999), a preparação de soluções iniciais de fertilizantes na forma concentrada, que vão ser adicionadas ao tanque de irrigação, deve ser feita de forma separada para evitar reações de precipitação. Como já foi referido anteriormente (*vide* Tabela 2.7), a mistura de nitrato de cálcio com substâncias contendo sulfatos ou fosfatos pode originar a formação de compostos insolúveis como sulfato de cálcio e fosfato de cálcio, respetivamente. Para além disso, a solução nutritiva deve ser formulada de acordo com uma série de fatores como espécie de planta cultivada, fase de desenvolvimento desta (crescimento ou maturação), ou fatores ambientais como temperatura, humidade ou luminosidade (Furlani, 1998). Geralmente, esta solução necessita de ajustes frequentes relativamente às necessidades nutritivas da cultura, dependendo da fase de evolução desta. Contudo, na prática, nem sempre este reajuste é feito com a frequência e rigor devidos (Lee, Lee e Lee, 2006).

A absorção de nutrientes pelas culturas é influenciada por vários fatores, como a concentração de nutrientes presentes na solução nutritiva, oxigenação, temperatura, pH da solução nutritiva, ou condições atmosféricas (temperatura e humidade do ar, intensidade da luz solar e ainda o fotoperíodo) (Padova e Oliveira, 2000).

Para obter um desenvolvimento ideal das culturas, Furlani *et al.* (1999) recomendam que os produtores acompanhem o desenvolvimento da cultura e absorção de nutrientes com recurso a análise das soluções nutritivas e, a partir destas, efetuar ajustes até chegar a uma formulação adequada.

### 2.5.2.5 pH, condutividade elétrica e potencial osmótico

O pH é uma variável de controlo na soluções nutritivas que assume um papel duplamente importante. Além de influenciar o equilíbrio de oxidação-redução, influencia a solubilidade e a forma iónica de alguns compostos essenciais ao desenvolvimento das plantas. Valores de pH baixos podem originar uma competição entre os iões  $H^+$  e alguns catiões essenciais para as plantas como  $NH_4^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$  e  $Zn^{2+}$ . Por outro lado, um pH elevado diminui a absorção de aniões como  $NO_3^-$ ,  $PO_4^{2-}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$  e  $MnO_4^{2-}$  (Padova e Oliveira, 2000). Outro potencial efeito do pH elevado é a formação de hidróxidos insolúveis e precipitação de elementos essenciais, como o fosfato de cálcio, ferro, zinco, cobre e manganês. A disponibilidade dos elementos, em função do pH, é apresentada na Figura 2.15.

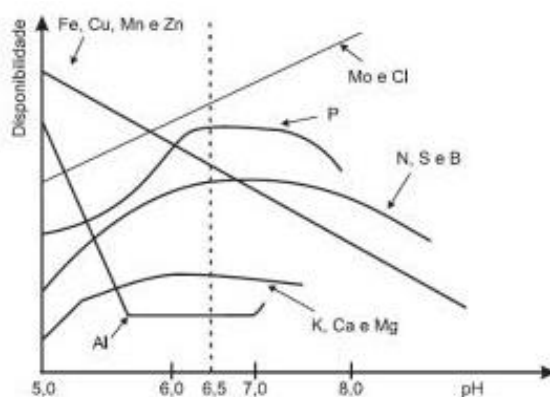


Figura 2.15 - Relação entre pH e disponibilidade de nutrientes (Malavolta (1980) apud Padova e Oliveira (2000)).

Um exemplo deste efeito é a precipitação do  $Fe^{3+}$  como hidróxido de ferro a pH 8, comprometendo a disponibilidade deste elemento para as plantas. Em sentido inverso, valores de pH muito baixos afetam a absorção de N e, mais acentuadamente, a de Ca, P e Mg. Nesta gama, ocorre a formação de fosfato de ferro, com efeito igualmente negativo para as plantas (Malavolta (1980) apud Padova e Oliveira (2000)).

Num sistema de hidroponia existem oscilações de pH decorrentes do facto de grande parte das soluções nutritivas não apresentarem capacidade de tampão, o que se traduz na absorção diferenciada de catiões e aniões (Furlani, 1998). No entanto, segundo Furlani *et al.* (1999), as variações de pH na gama de 4,5 a 7,5 são toleráveis e não constituem problemas no crescimento das plantas.

A condutividade elétrica (CE) (ou o potencial osmótico) é outra das variáveis de controlo nas soluções nutritivas na hidroponia. Este parâmetro permite, de forma indireta, medir a concentração total de iões. A sua monitorização frequente é fundamental neste tipo de cultivo, sendo mais económico do que a aquisição de equipamentos próprios para monitorizar a concentração individual de cada nutriente (Padova e Oliveira, 2000). Porém, a medição da condutividade não permite determinar quais os nutrientes em défice ou em excesso.

A relação entre a CE e a concentração de sais é linear, dentro de um determinado intervalo. Além disso, cada ião possui uma contribuição específica para a CE, sendo que esta depende de fatores

como a valência dos iões e temperatura da solução (Sonneveld e Voogt, 2009). Na figura seguinte pode visualizar-se a relação entre a concentração de diferentes sais e a CE, para um dado número de soluções singulares.

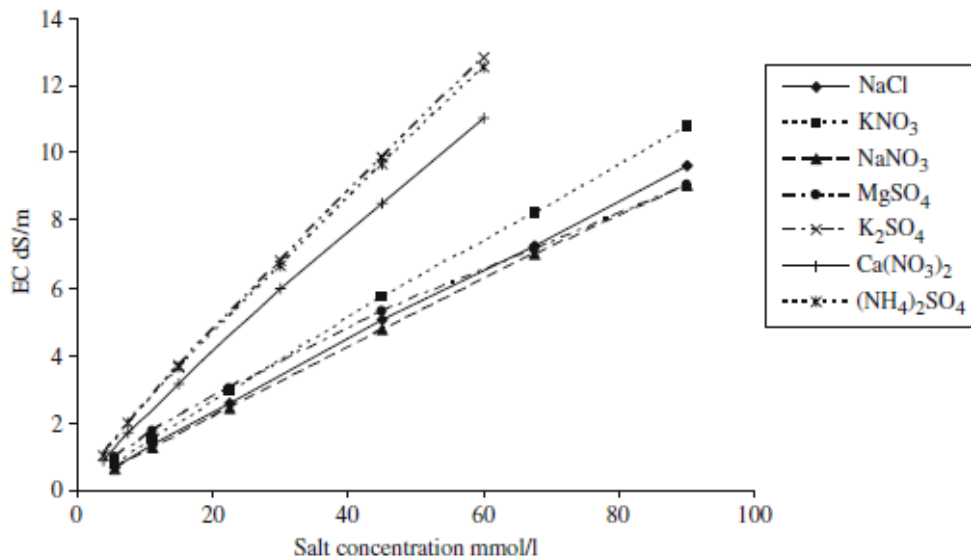


Figura 2.16 - Relação entre a concentração de diferentes sais e a CE, a 25°C (Sonneveld et al. (1966) apud Sonneveld & Voogt (2009)).

De acordo com Sonneveld & Voogt (2009), a temperatura da solução é outra variável que influencia um aumento da condutividade.

Relativamente ao potencial osmótico (PO), este tem mostrado ser bastante importante no sistema radicular nas raízes, como um fator importante para o crescimento das culturas. A um baixo potencial osmótico está associado uma elevada condutividade elétrica. Quando o PO é baixo, este pode ser útil no controlo do crescimento exuberante das culturas e melhoria da qualidade do produto, que normalmente ocorre a temperaturas altas, intensidade de luz reduzida e água de irrigação abundante (Sonneveld e Voogt, 2009). Pelo contrário, altos PO (baixa CE) no sistema radicular das plantas são responsáveis por variações de características de plantas, tanto em vegetais como em flores (*e.g.* coloração irregular de tomates (Sonneveld e Voogt, 1990) e folhas de alface transparentes (Maaswinkel e Welles, 1986)).

### 2.5.2.6 Controlo de pragas, doenças e outros problemas operacionais

Assim como em qualquer outro sistema de produção agrícola, a presença de pragas é, muitas vezes, inevitável. A incidência aumenta se a solução nutritiva utilizada for recirculada por todo o sistema de fertirrigação (Lee, Lee e Lee, 2006). Em ambientes de estufa existem inúmeros métodos para o controlo de pragas, tais como armadilhas luminosas, infusões de plantas repelentes, telas antiafídeos e produtos químicos (Padova e Oliveira, 2000).

As principais pragas nas culturas hidropónicas dividem-se em duas categorias: (i) pragas sugadoras e raspadoras (*trips*, pulgões e ácaros); (ii) pragas mastigadoras (larva minadora e lagartas).

Relativamente a doenças fúngicas ou bacterioses, a hidroponia apresenta-se como um método de cultivo vantajoso, pois a incidência destas doenças é menor, ou até mesmo nula, devido ao facto de as culturas não estarem em contacto com o solo (Padova e Oliveira, 2000).

Também a acumulação de ácidos orgânicos fitotóxicos na solução de nutrientes pode tornar-se um problema se for negligenciado. Estes ácidos orgânicos têm origem no sistema radicular das plantas, em que as raízes exsudam muitos tipos de ácidos orgânicos na rizosfera externa, conhecidos por serem inibidores de crescimento (Rice (1984) apud Lee, Lee e Lee (2006)). Uma solução para a remoção destes ácidos orgânicos consiste na utilização de carvão ativado, de acordo com alguns estudos (Yu e Matsui, 1994, 1993). A eliminação destes inibidores de crescimento permite que a reutilização desta solução possa ser uma medida mais adotada nos cultivos em hidroponia (Lee, Lee e Lee, 2006).

### **2.5.3 Culturas na hidroponia**

A hidroponia é utilizada essencialmente para o cultivo de plantas de porte pequeno, sendo que, para plantas de médio e grande porte, o cultivo é limitado consoante a técnica de hidroponia utilizada (Geromel, 2015). Das plantas de pequeno porte, são produzidas hortícolas, plantas ornamentais e medicinais.

À escala comercial, a alface (*Lactuca sativa L.*) é o vegetal produzido em maior escala em sistemas NFT devido à fácil adaptação ao sistema referido, resultando em elevados rendimentos de produção e reduções de ciclo (35 dias) em relação ao cultivo no solo (Ohse *et al.*, 2001; Potrich, Pinheiro e Schmidt, 2012). Além disso, as características das instalações de produção (estufa) proporcionam o controlo da temperatura ideal para a produção deste vegetal (20 a 30°C) o que possibilita o fornecimento ininterrupto deste produto, por parte dos produtores, durante todo o ano (Huang *et al.*, 2002). Ao nível das hortícolas, são também produzidos tomates, pepinos, agriões, melão, pimentos, morangos e espinafres (Caruso *et al.*, 2011; Chan-Navarrete *et al.*, 2014; Lee, Lee e Lee, 2006; Urrestarazu e Mazuela, 2005).

Uma das vantagens da produção de bens alimentares a partir desta técnica é a qualidade do produto final e “higienização” devido à ausência de contacto com o solo. Este facto minimiza problemas relacionados com ervas, insetos e doenças, bem como a possibilidade do cultivo perto do distribuidor de mercado (Huang *et al.*, 2002).

## 2.6 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

### 2.6.1 Introdução

A crescente consciencialização sobre a importância da proteção ambiental e dos possíveis impactes ambientais associados à produção de bens e serviços resultou num aumento do interesse pelo desenvolvimento de metodologias para avaliar e reduzir estes impactes. Estas metodologias são instrumentos importantes não só do ponto de vista ambiental, mas também no apoio à tomada de decisões em áreas como a inovação, estratégias e políticas.

Uma das metodologias mais consolidadas é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Para esta metodologia, podem ser encontradas ferramentas e bases de dados que potenciam uma avaliação cada vez mais precisa.

No âmbito da ACV, as normas EN ISO 14040:2006 - *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework* (ISO, 2006a) e EN ISO 14044:2006 *Environmental management - Life cycle assessment – Requirements and guidelines* (ISO, 2006b), criadas pelo comité técnico ISO/TC 207, fornecem uma base estrutural metodológica para a aplicação da ACV, embora, ao mesmo tempo, não constituam um manual de aplicação concreto desta técnica (ISO, 2006).

De acordo com as normas anteriores, a ACV define-se como sendo um instrumento de gestão ambiental, que permite a compilação e avaliação das entradas e saídas e potenciais impactes ambientais de um sistema/produto ao longo do seu ciclo de vida, “from cradle-to-grave”, incluindo a extração de matérias-primas, a produção, o uso e tratamento de fim de vida, a reciclagem ou a deposição final no ambiente.

Esta metodologia tem numerosas aplicações, desde o desenvolvimento de produtos, passando pela rotulagem ecológica e regulação, até à definição de cenários de prioridade e de política ambiental (ISO, 2006).

## 2.6.2 Metodologia

Segundo as normas ISO 14040:2006 (ISO, 2006a) e ISO 14044:2006 (ISO, 2006b), a metodologia de implementação de uma ACV compreende várias fases, como ilustra a Figura 2.17.

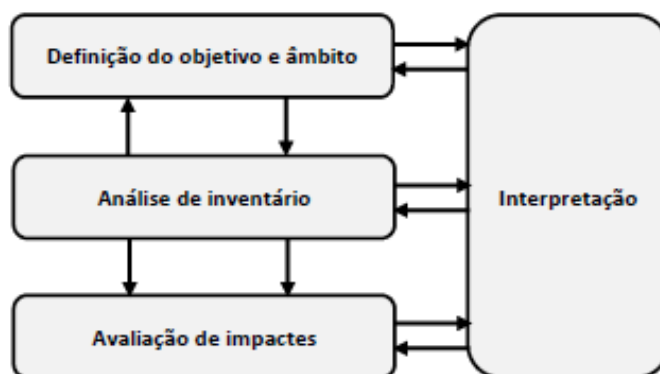


Figura 2.17 - Fases de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ISO, 2006).

As várias fases estão interligadas, pois o processo de realização de um inventário é iterativo, o que significa que certas limitações podem comprometer os objetivos estabelecidos previamente. Assim, ao longo do estudo, as várias fases podem ser alvo de alterações (ISO, 2006).

A análise das várias fases de uma ACV, que constam na Figura 2.24, serão descritas, de uma forma sucinta, nas subsecções seguintes. As fontes de informação usadas foram as normas ISO 14044:2006 e ISO 14040:2006, bem como a dissertação *Análise do ciclo de vida de produtos* (ISO, 2006, 2006; Vicente *et al.*, 2004).

## 2.6.3 Definição do objetivo e âmbito

Na condução de uma ACV é importante uma clara e inequívoca definição de “objetivo” e “âmbito”.

### 2.6.3.1 Objetivo

O objetivo de um estudo ACV deve ser claro e consistente com a sua aplicação, incluindo quais as razões que o motivaram, assim como o público-alvo. Nesta etapa deve ser descrita a finalidade do estudo, sendo que os resultados obtidos têm que estar fortemente relacionados com a dita finalidade.

### **2.6.3.2 Âmbito de estudo**

Na definição do âmbito de um estudo ACV devem ser considerados vários parâmetros: as funções do(s) sistema(s) de estudo, a unidade funcional, as fronteiras do sistema, procedimentos de afetação, categorias de impacto e metodologias de análise de impacto, requisitos de dados, pressupostos, limitações e requisitos iniciais de qualidade dos dados.

Apesar da possibilidade do âmbito do estudo poder ser redefinido ao longo do mesmo, este deve ser minimamente bem definido para garantir que a profundidade e nível de detalhe da análise sejam compatíveis e suficientes para satisfazer os objetivos estabelecidos.

#### Unidade funcional e fluxos de referência

A definição da unidade funcional (UF) deve ir ao encontro do objetivo e âmbito do estudo. Esta funciona como referência pela qual se calculam os fluxos de entrada e saída do sistema, e ainda para assegurar a comparabilidade de resultados ACV, sendo particularmente fundamental quando diferentes sistemas estão a ser avaliados (ISO, 2006).

#### Fronteiras do sistema

As fronteiras do sistema definem a extensão do trabalho, com a definição dos processos unitários que são incluídos no sistema e os que são excluídos. A escolha destes processos depende da definição do objetivo e âmbito do estudo, aplicação pretendida, pressupostos elaborados, restrições de dados, audiência pretendida e ainda critérios *cut-off* (critérios de exclusão). Estes últimos devem ser identificados e justificados, no âmbito do estudo (ISO, 2006).

#### Requisitos da qualidade de dados

Os requisitos de qualidade dos dados especificam, no geral, as características dos dados necessários para o estudo, em termos de representatividade ou precisão. Assim, as fontes de informação devem ser documentadas e todos os pressupostos devem ser mencionados para perceber a fiabilidade e interpretação dos resultados obtidos do estudo (ISO, 2006).

Além disso, a existência (ou não) de alocação de fluxos também deve ser estipulada nesta fase, uma vez que a qualidade dos dados pode ser influenciada por este tipo de procedimento (ISO, 2006).

### **2.6.3.3 Comparação entre sistemas**

Em estudos comparativos, a equivalência dos sistemas deve ser avaliada antes da interpretação de resultados. Assim, os sistemas devem ser comparados utilizando a mesma unidade funcional e considerações metodológicas equivalentes, tais como o desempenho, as fronteiras do sistema, a qualidade dos dados, os procedimentos de afetação, as regras de decisão na avaliação de entradas e saídas, e análise de impacto. Qualquer diferença entre sistemas, relativamente a estes parâmetros, deve ser identificada e mencionada (ISO, 2006).



#### **2.6.4 Análise de inventário do ciclo de vida**

A análise de inventário do ciclo de vida (ICV) baseia-se essencialmente na compilação dos dados mensuráveis relativos aos processos (rede de fluxos materiais e de energia, tecnologias, etc.), assim como as respetivas intervenções ambientais (emissões de poluentes, etc.) que servirão de base ao estabelecimento de uma análise de inventário.

O processo de realização de uma análise de inventário é iterativo, isto é, à medida que vão sendo reunidas as informações acerca do sistema, podem ser identificados novos requisitos de dados ou limitações que necessitam de alterações nos procedimentos de recolha de dados, de modo a que os objetivos finais sejam satisfeitos. Por vezes, podem ser identificados obstáculos que impliquem revisões dos objetivos ou âmbito do estudo (ISO, 2006b).

Na análise de inventário, a árvore do processo é o esquema mais utilizado para resumir todos os processos unitários que constituem o ciclo de vida do produto/serviços em estudo. Esta deve conter também todas as ligações existentes entre as entradas e saídas, a nível económico e ambiental, e também processos excluídos das fronteiras do sistema (Bruijn, de, Duin, van e Huijbregts, 2002).

#### **2.6.5 Avaliação de impactes do ciclo de vida**

A Avaliação de Impactes do Ciclo de Vida (AICV) tem como objetivo a avaliação da importância dos potenciais impactes ambientais, usando os resultados de ICV. Por outras palavras, as intervenções ambientais (quantificadas no ICV) são transformadas em efeitos ambientais (categorias de impacte), conduzindo à avaliação de impactes.

A fase de avaliação de impactes é constituída por uma série de “elementos obrigatórios” e de “elementos opcionais”, conforme se ilustra na *Figura 2.18*.

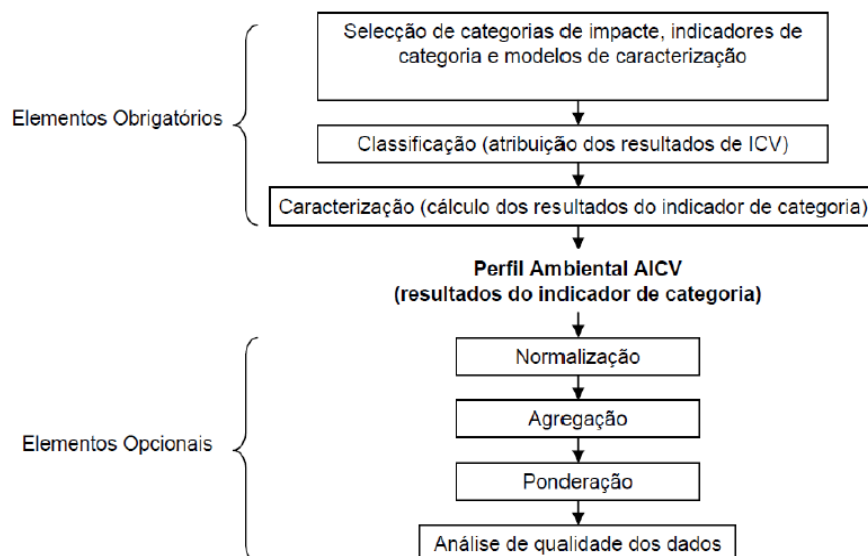


Figura 2.18 - Elementos da fase AICV (Vicente *et al.*, 2004).

Os elementos obrigatórios convertem os resultados do ICV em resultados de indicador de categoria (perfil ambiental) para as diferentes categorias de impacto. Já os elementos opcionais servem para normalizar, agrupar ou ponderar os resultados do indicador e técnicas de análise de qualidade dos dados.

### 2.6.5.1 Modelos de caracterização e categorias e impacto

A seleção de categorias de impacto e os respetivos indicadores de categoria devem ser estabelecidos durante a fase inicial de definição de objetivo e âmbito, com o fim de orientar o processo de recolha de dados de ICV e os pressupostos seguintes a esta fase.

Na bibliografia podem ser encontrados vários métodos de AICV sendo os mais conhecidos o método Eco-Indicator 99, o método Ecopontos 97, o método CML 2001, e mais recentemente o Recipe. O método CML 2001 é o mais amplamente usado em diversos estudos de ACV. As categorias de impacto que servem de suporte para esta metodologia foram publicadas pela *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) e correspondem a: depleção de recursos abióticos, uso do solo, alterações climáticas, depleção da camada de ozono, toxicidade humana, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade aquática (marinha), ecotoxicidade aquática (água doce), formação de oxidantes fotoquímicos, acidificação e eutrofização (Bruijn, de, Duin, van e Huijbregts, 2002).

### 2.6.5.2 Classificação

Na classificação é feita a afetação das várias intervenções ambientais às diferentes categorias de impacto. De notar que uma mesma intervenção ambiental (*e.g.* emissões de poluentes, extração

de recursos abióticos) pode estar associada a mais do que uma categoria de impacto e, conseqüentemente, tem de ser multiplamente contabilizada.

### 2.6.5.3 Caracterização

A caracterização consiste na atribuição de fatores de caracterização às intervenções ambientais, cujo peso relativo varia de acordo com a categoria em que é contabilizada, para que seja possível somar as contribuições de todas as intervenções por categoria. No final, obtém-se o indicador dessa categoria (ou impacto). Por sua vez, o conjunto de todos os indicadores de todas as categorias constitui o perfil ambiental. Matematicamente, o indicador de uma categoria é calculado a partir da seguinte expressão:

$$\text{impacte}_{\text{cat},j} = \sum_i m_i \times (\text{fator de caracterização})_{\text{cat},i} \quad (2.2)$$

Em que  $m_i$  é a quantidade de intervenção (em massa ou volume), por unidade funcional.

Os fatores de caracterização encontram-se tabelados, e os *softwares* de ACV já os têm integrados. Os valores destes fatores têm sofrido algumas alterações ao longo dos tempos, como consequência de alterações dos efeitos dos poluentes no ambiente e do conhecimento mais aproximado dos mesmos. Uma descrição mais detalhada sobre os elementos opcionais pode ser encontrada na literatura, nomeadamente em Vicente *et al.* (2004).

## 2.6.6 Interpretação

A interpretação do ciclo de vida constitui a última fase da ACV e visa a identificação, qualificação, análise e verificação dos resultados, de forma a formular conclusões, esclarecer limitações e sugerir recomendações (com base em descobertas das fases precedentes do estudo ACV ou ICV). Mais ainda, esta etapa visa relatar resultados da interpretação do ciclo de vida de forma transparente, de modo a encontrar os requisitos da aplicação, como descrito no objetivo e âmbito do estudo.

## 2.7 CONCLUSÃO

O aumento da utilização de biomassa em processos de combustão é, inevitavelmente, acompanhado por um aumento dos resíduos de combustão, as cinzas de biomassa. Este material é atualmente considerado um resíduo e, devido à carência de orientações para uma gestão adequada, é depositado em aterro. Face aos impactos ambientais e económicos desta prática e às propriedades químicas deste resíduo, são várias as opções de valorização existentes, sendo as mais conhecidas a valorização material das cinzas pela aplicação no solo ou a incorporação em materiais de construção. Em estudos de aplicação no solo, as cinzas são normalmente acompanhadas de

testes de lixiviação que demonstram que, na solução de lixiviado, os elementos químicos em maiores concentrações são, na verdade, nutrientes necessários ao crescimento das culturas.

Na agricultura, os métodos tradicionais de fertilização, assim como excessos de aplicação de fertilizantes, resultam em impactos negativos para o ambiente e culturas e ainda em custos económicos acrescidos para os produtores. No sentido de aumentar a eficiência da aplicação de fertilizantes, fertirrigação surge como uma técnica de fertilização que utiliza a água de irrigação como método de transporte dos nutrientes até às plantas. Dentro desta técnica, o cultivo de plantas pode ser feito com a presença ou ausência de solo sendo que esta última prática é designada por hidroponia. Esta é utilizada amplamente na produção de plantas hortícolas de pequeno porte, das quais a alface é a mais predominante.

Perante o potencial de valorização da solução de lixiviado num sistema de cultivo hidropónico de alfaces, será aplicada a ferramenta ACV na avaliação dos impactes ambientais desta operação de valorização.

## 3 LIXIVIADOS DE CINZAS DE BIOMASSA

### 3.1 INTRODUÇÃO

A composição das cinzas geradas na queima da biomassa confere-lhe potencial de valorização (*e.g.* como fonte de nutrientes para as plantas), podendo assim ser desviadas da deposição em aterro, o atual destino preferencial. Como já referido no Subcapítulo 2.3.4.3, são vários os estudos de valorização deste resíduo como fertilizante no solo, acompanhados com um estudo da caracterização deste mesmo resíduo.

Um estudo de caracterização dessas cinzas pode incluir os designados “testes de lixiviação”, que consistem no contacto deste material com água, numa determinada razão massa-volume, durante um determinado tempo, sob agitação e pH controlado ou não. Este tipo de caracterização é obrigatória para a definição da classe de aterro (de resíduos inertes, não perigosos ou perigosos) para a qual a cinza deve ser encaminhada, mas é igualmente relevante quando se perspetiva a sua deposição em solo como fonte de nutrientes. Neste último caso, os testes de lixiviação são normalmente conduzidos a pH controlado (cerca de 5), de modo a estimar a lixiviação dos nutrientes numa situação natural, realizada pela água da chuva.

Tendo em vista o objetivo principal do presente trabalho, foi feita uma pesquisa bibliográfica de estudos de caracterização química de cinzas de biomassa (volantes e de fundo), produzida em Portugal Continental, através de testes de lixiviação; a informação conseguida é apresentada no Subcapítulo 3.2. A importância do conhecimento dos resultados obtidos (por outros autores) nos referidos testes de lixiviação prendem-se assim com o facto de se pretender avaliar os impactes ambientais do uso das cinzas num plano de fertilização de uma espécie hortícola cultivada numa estufa hidropónica com o sistema NFT.

Nos estudos de ACV os consumos de energia elétrica são normalmente importantes contributos para os impactes ambientais totais dos sistemas. Atendendo a que nos testes de lixiviação há consumo de energia elétrica (pelos equipamentos que promovem a mistura das suspensões), e o tempo normalmente usado nestes testes é de 24h, num estudo de ACV esta etapa de lixiviação poderá ter um importante contributo nos impactes ambientais. Neste contexto, e no sentido de inferir sobre a possibilidade de reduzir o tempo de lixiviação sem prejuízo na solubilização dos principais nutrientes, levou-se a cabo um teste laboratorial de lixiviação com diferentes tempos. Os resultados deste ensaio são apresentados no Subcapítulo 3.3.

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DE LIXIVIADOS DE CINZAS VOLANTES E DE FUNDO

Visando obter uma composição média do lixiviado de cinzas, foram consultados vários estudos onde foram realizados ensaios de lixiviação a cinzas de biomassa. No entanto, aplicaram-se algumas restrições, que se encontram listadas na Tabela 3.1, com o objetivo de obter a informação relativa a um panorama nacional.

*Tabela 3.1 - Critérios aplicados na seleção de fontes bibliográficas, para composição do lixiviado das cinzas.*

<b>Localização geográfica da central de combustão</b>	<b>Portugal</b>
<b>Material utilizado na combustão</b>	Biomassa florestal
<b>Tecnologia de combustão</b>	Combustão em grelha e em leito fluidizado
<b>Tipos de cinza analisados</b>	Cinza volante (CV) e cinza de fundo (CF)
<b>Condições de análise de lixiviação das cinzas</b>	pH não controlado, em ensaio laboratorial

Com base nestas restrições, as referências bibliográficas usadas neste subcapítulo encontram-se na Tabela 3.2, onde constam igualmente informações relativas à tecnologia e à biomassa que esteve na origem das cinzas, bem como o tempo de amostragem e as normas adotadas nos testes de lixiviação. Salienta-se que foram apenas admitido o uso de lixiviados de cinzas obtidos a pH não controlado. no presente estudo de ACV.

Tabela 3.2- Dados relativos às referências bibliográficas utilizadas para este estudo.

Tecnologia de combustão	CTB	Combustível	Tempo amostragem	CF	CV	Teste lixiviação	Tamanho de partículas (mm)	Referência
CG	Dedicada	Resíduos de biomassa florestal (mistura de ramos, folhas e cascas, incluindo madeira de eucalipto ( <i>Eucalyptus globulus</i> ) e pinheiro ( <i>Pinus pinaster</i> )).	Bimestral	Grelha	PE + PC			
	Dedicada		Trimestral	Leito + PC + SA	PE			
CLFB	Cogeração	Casca de eucalipto ( <i>Eucalyptus globulus</i> ) e biomassa residual florestal. Por vezes resíduos de tratamento de águas residuais industriais e resíduos agrícolas como bagaço de azeitona, resíduos de madeira e cortiça).	Mensal		PE + PC + SA		< 4	Freire, Lopes e Tarelho (2015)
CLFB (50 MWth)	Cogeração	Mistura de biomassa florestal residual de eucalipto ( <i>Eucalyptus globulus</i> ) e pinheiro ( <i>Pinus pinaster</i> ) e ainda outras espécies, em menores quantidades.		Leito	SA+EC+PE	EN 12457-2	-	Tarelho <i>et al.</i> (2015)
CLFB (escala piloto)		Resíduos de biomassa florestal, incluindo principalmente resíduos da atividade de exploração de madeira de eucalipto.	Pontual		-		1.0-5.0	Teixeira, (2012)
CLFB (50-100 MW)	-	Resíduos de biomassa florestal (casca de eucalipto e resíduos de exploração madeireira como principais combustíveis).			-		0.3-1.0	Tarelho <i>et al.</i> (2012)
CLFB	-	Casca de eucalipto e casca de pinheiro sem qualquer tipo de pré-tratamento.			FM		Fração representativa	Dias (2011)

Legenda: CG – Combustão em Grelha      CTB – central termoelétrica de biomassa      EC – Economizador      NC – Não controlado  
 CLFB – Combustão em Leito Fluidizado Borbulhante      PE – Precipitador Eletroestático      SA – Sobre-aquecedor      FM - Filtro de mangas

Para os estudos encontrados, foram excluídos os resultados referentes a cinzas de fundo provenientes de combustão em grelha porque, derivado da natureza da tecnologia de combustão, as cinzas de fundo apresentam uma composição bastante díspar (ausência de material inerte do leito) das cinzas de fundo proveniente da combustão em leito fluidizado. Assim, este tipo de cinzas não apresenta quantidades significativas de material (areia), à partida, passível de ser incorporado em argamassas.

Das referências da Tabela 3.2 retiraram-se os resultados relativos aos elementos comumente analisados, e calculou-se o valor de concentração média ( $\bar{C}$ ) e respetivo intervalo de confiança, a 95% (IC<sub>95%</sub>). Este valores encontram-se na Tabela 3.3, bem como o número ( $n$ ) de valores experimentais usados no cálculo do valor médio. Verificou-se que nestes referências, apenas alguns apresentavam análises a todos os elementos listados na Tabela 3.3 e, por exemplo o fósforo (P) não foi analisado nas cinzas volantes em qualquer uma das referências. O azoto não é analisado pois, durante o processo de combustão, é libertado na forma gasosa, não existindo por isso nas cinzas, pelo menos em quantidades mensuráveis pelas técnicas de análise química comumente usadas neste tipo de estudos.

Tabela 3.3 - Composição média de vários elementos na solução de lixiviação de cinzas de fundo e cinzas volantes.

Elementos	CF			CV		
	$\bar{C}$ [mg/L]	IC <sub>95%</sub>	$n$	$\bar{C}$ [mg/L]	IC <sub>95%</sub>	$n$
Al	2,81E+02	3,85E+02	7	5,78E+00	1,44E+01	5
Ca	8,23E+02	6,71E+02	10	1,45E+03	2,09E+06	8
Fe	4,86E+01	3,16E+02	2	3,66E-02	2,15E-02	4
K	5,61E+01	3,93E+01	10	7,58E+02	7,98E+05	8
Mg	4,02E+01	8,27E+01	7	1,89E-01	3,57E-01	6
Na	4,60E+01	8,31E+01	10	1,59E+02	1,61E+05	8
Si	1,90E+00		1	2,09E+00	1,68E+01	2
Cl	4,93E+01	5,42E+01	6	6,59E+02	1,07E+03	7
P	4,50E+01		2	-		
S	3,37E+01	7,39E+01	5	1,97E+02	3,37E+02	3
Ti	2,77E+00	5,48E+00	4	3,75E-01	1,59E+00	2
Zn	2,68E-02		1	5,77E-01		3
Mn	2,95E+01		3	-	3,55E-01	
Ba	2,52E+00	6,84E+01	2	6,27E+00		5
Sr	3,53E-01	2,93E+01	1	2,76E+00	1,63E+01	3
Cr	1,03E-02		1	7,98E-02	4,12E+00	5
Cr VI	2,48E-01		1	3,30E-01	2,32E-02	1
Cu	-		-	9,90E-01		1
Pb	-		-	3,49E-02		5
As	-		-	8,90E-06	5,41E-02	1
B	1,75E-01		1	2,82E-02		3
Mo	9,92E-01		2	3,76E-01	3,63E-02	4
Sb	1,33E-05	1,26E+01	1	6,66E-06	5,41E-01	1



De acordo com a norma analítica utilizada em todos os estudos, os testes de lixiviação foram, genericamente, todos conduzidos à escala laboratorial, em recipiente fechado, no qual é introduzida a cinza e a água destilada, numa razão de 1kg/10L. Esta suspensão é agitada durante 24h.

Um breve análise aos valores da Tabela 3.3 constata-se que os elementos maioritários no eluato das cinzas de fundo são: Ca > Al > K > Na > Fe > Mg, etc., e nas cinzas volantes: Ca > K > Na > Cl > S, etc. Os elementos comuns mais abundantes nos eluatos (ou lixiviados) das duas tipologias de cinzas são o cálcio e o potássio.

Uma chamada de atenção para a elevada dispersão dos valores dos vários estudos, refletindo-se nos elevados valores dos desvios-padrão. Esta variabilidade de resultados é causada por diversos fatores, tais como: tecnologia de combustão, tipo e qualidade de biomassa que originou a cinza.

No capítulo seguinte será apresentado, entre outros, o plano de fertilização implementado numa unidade industrial de produção de plantas hortícolas. Os elementos químicos maioritários que dele fazem parte são: K > N > Ca > S > P > Mg.

Num cenário de integração das cinzas de biomassa (CF ou CV) no referido plano de fertilização, estas poderão ser uma fonte, com alguma expressão, de Ca e K.

### 3.3 INFLUÊNCIA DO TEMPO DE LIXIVIAÇÃO NA MOBILIZAÇÃO DE ELEMENTOS QUÍMICOS – ENSAIO LABORATORIAL

Como foi referido na introdução do presente capítulo, em estudos de ACV os consumos de energia elétrica são normalmente importantes contributos para os impactes ambientais totais dos sistemas. Visto que nos testes de lixiviação há consumo de energia elétrica, durante um período de 24h, este pode ter importantes impactes ambientais. Com o objetivo de avaliar a possibilidade de reduzir o tempo de lixiviação sem prejuízo na solubilização dos principais nutrientes (nesta caso o Ca e o K), levou-se a cabo um ensaio laboratorial de lixiviação com diferentes tempos.

A amostra de cinzas volantes usada era proveniente de uma central termoelétrica de biomassa portuguesa. O procedimento experimental adotado baseou-se na Norma EN 12457-2. Foram preparados 10 (dez) frascos com cinza e água destilada numa razão de 1kg/10L, e a cada frasco correspondeu um tempo de amostragem, previamente definido, conforme a Tabela 3.4. Para cada tempo de amostragem, não foram realizadas réplicas.

Os parâmetros analisados em cada tempo de amostragem foram o pH, a condutividade elétrica e a concentração de cálcio e de potássio no eluato.

*Tabela 3.4 - Tempos de amostragem pré-definidos e análises efetuadas.*

Tempos de amostragem (horas)	0,25	0,50	0,75	1,00	2,00	3,00	4,00	7,00	8,00	24,00
Parâmetros analisados/medidos	Concentração de Ca, K, temperatura, condutividade elétrica e pH									

Os resultados deste ensaio laboratorial, referentes ao pH e condutividade, ilustram-se na figura seguinte.

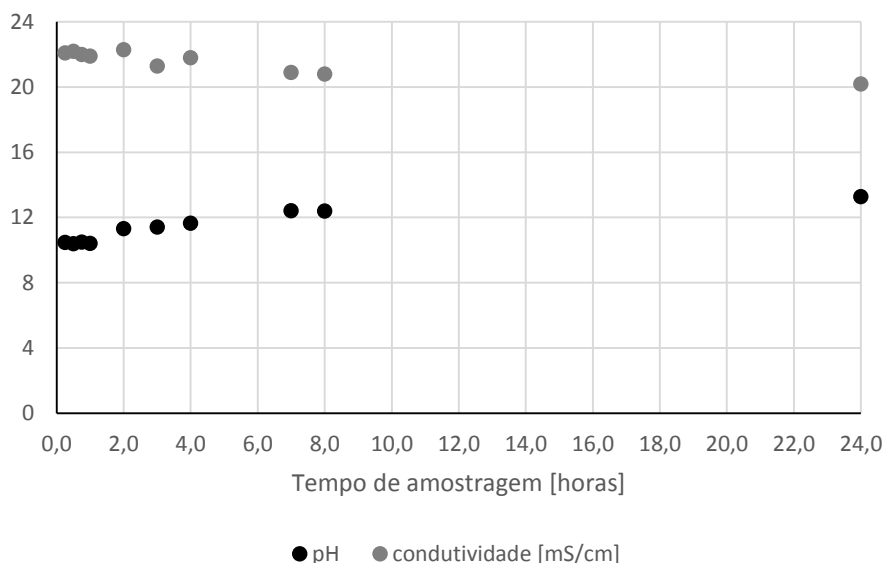


Figura 3.1 - Evolução do pH e condutividade elétrica ao longo tempo de lixiviação.

Como era esperado o pH das cinzas é fortemente alcalino, e no primeiro tempo de amostragem (0,25h) apresenta um valor de 10. Até ao final do ensaio o pH aumentou até cerca de 13. No que concerne à condutividade elétrica esta diminuiu em cerca de 2 mS/cm entre o primeiro e o último tempo de amostragem, o que se considera uma variação pouco expressiva.

As concentrações de Ca e K no lixiviado podem observadas na Figura 3.2.

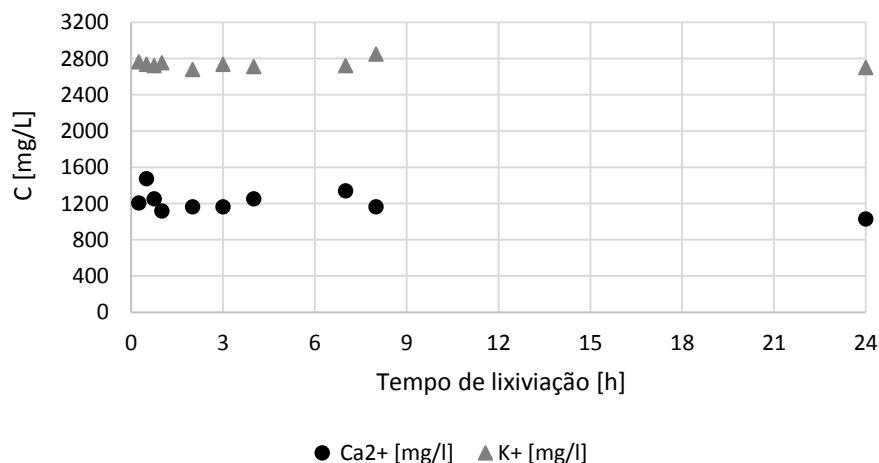


Figura 3.2 – Influência do tempo de lixiviação nas concentrações de Ca e K no lixiviado de cinzas volantes.

Na figura anterior verifica-se que as concentrações de cálcio e de potássio são praticamente constantes para os vários tempos de amostragem. Assim, pode inferir-se que qualquer tempo de lixiviação superior a 15 minutos não terá influência nas concentrações destes elementos.

### 3.4 CONCLUSÃO

A composição dos lixiviados de cinzas de biomassa é fortemente influenciada pela tecnologia e pela natureza da biomassa usadas na combustão. Em alguns dos testes de lixiviação levados a cabo por diferentes investigadores, foi feita uma seleção de gamas restritas de frações granulométricas, relativamente pequenas. Na prática, isto significa que uma parte das cinzas será excluída deste procedimento, resultando numa “baixa eficiência da quantidade do resíduo valorizado”.

No estudo de ACV realizado neste trabalho, considerou-se que todas as frações granulométricas de uma cinza eram passíveis de valorização e produziram um lixiviado com uma composição semelhante à média dos valores obtidos nos diversos ensaios de lixiviação reportados nas referências da Tabela 3.2 e que constam na Tabela 3.3.

Do ensaio de lixiviação realizado neste trabalho, infere-se que as concentrações dos principais nutrientes das plantas, fornecidos pelo lixiviado quer de CF quer de CV, não são afetados pelo tempo de lixiviação superior a 15 minutos. No estudo de ACV irá ser considerado (*vide* Capítulo 5) um tempo de lixiviação de 30 minutos.

Um estudo mais aprofundado do cultivo hidropónico de plantas hortícolas foi necessário para levar a cabo no presente trabalho. A informação foi recolhida numa unidade industrial e encontra-se detalhada no capítulo seguinte.



## **4 CULTIVO DE PLANTAS HORTÍCOLAS POR HIDROPONIA – CASO DE ESTUDO**

### **4.1 INTRODUÇÃO**

No decurso deste trabalho verificou-se a inexistência de informação relativa aos consumos (*inputs*) e produções (*outputs*) do processo de produção de hortícolas por hidroponia.

Com vista à obtenção desta informação, foi estabelecido contacto com uma unidade industrial de produção de hortícolas, maioritariamente alfaces, em estufa hidropónica NFT. A empresa denomina-se “Gotas Frescas”, com uma área de cultivo de 2000 m<sup>2</sup> e localiza-se no concelho de Oliveira de Azeméis.

A informação apresentada neste capítulo resultou de várias visitas à unidade, à consulta dos arquivos de folhas de registo diário de atividades (plantações, preparação de soluções nutritivas, expedições, etc.) e às faturas de consumos (eletricidade, fertilizantes, etc.). Os resultados deste inventário encontram-se nos Subcapítulos 4.2 e 4.3.

Com base nesta informação foi levado a cabo um estudo mais aprofundado sobre a composição química dos fertilizantes, que se apresenta no Subcapítulo 4.4. A informação/conhecimento que daqui resultou permitiu, por sua vez, formular um plano de fertilização que incluísse as cinzas de biomassa; esta abordagem é apresentada na Subcapítulo 4.5.

Fazendo a cinza parte do plano de fertilização, os fluxos mássicos e energéticos inventariados no Subcapítulo 4.3 são alterados, e por conseguinte, o novo cenário é apresentado no Subcapítulo 4.6.

### **4.2 CULTIVO HIDROPÓNICO**

Sendo a alface a principal espécie hortícola produzida na estufa da empresa “Gotas Frescas”, após a inventariação dos principais fluxos de entrada e saída daquela unidade, construiu-se o fluxograma representado na Figura 4.1.

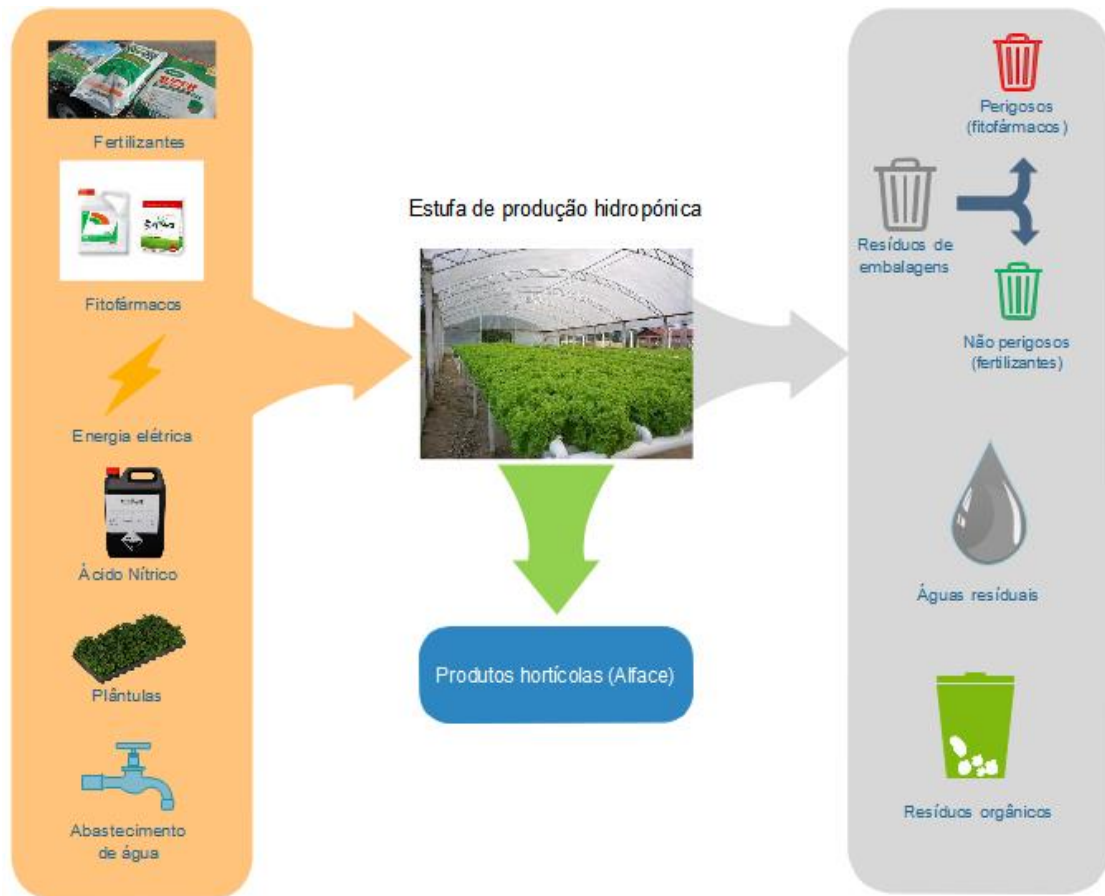


Figura 4.1 - Principais fluxos materiais e de energia do processo de produção de alfaces por hidroponia NFT.

Os principais *inputs* desta produção são os fertilizantes, fitofármacos, ácido nítrico, plântulas, água e energia elétrica.

Os fertilizantes usados diferem na sua composição, com o objetivo de fornecer os diferentes nutrientes necessários ao crescimento das plantas. Na prática, estes são dissolvidos em tanques separados, consoante a (in)compatibilidade (*vide* Tabela 2.7). Um esquema do sistema de fertirrigação é ilustrado na Figura 4.2.

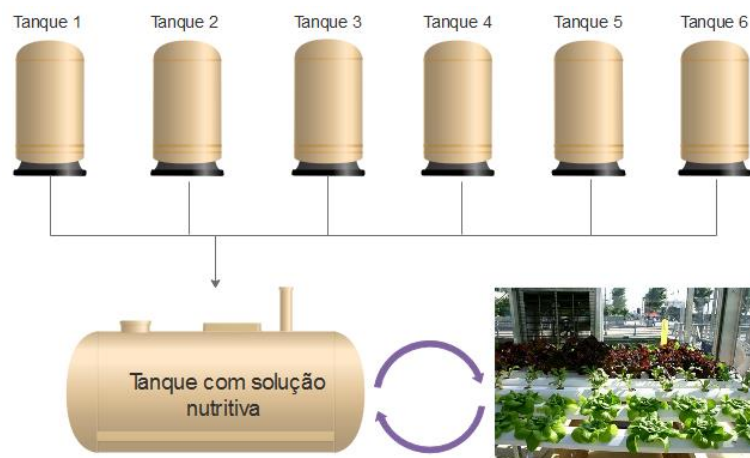


Figura 4.2 - Esquema do sistema de fertirrigação da empresa "Gotas Frescas".

Este sistema de irrigação é baseado num tanque principal de irrigação, que fornece a solução nutritiva a todas as bancadas de produção de hortícolas, num sistema fechado. A este tanque estão conectados outros 5 tanques com fertilizantes dissolvidos, de acordo com a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Fertilizantes utilizados, em cada tanque, no processo de produção hidropónico.

	Tanque 1 e 3			Tanque 2 e tanque 4				Tanque 6
Substância	Nitrato de cálcio	Ferro EDDHA	Microser	Nitrato de potássio	Sulfato de potássio	Fosfato de monopotássico	Sulfato de magnésio	Ácido nítrico

Durante o funcionamento do sistema de irrigação, apenas uma combinação de tanques (1 e 2 ou 3 e 4) fornece uma certa quantidade de solução de nutrientes ao tanque principal. Esta prática tem como finalidade o fornecimento ininterrupto de nutrientes às plantas, a fim de evitar quebras no rendimento da produção de alfaces.

A solução aquosa de ácido nítrico, que se encontra no tanque 6, é usada para manter o pH da solução nutritiva na gama de 5,6 - 6,0, sendo 5,8 o valor ótimo. Uma vez que a solução nutritiva é alimentada às plantas e retorna novamente ao tanque principal, nele é feita, continuamente, a monitorização do pH e da condutividade elétrica. Sempre que seja necessário baixar o pH, é então adicionado o ácido nítrico. A concentração de ácido nítrico utilizado na preparação do tanque 6 é de 60% [g HNO<sub>3</sub>/mL solução].

A monitorização da condutividade elétrica serve para inferir a concentração de nutrientes na solução nutritiva. Sempre que o seu valor desce abaixo do recomendável (1,3 mS/cm no verão e 1,8 mS/cm no inverno), são adicionados nutrientes (em caudais volumétricos iguais) dos tanques 1 e 3 ou, caso estes estejam vazios, dos tanques 2 e 4. Pelo contrário, quando a condutividade excede o valor recomendável, é adicionada água para diluir a solução nutritiva.

O sistema de irrigação é controlado na totalidade (adição de reagentes, ácido nítrico e água, medição de pH e CE, nível de solução nutritiva no tanque, etc.) por uma unidade informática de controlo, com possibilidade de acesso remoto.

As alterações de pH e de condutividade elétrica da solução nutritiva devem-se naturalmente às trocas que ocorrem entre a solução nutritiva e as plantas. Do metabolismo destas são excretadas substâncias para a solução, que vão sendo acumuladas ao longo do tempo e obrigam a uma substituição integral dessa mesma solução. Esta renovação, visando a mitigação de efeitos fitotóxicos e riscos de proliferação de doenças, é realizada com uma periodicidade aproximadamente mensal.

O tanque 5 serve apenas como reserva em caso de manutenção de outros reservatórios (particularmente o tanque 6).

Os fitofármacos utilizados dependem da sua função ativa, ou seja, podem ser desde fungicidas (contra os fungos Botrytis e Mildio) a inseticidas (contra larva mineira, afídeos e tripses). Para além da função de biocidas, alguns fitofármacos foliares são aplicados para melhorar o rendimento produtivo.

Como foi referido anteriormente, o sistema de irrigação é essencialmente automatizado, o que acarreta consumos de energia elétrica. Esta energia é utilizada em electroválvulas, num compressor (os tanques com nutrientes são homogeneizados com ar comprimido), na bombagem da água de irrigação e de lavagem, nos motores das cortinas laterais das estufas e na iluminação. De notar que na estufa em causa não existe sistema de aquecimento nem iluminação noturna. Os consumos de energia elétrica foram inventariados através da consulta das faturas emitidas pela entidade fornecedora, neste caso a EDP - Energias de Portugal.

Relativamente às plantas hortícolas, na estufa são produzidas outras espécies para além da alface (*e.g.* coentros, tomates, rabanetes), mas com muito pouca expressão. As várias espécies são adquiridas na forma de plântula e transplantadas para os canais de cultivo do sistema NFT.

A água consumida nesta unidade de hidroponia provém de um poço e de uma mina de água contígua à instalação. Esta água é usada diretamente, sem qualquer tipo de pré-tratamento, visto que cumpre os requisitos necessários para o processo. A quantidade de água extraída nestas fontes é suficiente para satisfazer as necessidades da unidade, pelo que não é consumida qualquer água do abastecimento municipal. Para além da produção de hortícolas, a água é utilizada na lavagem dos tanques, bancadas de produção e pavimentos.

As emissões decorrentes deste processo produtivo são: resíduos de embalagem (fitofármacos, fertilizantes e tabuleiros das plântulas), resíduos orgânicos biodegradáveis (plantas hortícolas que não cumprem os critérios de comercialização) e águas residuais.

Os resíduos de embalagem não perigosos (embalagens de fertilizantes e tabuleiros das plântulas) são triados no local e encaminhados para recolha seletiva (ecoponto), enquanto que os perigosos (embalagens de fitofármacos) são encaminhados para a entidade gestora de embalagens e resíduos de agricultura (“VALORFITO”). Para os resíduos de embalagens de fertilizantes e ácido nítrico, foi feita uma caracterização, segundo parâmetros que estão compilados na Tabela 4.2. As embalagens de fertilizantes são compostas por LDPE (polietileno de baixa densidade) e as de ácido nítrico por HDPE (polietileno de alta densidade).

Tabela 4.2 - Caracterização das embalagens de fertilizantes usadas na unidade industrial.

Nome substância	Material da embalagem	Massa embalagem [kg]	Massa média embalagem [kg]	Coefficiente variação (%)	Rácio [kg plástico/kg fertilizante]
Nitrato de cálcio	LDPE	0,069	0,0726	4,63%	2,90E-3
Nitrato de potássio		0,077			
Sulfato de potássio		0,072			
Sulfato de magnésio		0,080			
Ácido nítrico	HDPE	1,250	-	-	5,00E-2

O produto final, as alfaces, apresentam uma massa média de 300g, sendo que o ciclo de produção é de 40 dias. Este é um processo sensível a pequenas “perturbações” (*e.g.* concentração de nutrientes, pragas, etc.), o que resulta em pequenas variações na massa final dos produtos. Esta condição influencia a qualidade final da hortícola, levando a que ocasionalmente algumas sejam



descartadas porque morrem na fase de crescimento ou apresentam características impróprias para comercialização (e.g. folhas velhas, raízes). Este biorresíduo é encaminhado para alimentação animal (suínos).

Aquando da consulta das folhas de registo diário da operação da estufa, verificou-se a existência de algumas lacunas de informação, o que levou a que os quantitativos de alguns fluxos tivessem que ser estimados. Pela mesma razão, foi tomada a decisão de negligenciar alguns outros fluxos. Assim, foram excluídos do âmbito de estudo os biorresíduos gerados, assim como os fitofármacos usados e respetivo fluxo de embalagens; por outro lado, a quantidade de água consumida (e consequentemente descartada) em operações de limpeza foi estimada a partir de um ensaio prático considerando igualmente uma estimativa da frequência desta operação; o volume de águas residuais, correspondente à renovação da solução nutritiva foi estimado com base no volume de água no sistema de irrigação (capacidade do tanque com solução nutritiva e ainda a água nos canais de cultivo) e na periodicidade média de renovação.

### **4.3 FLUXOS MÁSSICOS E ENERGÉTICOS**

De acordo com os dados inventariados, o balanço de fluxos de entrada e saída para a produção de uma alface está representado na Figura 4.3.

Em termos quantitativos, destaca-se o volume de água, relativamente grande, que inclui a água utilizada nas lavagens, mudas de água de irrigação e ainda a produção de hortícolas. O volume de águas residuais corresponde a cerca de 13% do consumo de água potável, apesar de não se poder assumir que a restante massa de água seja captada totalmente pelas plantas, tendo em conta a inexistência de dados relativamente à evaporação de água no sistema de irrigação.

No que toca aos fertilizantes, o nitrato de cálcio e o nitrato de potássio são os utilizados em maiores quantidades, devido à importância nutricional destes (fornecedores de azoto). Como já seria de esperar, os fertilizantes que fornecem os micronutrientes (Ferro EDDHA e Microser) são os que apresentam menor consumo, por unidade funcional.

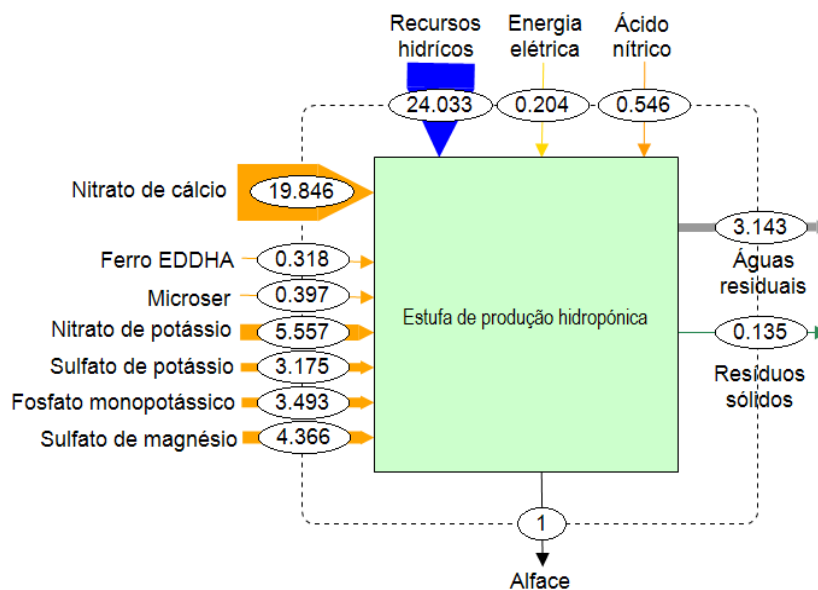


Figura 4.3 - Fluxos de entrada e saída na estufa de cultivo hidropônico de alface, da empresa “Gotas Frescas” (fluxos cor-de-laranja e verde: [g]; fluxos azul e cinzento: [L]; fluxo amarelo: [kWh]).

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS FERTILIZANTES

Os fertilizantes usados na unidade industrial apresentam composições variadas, de acordo com a Tabela 4.3. Uma breve análise da tabela permite concluir que os fertilizantes usados são compostos, isto é, fornecem mais do que um tipo de nutrientes. É exceção o fertilizante Ferro EDDHA, constituído por ferro quelatado. Relativamente aos outros fertilizantes, os mais consumidos são o nitrato de cálcio e o nitrato de potássio, de acordo com o balanço mássico da Figura 4.3. Como referido, estes fornecem azoto, além de Ca e K. Além do nitrato, também o sulfato de potássio e fosfato monopotássico são utilizados como fornecedores de K (entre outros elementos).

O fertilizante *Microser* fornece os microelementos essenciais às plantas.

Tabela 4.3 - Composição da solução nutritiva usada na fertirrigação na estufa da empresa Gotas Frescas (\*ferro quelatado).

Percentagem mássica em solução aquosa													
Nome Fertilizante	N-NO <sub>3</sub>	S-SO <sub>3</sub>	N-NH <sub>4</sub>	P-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ca-CaO	Mg-MgO	K- K <sub>2</sub> O	B	Cu	Fe*	Mn	Mo	Zn
Nitrato de Cálcio	14,4		1,1		26,5								
Ferro EDDHA										6,0			
Microser								0,7	0,3	7,6	3,3	0,1	0,6
Nitrato de potássio	13,7						46,3						
Sulfato de potássio		46,0					51,0						
Fosfato de monopotássico				52,0			34,0						
Sulfato de magnésio		32,0				16,0							

Conhecida a composição nutricional dos fertilizantes e do lixiviado de cinzas, ficam reunidas as condições para calcular os quantitativos de elementos fornecidos pelo lixiviado de cinzas, equivalente a uma massa fixa de fertilizantes, e, assim, estimar o potencial de redução de utilização dos mesmos pela incorporação de cinza no sistema. Esta etapa será abordada no subcapítulo seguinte.

#### **4.5 POTENCIAL DE REDUÇÃO DE FERTILIZANTES PELO USO DE CINZAS**

Comparando a composição química dos fertilizantes usados no plano de hidroponia, apresentado no subcapítulo anterior, com a composição química média das soluções de lixiviados de cinzas (*vide* Tabela 3.3), conclui-se que estas últimas podem constituir uma fonte relevante de Ca e de K.

Partindo deste pressuposto, recalcularam-se as quantidades necessárias de cada fertilizante químico caso o lixiviado das cinzas fosse integrado na preparação da solução nutritiva. Algumas Informações adicionais relativas a esta proposta são:

- O número de tanques de nutrientes na preparação da solução nutritiva aumenta de dois para três, dos quais dois já são existentes (*vide* Tabela 4.1) e o terceiro corresponde ao lixiviado;
- Cada um dos tanques contribui com o mesmo volume para solução final, i.e., para preparar um volume final de 100L, são usados 1L de cada tanque e 97L de água;
- O lixiviado é preparado numa razão de 1kg de cinza (de fundo ou volante) para 10L de água destilada – rácio igual ao usado nos testes de lixiviação *standard*;
- Foram alterados os quantitativos dos fertilizantes químicos de modo a que a solução final de hidroponia contivesse um teor mássico de cada nutriente igual ( $\pm 5\%$ ) ao existente na situação atual, i.e., no uso exclusivo de fertilizantes químicos;
- Admite-se que a alteração da condutividade da solução nutritiva não será afetada nas duas alternativas desta proposta;
- Assume-se que o consumo de ácido nítrico não é alterado por esta proposta. Este facto foi estimado a partir de cálculos estequiométricos, não tendo sido feito qualquer ensaio experimental que corrobore esta estimativa;
- Assume-se a inexistência de efeitos fitotóxicos e de bioacumulação de metais pesados.

Os resultados desta proposta para a preparação de 30.000L de solução nutritiva, integrando o lixiviado de cinzas de fundo ou lixiviado de cinzas volantes, encontram-se na tabela seguinte. Na mesma tabela consta também os quantitativos no uso exclusivo de fertilizantes químicos.

Tabela 4.4 - Potencial de redução de fertilizantes de acordo com os recursos utilizados.

<b>Fertilizante [kg]</b>	<b>Cenário</b>	<b>Exclusivamente fertilizantes químicos</b>	<b>CF</b>	<b>CV</b>
<b>Nitrato de cálcio</b>		25,0	23,7	23,3
<b>Nitrato de potássio</b>		7,0	8,0	7,5
<b>Sulfato de potássio</b>		4,0	3,8	3,5
<b>Fosfato monopotássico</b>		4,4	4,2	4,4
<b>Sulfato de magnésio</b>		5,5	5,2	5,5
<b>Ferro EDDHA</b>		0,4	0,4	0,4
<b>Microser</b>		0,5	0,5	0,5

Nesta proposta os fertilizantes Ferro EDDHA e Microser não são passíveis de redução.

Analisando os valores da tabela anterior, verifica-se que quando se usa lixiviado de CF há uma redução das quantidades de todos os fertilizantes, à exceção do nitrato de potássio, que incrementa 1kg. Na génese deste aumento está a necessidade de garantir o teor de N, já que o lixiviado não contém este nutriente essencial.

Relativamente ao uso do lixiviado de cinzas volantes, sendo este mais rico em cálcio e potássio, conseguem-se reduções superiores de nitrato de cálcio (1,7kg) e de sulfato de potássio (0,5kg), sendo que a quantidade de nitrato de potássio aumenta 0,5kg e as dos restantes fertilizantes permanecem inalteradas. Atendendo a que não se dispõe de caracterização de lixiviados deste tipo de cinza em termos dos teores em fósforo, foi assumido um valor nulo deste nutriente, o que teve reflexo na quantidade de fosfato monopotássico, que permaneceu igual ao atualmente existente, pois é a única substância fornecedora de fósforo.

A implementação desta proposta implicará, relativamente ao inventariado no Subcapítulo 3.3, alteração dos fluxos não só de fertilizantes mas também de energia, dada a necessidade de estabelecer uma etapa adicional de lixiviação onde é consumida energia elétrica (pelo equipamento de agitação) e de água destilada. Nesta proposta admitiu-se um tanque de 300L para esse efeito, equipado com um agitador de hélice com uma potência de 750 W (Inoxpa, 2016). Foi considerado um tempo de lixiviação de 30 minutos, de acordo com o ensaio laboratorial reportado no Subcapítulo 3.3.

Nos dois subcapítulos seguintes apresentam-se os “novos” fluxos mássicos e energéticos, na estufa de cultivo hidropónico de alfaces, para o caso da utilização do lixiviado de cinzas de fundo (Subcapítulo 4.5.1) e do lixiviado de cinzas volantes (Subcapítulo 4.5.2).

#### 4.5.1 Cinzas de fundo

Quando é integrado lixiviado de cinzas de fundo no plano de fertirrigação de alfaces, os fluxos materiais e de energia elétrica de entrada e saída da estufa, por unidade de alface produzida, são apresentados na Figura 4.4.

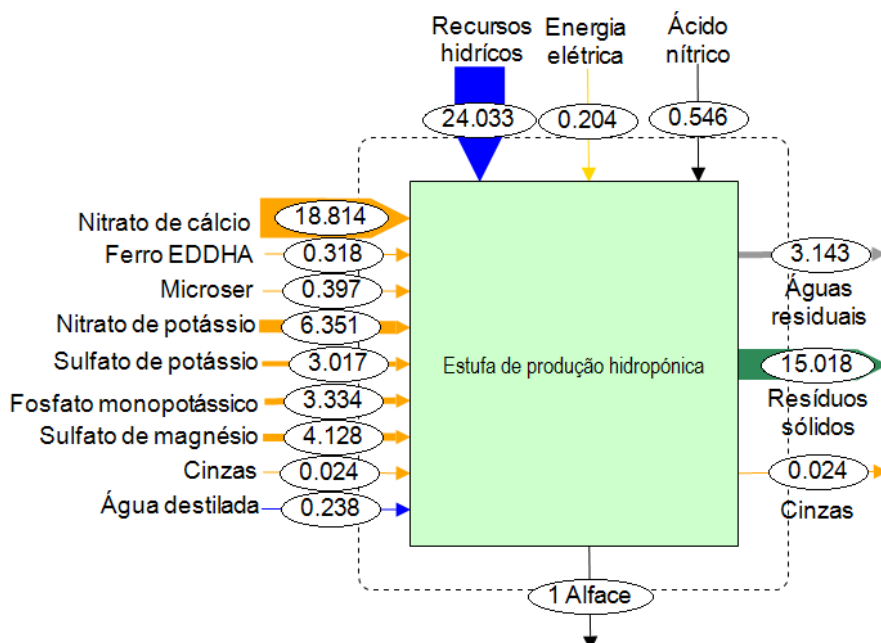


Figura 4.4 - Fluxos de massa e energia elétrica na estufa de produção de alface por hidroponia, quando é usado lixiviado de cinzas de fundo na preparação da solução de hidroponia (fluxos cor-de-laranja e verde: [g]; fluxos azul e cinzento: [L]; fluxo amarelo: [kWh]).

Atendendo a que nesta proposta se engloba um processo de lixiviação, daí resultou a adição de mais dois fluxos materiais - cinzas e água destilada - e ainda o aumento do fluxo relativo à energia elétrica. Relativamente ao fluxo das cinzas, admitiu-se que este não sofria alteração (entre a entrada e saída), porque a massa de elementos que esta cinza “perde” na lixiviação é desprezável face à massa total; foram apenas efetuados alguns cálculos grosseiros que estimam uma redução média de 2,5%. O presumível acréscimo do consumo de energia elétrica (por alface) devido ao sistema de agitação não é notório neste inventário.

De acordo com os valores apresentados na Tabela 4.4, era expectável que, comparativamente à Figura 4.4, os fluxos de fertilizantes que constam na Figura 4.5 fossem inferiores, com exceção do nitrato de potássio.

O fluxo de ácido nítrico, de acordo com o que foi explicado anteriormente, não sofre alterações.

Apesar de no processo de lixiviação serem utilizados equipamentos que necessitam de lavagens periódicas, admitiu-se que o volume de águas residuais que daí resultam não terá expressão no fluxo total anteriormente estimado.

O aumento da massa de resíduos sólidos (embalagens) relativamente aos dados da Figura 3.3 deve-se ao consumo de água destilada, que se admitiu ser comercializada, à semelhança do ácido nítrico, em embalagens HDPE de 20 L, e eventualmente também devido às embalagens de LDPE que acondicionam as cinzas. Este assunto será abordado com mais detalhe no Subcapítulo 5.3.1.5

## 4.5.2 Cinzas volantes

Na Figura 4.5 estão representados os fluxos materiais e de energia elétrica de entrada e saída da estufa, por unidade de alface produzida, para o cenário que envolve utilização de eluato de cinzas volantes na solução de fertirrigação.

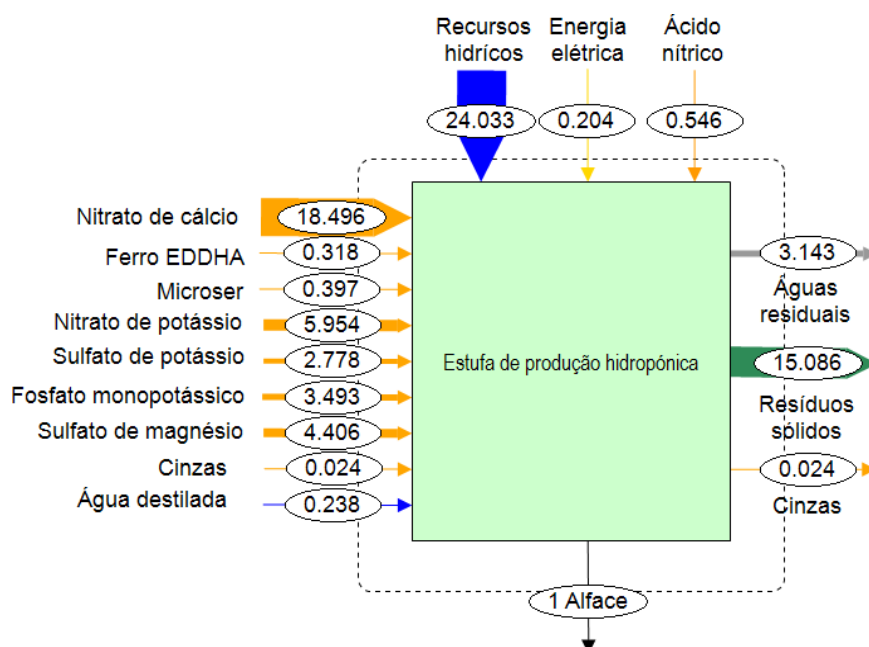


Figura 4.5 - Fluxos de massa e energia elétrica na estufa de produção de alface por hidroponia, quando é usado lixiviado na preparação da solução de fertirrigação de cinzas volantes (fluxos cor-de-laranja e verde: [g]; fluxos azul e cinzento: [L]; fluxo amarelo: [kWh]).

As únicas diferenças que se verificam entre a Figura 4.5 e a Figura 4.4 são os quantitativos de alguns fertilizantes, pela razão discutida aquando a apresentação dos resultados da Tabela 4.4. Os restantes fluxos não diferem dos apresentados e discutidos previamente no subcapítulo anterior.

## 4.6 CONCLUSÃO

Numa fase inicial deste trabalho foi efetuada uma análise de inventário da produção hidropónica de hortícolas, em que as informações foram obtidas, *in situ*, de uma unidade industrial que pratica o dito método de cultivo. Em resultado, foram estabelecidos os *inputs*, como consumo de materiais e energia, e os *outputs*, como produção de resíduos. Além disso, foi estudada a composição dos fertilizantes usados e o potencial de redução do uso de fertilizantes, em prol da valorização das cinzas, como fonte de nutrientes. Assim, para ambos os cenários, foi efetuado o balanço de inputs e outputs do processo produtivo. Para os cenários alternativos, verificou-se que o potencial de redução de fertilizantes não é muito elevado.

Além do presente estudo, o inventário levado a cabo neste trabalho contribui para a criação de informação disponível sobre processos de produção de espécies hortícolas (e outras) por

fertirrigação. Esta carência de informação foi verificada aquando da consulta das bases de dados para ACV, no decorrer deste trabalho.

Paralelamente, a procura de fontes alternativas de valorização de cinzas de biomassa, visando a minimização da sua deposição em aterro, bem como a reciclagem de nutrientes (princípio da economia circular), é um desafio a que este trabalho pretendeu dar resposta ou pelo menos um contributo. Pelos dados apresentados no Capítulo 4.5 verifica-se que as referidas cinzas permitem uma redução do consumo de fertilizantes químicos na produção de alfaces pela técnica de cultivo hidropónico (NFT). Contudo, deverão ser avaliados os impactes ambientais e económicos desta via de valorização das cinzas. O estudo comparativo dos potenciais impactes do uso das cinzas de biomassa na fertirrigação de alface foi levado a cabo neste trabalho e é apresentado nos Capítulos 5 e 6.





## **5 APLICAÇÃO DA ACV À VALORIZAÇÃO DE CINZAS DE BIOMASSA NA HIDROPONIA**

### **5.1 INTRODUÇÃO**

A ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) permite uma avaliação dos impactes ambientais associados a qualquer processo de transformação ou à produção de um bem ou serviço, no âmbito do qual ocorrem fluxos de entrada e saída de matérias e energia. Neste estudo será analisada a possibilidade da substituição parcial de fertilizantes químicos (sintéticos), utilizados no cultivo de uma espécie hortícola por hidroponia, em prol do uso de cinzas, como fornecedoras de nutrientes. Pretende-se assim caracterizar os potenciais impactes ambientais resultantes do processo de produção hidropónico de alface, desde o seu “berço”, isto é, desde a extração de matérias-primas para a produção dos vários tipos de fluxos existentes neste processo agrícola, até às operações de tratamento/gestão das emissões resultantes.

A aplicação de ACV à gestão de resíduos apresenta particular interesse na avaliação comparada de diferentes alternativas de gestão (cenários) para o destino final dos resíduos. Estas alternativas de gestão são condicionadas, por exemplo, pela necessidade de cumprimento das metas europeias em matéria de valorização e eliminação de resíduos, e pelas normas comunitárias em matéria de emissões. As atuais estratégias de gestão de resíduos assumem que a ACV tem um contributo relevante para fundamentar tomadas de decisão (Matos *et al.*, 2011).

A organização da metodologia deste trabalho segue a estrutura estabelecida pela norma EN ISO 14040:2006, assim como a organização do texto do presente capítulo.

### **5.2 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ÂMBITO**

#### **5.2.1 Objetivo de estudo**

O objetivo deste trabalho é a avaliação comparada dos impactes ambientais nos seguintes cenários: (i) valorização de cinzas provenientes da queima de biomassa, através da sua integração num plano de fertilização em cultivo hidropónico de alface e (ii) no atual cenário de deposição em aterro das referidas cinzas com a fertilização convencional da alface. Para tal, foram usados dados de produção e de consumos de uma unidade industrial de cultivo hidropónico de alface em estufa, “Gotas Frescas”, sita no concelho de Oliveira de Azeméis. Este estudo visa avaliar a viabilidade, do ponto de vista ambiental, de uma opção de valorização concreta de cinzas: integração num plano de fertirrigação, como fornecedora de nutrientes.

O público-alvo deste estudo são os *stakeholders* intervenientes no ciclo de vida de produção de hortícolas por hidroponia e os responsáveis pela gestão de cinzas provenientes da queima de biomassa.

## 5.2.2 Âmbito de estudo

Na conceção do âmbito devem ser considerados e descritos todos os itens enumerados no Subcapítulo 2.6.3.2. Convém notar que se excluiu deste estudo a avaliação de efeitos fitotóxicos na opção de valorização acima referida.

### 5.2.2.1 Unidade funcional

Como referência para a comparabilidade entre sistemas, a Unidade Funcional (UF) escolhida foi uma alface (massa média de 300g). A dita alface é produzida, no cenário convencional, com recurso exclusivamente a fertilizantes químicos, e, num outro sistema proposto, com recurso a uma mistura nutritiva de fertilizantes químicos convencionais e eluato de cinzas (volantes ou de fundo) de biomassa.

Este cenário alternativo permite reduzir a massa de fertilizantes usada, em prol do uso da solução de lixiviação, fazendo com que as cinzas deixem de constituir um resíduo eliminável em aterro e ganhem o estatuto de matéria-prima/recurso. Após o processo de lixiviação, a massa de cinza lixiviada será encaminhada para outro processo de valorização.

### 5.2.2.2 Fronteiras do sistema

As fronteiras para ambos os cenários definidos, convencional e alternativo, são representadas na Figura 5.1 e Figura 5.2, respetivamente.

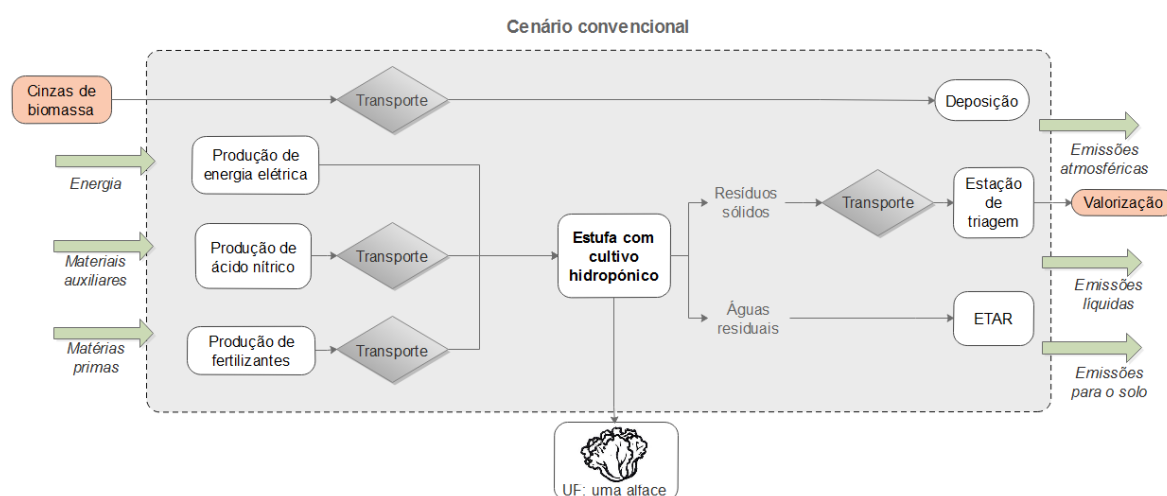


Figura 5.1 - Fases do ciclo de vida e fronteiras definidas para o cenário convencional.

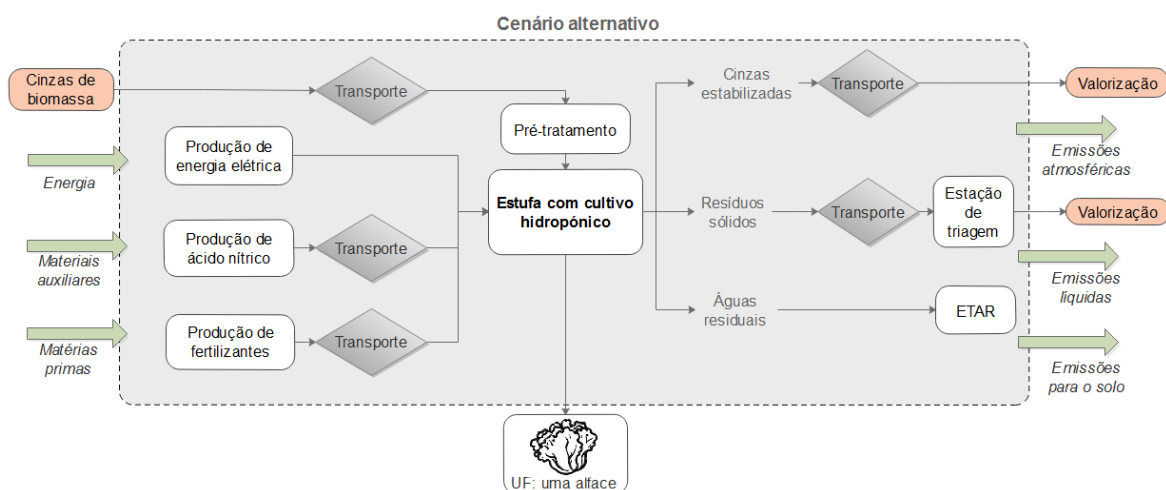


Figura 5.2 - Fases do ciclo de vida e fronteira definida para o cenário alternativo.

A abordagem utilizada nos dois cenários, inclui:

- a montante da estufa de hidroponia, os subsistemas produção de ácido nítrico, produção de fertilizantes e produção de eletricidade;
- a jusante da estufa de hidroponia, o tratamento dos resíduos sólidos e águas residuais. Relativamente a fluxos através das fronteiras do sistema, considera-se a entrada de energia (eletricidade, combustíveis, etc.), matérias-primas e materiais auxiliares. À saída, encontram-se os fluxos de emissões para a atmosfera, água e solo, e também a UF;
- a construção e desmantelamento das infraestruturas que albergam os processos de produção, designados anteriormente, e ainda a estufa de hidroponia;
- as etapas de construção, operação, manutenção e desmantelamento (por unidade) e ainda o uso da estrada por parte dos transportes.

Fora das fronteiras do sistema encontram-se etapas anteriores como a produção de outras matérias-primas (e.g. plântulas, substratos, fitofármacos) necessária à produção da hortícola e ainda a produção de cinza, pois é um subproduto da combustão de biomassa. Para as etapas posteriores, foi excluído o transporte e venda de alfaces no mercado, processos a jusante da triagem de resíduos e ainda a valorização de cinzas.

No que toca às fronteiras geográficas, a produção agrícola em questão ocorre em Portugal Continental. Em relação aos subsistemas como a produção de fertilizantes, foram respeitados os países de origem de produção, sempre que possível, e ainda o transporte até ao local de produção de hortícolas. Os detalhes relativamente às fronteiras geográficas de cada processo considerado serão descritos no Subcapítulo 5.2.2.4.

Quanto às fronteiras temporais, os dados usados no inventário de produção hidropónica de hortícolas dizem respeito ao período de maio de 2013 até março de 2016, por uma empresa designada “Gotas Frescas”. Na produção de energia elétrica na rede foi considerado o modelo de produção em Portugal, para o ano de 2012.

### 5.2.2.3 Fontes de informação, qualidade dos dados e softwares

A qualidade de um estudo de ACV depende da qualidade da informação no qual este se baseia. Na recolha de dados de inventário foram várias as fontes de informação usadas.

No inventário da produção hidropónica de alface, e como já referido, os dados foram obtidos *in situ* numa unidade industrial que produz hortícolas pelo método de fertirrigação, especificamente, em hidroponia NFT em estufa. Estes dados provieram dos registos diários, efetuados durante todo o período de amostragem considerado. Estes eram elaborados pelos colaboradores, relativamente ao número de produtos produzidos (tipo de hortícolas e lote correspondente); data e local de aplicação de fitofármacos (com respetiva dose de preparação); operações de lavagem de bancadas de produção e de tanques; preparação de tanques de fertilizantes e data da colocação das plântulas e respetivo lote. Contudo, ao longo do tratamento destes dados, observaram-se lacunas nos registos, o que impossibilitou a determinação de alguns parâmetros do inventário. Assim, quer pela omissão de dados quer pela ausência de literatura específica e técnica, alguns parâmetros foram excluídos (consumo de fitofármacos e respetivo fluxo de embalagens, produção de bioresíduos). Para outros parâmetros (consumo de água, produção de águas residuais e produção de resíduos de embalagem) em que a recolha de dados de inventário foi insuficiente, foram feitas estimativas para obtenção de valores. A utilização destes valores estimados diminui a exatidão dos resultados obtidos, mas torna-se útil para a comparação dos diferentes cenários estabelecidos.

Para muitos processos considerados nos cenários, houve a necessidade de recorrer a bases de dados existentes, nomeadamente a Ecoinvent v. 3.3 (2016), disponível *online* em <http://www.ecoinvent.org/>, sob licença de utilização. Relativamente à informação geral disponibilizada nesta base de dados, verificou-se uma limitação de processos disponíveis, de acordo com a origem (país). Por conseguinte, foi efetuada uma seleção dos processos que se consideraram mais adequados e que podiam de alguma forma ser similares aos considerados nos cenários em estudo neste trabalho. Nestes casos houve o cuidado de analisar e ponderar a informação relativa às fronteiras de cada um dos processos, de modo a evitar duplicações ou lacunas.

Em todos os processos cuja informação foi retirada da base de dados Ecoinvent, o modelo de sistema foi o *“Allocation, cut-off by classification”*. Nesta abordagem, o princípio baseia-se na responsabilidade do produtor pela gestão dos resíduos, não recebendo crédito para a aquisição de materiais recicláveis.

Uma nota relativamente à base de dados Ecoinvent: foi originalmente conhecida como organização *Swiss Centre for Life Cycle Inventories*, sendo que a primeira versão foi lançada em 2003. Com mais de 20 anos de experiência no desenvolvimento da metodologia de ACV e compilação de dados de inventário do ciclo de vida, para vários setores industriais, esta entidade possui atualmente mais de 12.800 processos nas mais variadas áreas, desde fornecimento de energia, agricultura, até tratamento de resíduos. Para além do uso em estudos ambientais que incluem ACV, as informações desta base de dados podem ser usadas em outras metodologias como Declaração Ambiental de Produto. A versão 3.3 da bases de dados Ecoinvent consiste no terceiro *update* da versão 3 desta base de dados, tendo sido lançada em agosto de 2016. Esta nova versão conta com a inclusão de uma base de dados mundial de alimentação e a possibilidade de análises do ciclo de vida de custos,

para produtos. Nesta base de dados, cada processo aparece descrito sob a forma de um ficheiro UPR (*unit process raw data*), que contém informações quantitativas dos *inputs* e *outputs* associados. Estes ficheiros UPR estão associados a outros processos, designados de mercados, que representam o consumo médio desse produto. A junção destes dois processos produz o inventário cumulativo do ciclo de vida (ICV). Neste inventário estão contidos apenas as entradas e saídas, de e para a biosfera e um *output* para a tecnosfera, o produto de referência. Além do ICV, o Ecoinvent permite também a Avaliação do Impacte do Ciclo de vida (AICV) para cada processo, para uma vasta gama de métodos de AICV, como CML 2001, Eco-Indicator 99, etc.

Como *software* foi utilizado *OpenLCA* (GreenDelta, 2016), uma ferramenta gratuita de fácil utilização que, após a importação de processos da base de dados anteriormente referida, permite calcular de forma rápida e fidedigna a ACV para um produto ou serviço. Permite ainda análises detalhadas de parâmetros, como principais fatores contributivos (por processo, fluxo ou categoria de impacte), ou o cálculo do Ciclo de Vida de Custos.

Complementarmente, foram utilizados outros *softwares*: *Stan2web* e *MSExcel*<sup>®</sup> para a representação do *material flow analysis* e representações gráficas, respetivamente.

#### **5.2.2.4 Pressupostos da análise**

Um dos pressupostos assumidos diz respeito à massa de cada alface produzida, que foi considerada constante e igual a 300 gramas. Na prática, a massa deste produto ao final de um tempo médio de cultivo de 40 dias é variável, tendo sido considerado aqui o valor médio.

No que concerne à valorização secundária das cinzas, é admitido que, após o processo de lixiviação (isto no cenário alternativo), ambos os tipos de cinza possuem características que lhes conferem potencial de valorização material. As opções de valorização assumidas para as cinzas de fundo e cinzas volantes são a incorporação na produção de argamassas e produção de adubos orgânicos, respetivamente.

#### Infraestruturas

Como já referido, foram consideradas a construção e desmantelamento das infraestruturas. Porém, e de acordo com Althaus *et al.* (2007), os impactes ambientais das duas etapas referidas não apresentam grande importância quando comparadas com o funcionamento das infraestruturas em si, pelo que a respetiva avaliação poderá ser feita de uma forma relativamente grosseira. Assim, foram consideradas as etapas de construção (materiais, processos de construção, instalação) e de fim de vida (processos de desmantelamento e deposição final da infraestrutura), tendo em conta a capacidade de processamento, produção anual e vida útil de instalação.

#### Produção de energia elétrica

A produção e distribuição da energia elétrica consumida no cultivo hidropónico teve como referência o *mix* energético do ano 2012, em Portugal Continental (à limitação de acesso de dados mais recentes fornecidos pela Agência Internacional de Energia). O *mix* energético corresponde às

contribuições das várias fontes de produção de energia (e.g. eólica, hídrica, etc.) para o total, correspondendo a contribuição de cada fonte à razão entre o volume anual de produção de energia dessa fonte e volume total de energia produzido (Itten *et al.*, 2014). Neste estudo foi excluída a contribuição da produção de eletricidade a partir de fontes geotérmicas, pois esta é típica apenas do cenário energético das ilhas dos Açores, fora do âmbito geográfico deste trabalho.

Os detalhes sobre o *mix* de produção e distribuição da energia elétrica, para o ano 2012, serão descritos no Subcapítulo 5.3.1.3.

### Fertilizantes

As informações cedidas pela unidade industrial de hidroponia apontaram para o uso de sete fertilizantes, como apresentado no Subcapítulo 4.2.

Porém, constatou-se que nem na base de dados *Ecoinvent*, nem em outras de livre acesso, como *OpenLCA nexus* (GreenDelta, 2016), existiam dados de inventário correspondentes ou semelhantes à produção dos fertilizantes ferro EDDHA e *microser*. Deste modo, estes foram excluídos do objetivo deste estudo. Tal exclusão não será muito relevante, tendo em conta que ambos os fertilizantes entram com fluxos iguais em ambos os cenários em comparação neste trabalho.

Relativamente aos locais de produção e respetivo transporte de fertilizantes, foram contactadas as empresas fabricantes (*Yara Internacional ASA*) com o objetivo de obter informações detalhadas sobre estes tópicos. Apenas uma das entidades, *Yara Internacional ASA*, revelou que a produção de sulfato de potássio e nitrato de potássio tinha como origem o Chile, enquanto que a produção de nitrato de cálcio estava localizada na Noruega e a produção de sulfato de magnésio e fosfato monopotássico em Espanha. A informação relativa ao transporte dos fertilizantes foi conseguida através de correspondência trocada com os produtores dos mesmos e por consulta no respetivo *website*. Deste levantamento resultou a seguinte informação:

- A empresa Yara Internacional ASA estabeleceu um acordo com outra empresa, designada de SQM - *Sociedad Química y Minera S.A.* (Yara, 2016). Esta declara possuir unidades de produção de nitrato de potássio e sulfato de potássio, em María Elena e Salar de Atacama, no Chile e que os produtos finais são transportados até ao porto marítimo de Tocopilla, no Chile (SQM, 2015);
- Foi fundada a empresa SQM Vitas (associação das empresas SQM e Quimgra S.A.) cuja unidade fabril possui capacidade de ensacamento e está localizada em Puerto Real, na província de Cádiz, Espanha (Quimgra S.A, 2016);
- A empresa Cabudal, S.A., localizada em Viana do Castelo, é a única empresa importadora dos produtos Yara, para Portugal Continental;
- A unidade de produção de nitrato de cálcio, situada em Glomfjord, Noruega possui porto marítimo próprio (Yara, 2016).

A partir das informações anteriores foram assumidos os seguintes percursos de transporte intermodal:

- O fertilizante nitrato de cálcio é transportado, a granel e por navio transoceânico, desde a unidade de produção até ao porto de Cádiz, Espanha;
- Os fertilizantes nitrato de potássio e sulfato de potássio são transportados, a granel e por camião, desde as unidades de produção, na Noruega, até ao porto marítimo de Tocopilla. Deste local, a deslocação da carga é feita por navio transoceânico, até ao porto de Cádiz, Espanha.
- Os três adubos descarregados no porto de Cádiz são carregados e transportados, por camião, até à empresa SQM-Vitas, doravante designada de unidade de ensacamento;
- Para o sulfato de magnésio e fosfato monopotássico assume-se uma distância desde a unidade de produção até à unidade de ensacamento, sendo o percurso efetuado por veículo pesado;
- Da unidade de ensacamento, a carga útil de um camião é dividida entre os cinco fertilizantes, que viajam deste local até à empresa Cabudal S.A.;
- Da empresa Cabudal S.A., a mercadoria é transportada até outros revendedores/fornecedores, por um veículo pesado.

Os detalhes sobre a tipologia de transportes assumida em cada um dos percursos serão especificados no Subcapítulo 5.3.1.9.

### Águas residuais

Associada à produção de hortícolas por hidroponia, está a geração de águas residuais, cuja composição pode conter cargas relativamente elevadas de compostos que potenciam a eutrofização, como nitratos e fósforo total (Park, Craggs e Sukias, 2009). De acordo com o Decreto Lei nº 2336/1998, de 1 de agosto, a descarga de águas residuais no solo ou em massas de água carece de uma licença atribuída pela Direção Regional do Ambiente (DRA). Para a emissão em coletores de esgoto, aplicam-se os Valores Limite de Emissão (VLE) estabelecidos no mesmo documento. Na ausência de uma estação de tratamento, estes resíduos têm que ser transportados, por entidade competente, até uma Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR).

Uma vez que não foram encontrados relatórios de caracterização de águas residuais geradas em cultivo de alface por hidroponia, assumiu-se que estas cumprem as normas de emissão e são descarregadas nos coletores de saneamento, para posterior tratamento em ETAR.

### Transportes

A movimentação de produtos e matérias-primas, entre os diferentes subsistemas/processos, é efetuado por transporte rodoviário e marítimo. Neste estudo, foram tidas em conta as viagens de ida e volta para os veículos de transporte rodoviário. Para o transporte marítimo apenas foi considerado o percurso até ao destinatário, na medida em que, devido à natureza do meio de transporte, o serviço posterior é sempre alocado a outros materiais e, deste modo, excluído do âmbito deste trabalho.

Na descrição dos processos incluídos em cada um dos cenários definidos (Subcapítulo 5.3.1), foram estabelecidos alguns pressupostos específicos, que serão devidamente assinalados.

### 5.2.2.5 *Categorias de impacto e metodologia de avaliação de impactes*

Nesta análise de ACV conjectura-se que as principais intervenções ambientais sejam a extração de recursos naturais e emissão de poluentes para o meio ambiente (atmosfera, solo e recursos hídricos). A nível geográfico, as consequências destes poluentes podem provocar efeitos a nível local, regional e global.

De entre os muitos métodos de avaliação de impactes existentes, o escolhido para determinar os potenciais impactes ambientais de cada um dos cenários definidos é o método CML 2001 - *baseline*, desenvolvido pelo *Institute of Environmental Sciences*, situado na Universidade de Leiden, Holanda. Este método tem sido amplamente utilizado em inúmeros estudos de ACV.

As categorias de impacto consideradas neste estudo são: alterações climáticas, eutrofização, acidificação, formação de oxidantes fotoquímicos e a depleção de recursos abióticos. Na Tabela 5.1 são descritos os indicadores, bem como os fatores de caracterização e modelos de caracterização para cada uma destas categorias de impacto.

Tabela 5.1 - Categorias de impacto ambiental usadas neste estudo e respetivos indicadores, fatores de caracterização e modelo de caracterização (Heijungs et al., 1992).

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Indicador</b>	<b>Fator de caracterização</b>	<b>Modelo de caracterização</b>
<b>Alterações Climáticas (AA)</b>	kg CO <sub>2</sub> eq	PAG <sub>100</sub> – Potencial de Aquecimento Global para um horizonte temporal de 100 anos	Calculo de acordo com os potenciais de aquecimento global dos diferentes gases de efeito estufa, estabelecidos pelo modelo de aquecimento global, do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas
<b>Eutrofização (EU)</b>	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq	PE – Potencial de Eutrofização	Baseado em procedimentos estequiométricos
<b>Acidificação (AC)</b>	kg SO <sub>2</sub> eq	PA – Potencial de Acidificação	Calculado com o modelo adaptado RAINS 10, descrevendo o destino e deposição das substâncias acidificantes
<b>Formação de oxidantes fotoquímicos (FOF)</b>	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	PFOF – Potencial de Formação de Oxidantes Fotoquímicos	Calculado com base no modelo UNECE Trajectory, que indica a capacidade potencial dos compostos orgânicos voláteis para produzir ozono
<b>Depleção de recursos abióticos (DA)</b>	kg Sb eq.	PDA – Potencial de Depleção de Recursos Abióticos	Baseado nas taxas de extração de minerais e combustíveis fósseis e na concentração de reservas e respetivas taxas de acumulação



As etapas de classificação e caracterização foram realizadas e traçado o perfil de impacte ambiental de cada um dos cenários considerados. Outras etapas facultativas como normalização e ponderação foram excluídas, para minimizar os elementos subjetivos do estudo de AICV.

Os potenciais de cada composto químico/parâmetro, para cada categoria de impacte, foram definidos pela metodologia selecionada.

## **5.3 ANÁLISE DE INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA**

Neste capítulo são inventariados os fluxos de entrada e saída das diferentes fases do ciclo de vida da produção de alfaces, para cada um dos cenários estabelecidos. No Subcapítulo 5.3.1 são descritos os processos usados neste estudo e nos Subcapítulos 5.3.2 e 5.3.3 apresentam-se os cenários estudados em mais detalhe.

### **5.3.1 Processos**

#### ***5.3.1.1 Produção de alface por hidroponia***

Os dados referentes ao cultivo de alface por hidroponia encontram-se reportados no Capítulo 4. Não foi encontrado nas bases de dados consultadas qualquer processo análogo ao caso de estudo do presente trabalho.

#### ***5.3.1.2 A infraestrutura estufa***

Neste trabalho foram incluídas as infraestruturas nas fronteiras dos sistemas, onde se inclui a estufa de produção de alfaces por hidroponia. Assim, foram incluídos os impactes ambientais associados à construção, manutenção e desmantelamento da estufa. Os dados de inventário usados são referentes ao processo de construção, manutenção e desmantelamento de 1m<sup>2</sup> de uma estufa, para o período de 2005 a 2009, na França (processo do Ecoinvent: *greenhouse construction, plastic walls and roof, metal tubes – FR*).

Os materiais usados na construção da estufa são o aço galvanizado e ainda o acetato-vinilo de etileno como cobertura. Este processo do Ecoinvent também inclui um sistemas de aquecimento e de fertirrigação. Para a estrutura é estimado um tempo de vida de 25 anos e a substituição da cobertura de 4 em 4 anos (Koch *et al.*, 2015). Nas fronteiras do sistema estão incluídas a produção de materiais usados para a construção da estufa, as infraestruturas técnicas, como sistemas de aquecimento e fertirrigação e terminam com a deposição e reciclagem de todos os materiais (Koch *et al.*, 2015).

Relativamente ao produto de referência (construção de uma estufa), a unidade funcional é [m<sup>2</sup>.ano]. Deste modo, o valor considerado no presente trabalho para este processo foi de 0,024 [(m<sup>2</sup>.ano)/UF], calculado a partir da seguinte equação:

$$0,024 \left[ \frac{\text{m}^2 \cdot \text{ano}}{\text{UF}} \right] = \frac{\text{Área total da estufa} \times \text{Tempo amostragem}}{\text{Número total de alfaces produzidas}} \quad (5.1)$$

Onde a área total da estufa, neste caso de estudo, é de 2000 m<sup>2</sup> e o tempo de amostragem considerado é de 2,75 anos. O número total de alfaces produzidas neste período é de 221707 unidades.

Supõe-se que as estufas de produção hidropónica em Portugal são similares à do caso de estudo também no que concerne ao aquecimento, i.e., sem sistema de aquecimento. Assim, foi necessário retirar do processo original (do *Ecoinvent*) a contribuição do sistema de aquecimento.

### 5.3.1.3 Produção e distribuição de energia

De acordo com Bauer e Treyer (2013), o mercado de eletricidade (na versão 3 do *Ecoinvent*) segue um modelo de sistema alocacional, isto é, todas as atividades de produção de energia fornecem o mercado de eletricidade, de acordo com o representado na Figura 5.3.

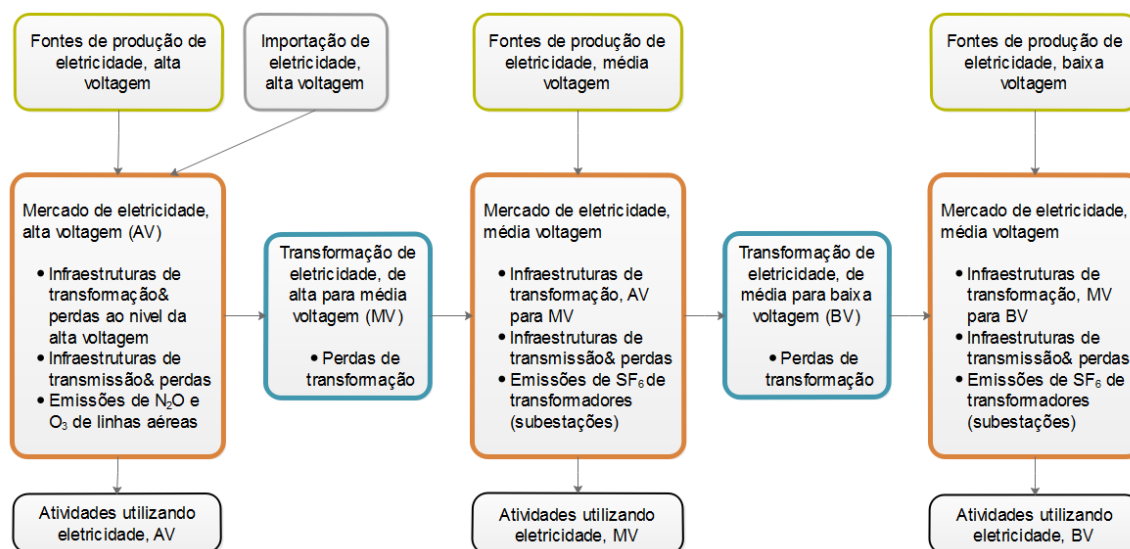


Figura 5.3 - Estrutura do mercado de eletricidade existente no *Ecoinvent* (adaptado de Bauer e Treyer (2013)).

Para qualquer um dos mercados existentes no *Ecoinvent*, incluindo o de Portugal, a Figura 5.3 representa a produção e distribuição da energia elétrica para os vários níveis de tensão existentes.

Resumidamente, existem três mercados de eletricidade:

- i. **Mercado de alta voltagem** - no qual grande parte da energia elétrica é produzida em alta voltagem, a partir de diversas fontes renováveis e não renováveis (*e.g.* carvão, eólica, gás natural, hídrica, cogeração fóssil e renovável e petróleo). Além da produção existe também neste mercado a importação de energia, a partir de Espanha. Após a fase do fornecimento, a energia elétrica é transportada através de infraestruturas de transmissão até certos consumidores e uma parte desta energia é transformada para média voltagem (Itten *et al.*, 2014);
- ii. **Mercado de média voltagem** - a energia existente neste mercado provém da transformação de alta para média voltagem, mas existe também uma pequena percentagem que advém da incineração municipal de resíduos sólidos. À semelhança do nível de voltagem anterior, a eletricidade neste mercado é transportada através de infraestruturas de transmissão até consumidores (*i.e.*, o mercado para média voltagem) e uma determinada fração é transformada para baixa voltagem (Itten *et al.*, 2014);
- iii. **Mercado de baixa voltagem** - uma parte significativa da energia deste mercado vem da transformação de média para baixa voltagem, e outra parte provém da produção de energia fotovoltaica que é injetada na rede; esta fonte de energia representa uma pequena fração do total de energia fornecida neste mercado. À semelhança dos anteriores níveis de voltagem, o transporte de eletricidade em baixa voltagem é feito nas infraestruturas de transmissão apropriadas, até chegar ao consumidor (Itten *et al.*, 2014).

Neste trabalho o consumo elétrico na produção hidropónica de alfaces é de baixa voltagem.

No ICV da produção de eletricidade foi considerado o *mix* energético para Portugal Continental, fornecido pela base de dados *Ecoinvent*, para o ano de 2012. A Figura 5.4 ilustra o referido *mix* energético.

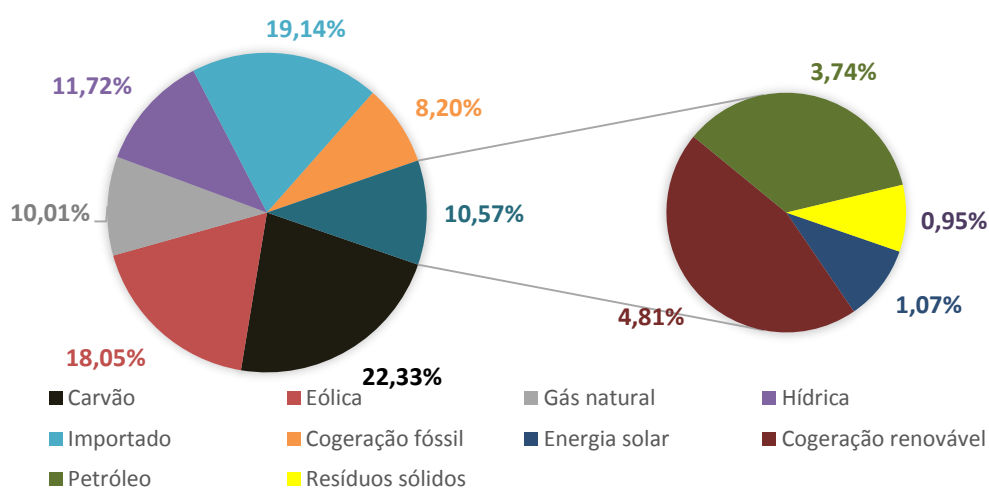


Figura 5.4 - Mix energético em Portugal Continental para a produção de 1 kWh (ano 2012).

Os processos de produção de energia nos três níveis de voltagem, bem como as infraestruturas de transformação e transporte/distribuição, usados neste trabalho foram obtidos no *Ecoinvent*, e encontram-se sistematizados na tabela seguinte.

Tabela 5.2 – Processos usados na produção e distribuição de energia elétrica em Portugal Continental.

Mercado		Processo
<b>Alta voltagem</b>	Produção	<u>Carvão</u> - electricity production, hard coal – PT <u>Petróleo</u> - electricity production, oil – PT <u>Eólica</u> - electricity production, wind, <1MW turbine, onshore – PT; electricity production, wind, 1-3MW turbine, offshore – PT; electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore - PT) <u>Cogeração fóssil</u> - heat and power co-generation, natural gas, combined cycle power plant, 400MW electrical-PT; heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical – PT) <u>Gás natural</u> - electricity production, natural gas, combined cycle power plant – PT; electricity production, natural gas, conventional power plant – PT) <u>Hídrica</u> - electricity production, hydro, pumped storage – PT; electricity production, hydro, reservoir, non-alpine region – PT; electricity production, hydro, run-of-river – PT) <u>Cogeração renovável</u> - heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014 – PT; heat and power co- generation, biogas, gas engine – PT)
	Importação	Electricity, high voltage, import from ES - PT
	Distribuição	Market for electricity, high voltage – PT
	Transformação	Electricity voltage transformation from high to medium voltage – PT
Mercado		Processo
<b>Média voltagem</b>	Produção	Electricity, from municipal waste incineration to generic market for electricity, medium voltage - PT - Allocation, cut-off
	Distribuição	Market for electricity, medium voltage - PT
	Transformação	Electricity voltage transformation from medium to low voltage – PT
<b>Baixa voltagem</b>	Produção	Electricity production, fotovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, multi-Si, panel, mounted – PT; electricity production, fotovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, single-Si, panel, mounted – PT ; electricity production, fotovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si – PT
	Distribuição	Electricity production, fotovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si – PT

#### 5.3.1.4 Embalamento de fertilizantes e cinzas: infraestrutura e processo

Uma vez que todos os fertilizantes sólidos saem das respetivas unidades de fabrico sob forma de granel, foi necessário inserir uma unidade de embalamento nos cenários considerados no presente trabalho; isto porque eles chegam à estufa embalados. Assim, na unidade de embalamento os fertilizantes são rececionados sob a forma de granel, pelo que é necessário considerar a produção

de embalagens para o efeito, assim como o processo de embalamento propriamente dito. Porém, verificou-se a inexistência, no *Ecoinvent* e noutras bases de dados consultadas, de um processo de embalamento no qual é usado o mesmo tipo de material (LDPE) de embalagem que acondiciona os fertilizantes usados na estufa. Então, foi necessário construir um subsistema correspondente ao embalamento de fertilizantes. Para tal, partiu-se do processo *packaging production for solid fertiliser or pesticide, per kilogram of packed product (Ecoinvent)*, correspondente à produção e embalamento de fertilizantes com embalagens HDPE, onde a moldagem é feita por sopro de estiramento. Resumindo, a construção do processo de embalamento compreendeu:

- Inclusão de infraestrutura (processo: *packaging box factory construction*) relativa uma indústria de embalamento, com uma produção anual de 14 quilotoneladas e com um tempo de vida útil de 50 anos;
- Exclusão do processo de produção e transporte médio global de HDPE (processo: *market for polyethylene, high density, granulate*);
- Inclusão do processo de produção e transporte médio global de LDPE (processo: *market for polyethylene, low density, granulate*);
- Substituição do quantitativo de plástico gasto por quilograma de fertilizante sólido embalado, de 2.05E-3kg de HDPE por 2.90E-3 kg de LDPE (*vide* Tabela 4.2).

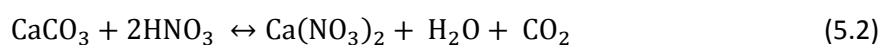
Relativamente às cinzas volantes e de fundo, admitiu-se que o seu embalamento (nos cenários alternativos) é efetuado no local da sua produção, i.e, Centrais Termoelétricas a Biomassa (CTB). O processo deste embalamento é o mesmo dos fertilizantes, descrito anteriormente.

### **5.3.1.5 Produção de fertilizantes, ácido nítrico e água destilada**

No texto seguinte é apresentada informação mais detalhada referente aos processos de produção dos fertilizantes e de ácido nítrico que são usados na fertirrigação de alfices. O processo relativo à produção de água destilada, que pertence aos cenários alternativos em estudo neste trabalho, é igualmente apresentado. Os dados de inventário foram retirados da base de dados *Ecoinvent v. 3.3* (2016).

#### Nitrato de cálcio

O processo utilizado (processo: *calcium nitrate production*) corresponde aos dados de inventário, representativos da média europeia (RER), para a produção de nitrato de cálcio com um teor de N de 11,89%, para o ano de 2012. As fronteiras desde processo iniciam-se com a receção das matérias-primas: carbonato de cálcio, ácido nítrico e ainda de amoníaco até à saída do produto, nitrato de cálcio, à porta da fábrica. Este produto é obtido através da reação entre carbonato de cálcio e ácido nítrico, de acordo com a seguinte equação (INFOMINE Research Group, 2011):



Este processo, que consta na base de dados Ecoinvent, estão incluídas as infraestruturas associadas à unidade de produção, mas não o embalagem do produto final. Porém, neste trabalho incluiu-se o processo de embalagem referido no Subcapítulo 5.3.1.4.

#### Sulfato de potássio e nitrato de potássio

O sulfato de potássio e nitrato de potássio são produzidos no Chile. Neste trabalho considerou-se médias globais (GLO) dos respetivos processos de produção.

O processo da produção de sulfato de potássio utilizado neste trabalho (processo: *potassium nitrate production*), tem como unidade funcional 1kg de  $K_2O$ , correspondente a 2kg de sulfato de potássio, com um teor de  $K_2O$  de 50%. As matérias-primas utilizadas neste processo são os reagentes cloreto de potássio e ácido sulfúrico. No que concerne às fronteiras do sistema, os dados de inventário incluem o transporte de matérias-primas e produtos intermédios até à unidade de produção, respetiva infraestrutura, assim como o transporte do produto até ao local de armazenamento regional. Fora das fronteiras encontram-se: a produção e tratamento de resíduos de catalisadores, revestimento e embalagem final (Nemecek e Kagi, 2007).

Relativamente à produção de nitrato de potássio, os dados de inventário utilizados (processo: *potassium nitrate production*) tem como unidade funcional um quilograma deste adubo, com um teor de N de 14.0% e de  $K_2O$  de 44.0%. As matérias-primas usadas neste processo são o cloreto de potássio e o ácido nítrico. No que diz respeito às fronteiras do sistema, os dados de inventário incluem o transporte de matérias-primas e produtos intermédios até à unidade de produção, respetiva infraestrutura, assim como o transporte do produto até ao local de armazenamento regional. Fora das fronteiras encontram-se: o embalagem final e a produção e tratamento de resíduos (Nemecek e Kagi, 2007).

O processo de embalagem destes fertilizantes foi incluído neste trabalho e corresponde ao processo descrito no Subcapítulo 5.3.1.4.

#### Sulfato de magnésio

Os dados de inventário da produção de sulfato de magnésio correspondem aos do processo *magnesium sulfate production*, que traduz a produção de 1kg desta substância, com localização na Europa (RER). De acordo com Hischer (2007), este processo sofre de elevadas incertezas devido à escassez de informação acerca do mesmo. Os dados que constam neste processo, desde matérias-primas, maquinaria, consumos energéticos associados à produção, assim como emissões atmosféricas, são estimativas. O embalagem do produto, assim como o tratamento de resíduos de produção não estão incluídos no inventário do processo que consta no Ecoinvent. Todavia, no presente trabalho incluiu-se o processo de embalagem descrito no Subcapítulo 5.3.1.4.

#### Fosfato monopotássico

A inexistência de dados de inventário, no Ecoinvent, relativos à produção específica deste fertilizante levou à seleção de dados relativos à produção de outro fertilizante que se considerou ser similar. Deste modo, usou-se o processo de fosfato de amónio (processo: *ammonium nitrate*

*phosphate production – RER*), como pentóxido de fósforo ( $P_2O_5$ ). Este processo representa a produção de fosfato de amónio a partir de amoníaco e rocha de fosfato, e inclui as infraestruturas, o transporte de matérias-primas e produtos intermédios até à instalação de produção. A produção e tratamento de resíduos de catalisadores, revestimento e embalagem de produtos fertilizantes finais não estão incluídos dentro das fronteiras deste sistema (Nemecek e Kagi, 2007), que consta no Ecoinvent. Neste trabalho incluiu-se o processo de embalamento do fertilizante, através a inclusão do processo descrito no Subcapítulo 5.3.1.4.

### Ácido nítrico

Como já referido no Subcapítulo 4.2, a concentração do ácido nítrico usado na aferição de pH da solução nutritiva usada na hidroponia possui uma concentração de 60%(m/m). Todavia, na base de dados Ecoinvent não foi encontrado um processo de produção ácido nítrico com esta concentração, mas sim a 50%(m/m). Assim, usou-se este processo (*nitric acid production, product in 50% solution state - Allocation, cut-off*), corrigindo-se o quantitativo gasto desta solução por UF (1 alface), ou seja:

$$\left[ \frac{\text{g solução HNO}_3,50\%}{\text{UF}} \right] = \left[ \frac{\text{g solução HNO}_3,60\%}{\text{UF}} \right] \times \frac{60}{50} \quad (5.3)$$

Os dados de inventário do processo *nitric acid production, product in 50% solution state* são baseados em médias europeias de produção (RER), por oxidação de amoníaco, de 1 kg de solução de ácido nítrico a 50%. A tecnologia de produção corresponde ao processo de Ostwald. As fronteiras do sistema incluem receção das matérias-primas, as infraestruturas, os consumos de energia e as emissões; as fronteiras a jusante correspondem ao produto à porta da fábrica (Althaus *et al.*, 2007). Relativamente ao embalamento do produto supõe-se que ele não pertence às fronteiras do processo original, pelo foi incluído neste trabalho (processo descrito no Subcapítulo 5.3.1.4). As alterações feitas ao processo “original” que consta no Ecoinvent foram:

- Inclusão do processo de produção de embalagens de fertilizantes ou pesticidas líquidos (processo: *packaging production for liquid fertiliser or pesticide, per kilogram of packed product*). Este processo representa a produção de embalagens com um volume de 20 litros, utilizando a tecnologia por moldagem por injeção, nas quais são necessários 1,160 kg de plástico HDPE/kg de produto embalado;
- Inclusão de infraestrutura (processo: *packaging box factory construction*) relativa uma indústria de embalamento, com uma produção anual de 14 quilotoneladas e com um tempo de vida útil de 50 anos;
- Substituição do quantitativo de plástico gasto por quilograma de produto líquido embalado, de 2,05E-2 kg de HDPE por 5,00E-2 kg de HDPE (*vide* Tabela 4.2).

### Água destilada

O processo usado neste trabalho para representar a produção de água destilada foi o “*water production, deionised, from tap water, at user – Europe without Switzerland*”, compreendendo a cadeia de processos ilustrada na Figura 5.5.

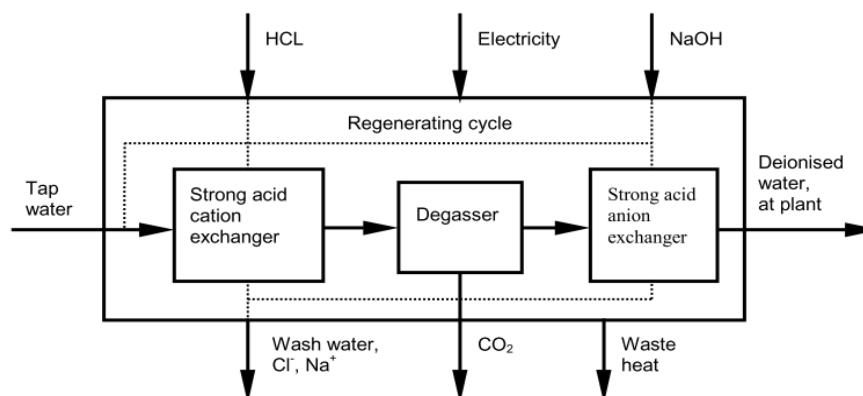


Figura 5.5 - Processo simplificado da produção de água destilada (Althaus et al., 2007).

Relativamente à água potável e à eletricidade foram utilizadas informações relativas aos respetivos processos de produção na Suíça. Neste inventário são incluídas as infraestruturas e ainda o transporte de matérias-primas até à unidade de produção (Althaus et al., 2007).

Nos cenários alternativos estudados neste trabalho, admitiu-se que a produção de água destilada ocorre na mesma unidade fabril de produção de ácido nítrico. Relativamente ao embalamento da água destilada, usou-se o mesmo subsistema criado para o embalamento do ácido nítrico.

### 5.3.1.6 Tratamento de águas residuais

O tratamento das águas residuais produzidas no cultivo hidropónico de alfaces é realizado numa Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR). O processo usado para representar este tratamento foi o “*treatment of wastewater, average, capacity 1.6E8L/year – CH*”. A tecnologia usada e os consumos médios dizem respeito ao panorama na Suíça, no ano 2000. A cadeia de processos incluídos no tratamento de águas residuais, assim como as fronteiras do sistema são ilustrados na Figura 5.6.

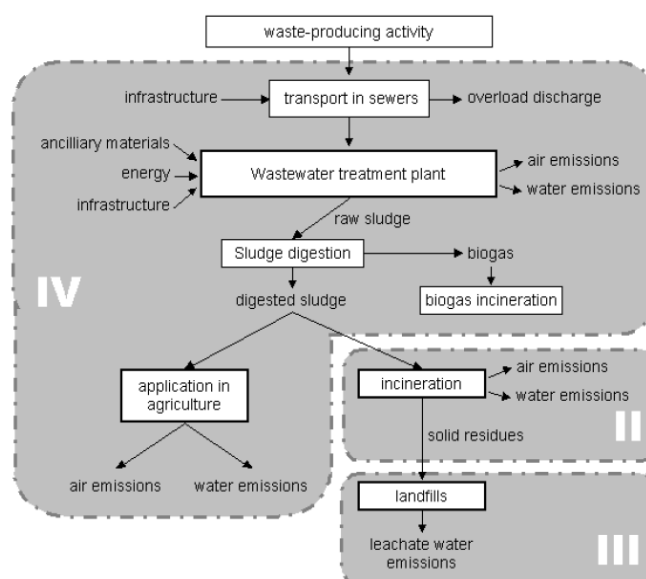


Figura 5.6 - Fronteiras do sistema no tratamento de águas residuais (Doka, 2009).



### 5.3.1.7 Gestão resíduos de embalagem

A estação de triagem é o local onde são efetuadas operações de separação de resíduos provenientes da recolha seletiva, da recolha porta-a-porta e dos ecocentros, nomeadamente, papel/cartão e embalagens de plástico e metal. Com exceção do vidro, os materiais triados são enfardados e encaminhados para reciclagem (Resinorte, 2016).

Neste trabalho considerou-se que as embalagens dos fertilizantes, do ácido nítrico e da água destilada são enviados para uma unidade de triagem com vista a posterior valorização por reciclagem. Constatou-se que na base de dados Ecoinvent não existe um processo relativo à triagem de embalagens de plástico. Perante este facto, foi admitido como representativo os dados de inventário da triagem de resíduos de cartão (processo: *treatment of waste paperboard, sorting plant - Europe without Switzerland*), mesmo que a similaridade seja grosseira. A unidade funcional deste processo é 1kg de resíduos de cartão (à entrada da unidade de triagem), sendo que 0,5kg de resíduos são triados e enviados para reciclagem (Doka, 2009). Neste processo estão incluídos os consumos de energia, emissões de matéria particulada do desmantelamento, manuseamento e maquinaria e as infraestruturas.

### 5.3.1.8 Gestão da cinza

No cenário convencional a gestão das cinzas de biomassa consiste no seu transporte e deposição em aterro de resíduos não perigosos. Os dados de inventário da deposição deste resíduo correspondem ao processo “*treatment of wood ash mixture, pure, sanitary landfill - Europe without Switzerland – Allocation, by cut-off*”, e dizem respeito à tecnologia utilizada na Suíça, para o ano 2000 (Doka, 2009). Este processo de deposição é ilustrado na figura seguinte.

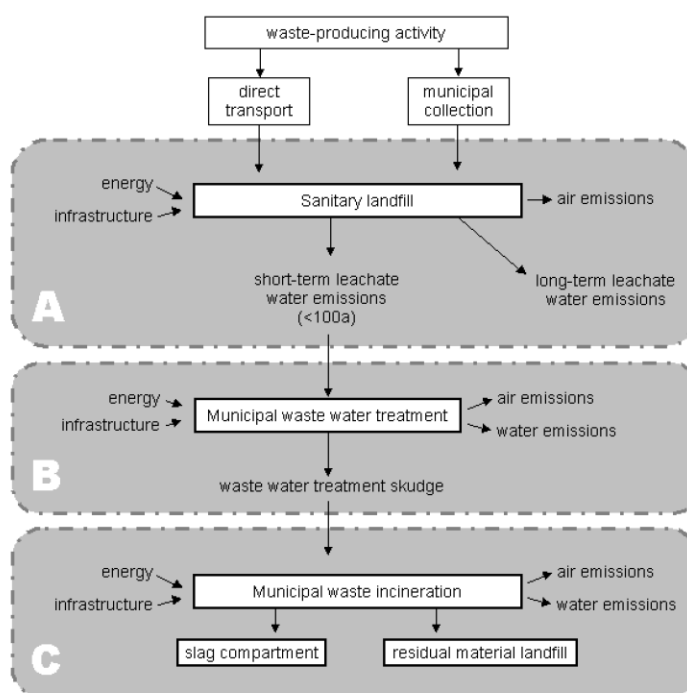


Figura 5.7 - Cadeia de processos envolvidos na deposição em aterro (Doka, 2009).

Neste processo, o lixiviado é recolhido nos primeiros 100 anos e tratado numa ETAR municipal. As lamas resultantes do tratamento de águas residuais são incineradas numa incineradora municipal. Os resíduos resultantes da incineração são depositados em aterro (Doka, 2009).

De acordo com Doka (2009a), “No âmbito do Ecoinvent 2000, o transporte deve ser inventariado pela atividade de produção de resíduos e não pelo processo de eliminação de resíduos. Para evitar duplicações, o transporte de resíduos para aterro não é considerado nos processos de deposição de resíduos desta base de dados.” Como tal, o transporte de cinzas da central termoelétrica até ao aterro constitui um processo por si, e é apresentado no subcapítulo seguinte.

### 5.3.1.9 Transportes

O transporte de matérias-primas e produtos, entre os diferentes subsistemas/processos, é efetuado por diferentes tipologias de veículos. Para cada percurso estabelecido, o esforço de transporte (intensidade da atividade) utilizado neste trabalho é em termos de tonelada.kilómetro por unidade funcional, [tkm/UF].

A tipologia de transportes assumida no âmbito deste estudo está descrita na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Tipologia de transporte de matérias e produtos pressuposta no âmbito deste estudo.

<b>Rodoviários</b>	<b>Marítimo</b>
<b>Veículos comerciais ligeiros, EURO3</b>	Navio granuleiro, transoceânico
<b>Veículos pesados de classe entre 16-32t, EURO 3</b>	
<b>Veículos pesados de classe &gt; 32t, EURO 3</b>	
<b>Veículo recolha municipal, 21 toneladas</b>	

Nos processos relativos aos transportes rodoviários foram selecionados os padrões de emissão Euro 3, com base na idade média dos veículos a circular em Portugal (ANFAC, 2014). Nas classes de veículos 16-32 toneladas e superior a 32 toneladas de tara bruta, o consumo de combustível, as emissões e os fatores de carga média são representativos da média de viagens a nível europeu, sendo as cargas úteis médias de 5,79 e 15,96t, respetivamente. Os dados relativos ao consumo de combustível correspondem ao modelo HBEFA, v3.1, para o caso da Alemanha (Spielmann *et al.*, 2007).

Para os veículos comerciais ligeiros, os dados de utilização de energia e emissões de combustão correspondem à média da operação de um furgão suíço (frota média), para o ano de 2005, compreendendo várias tecnologias de emissão (Spielmann *et al.*, 2007).

Por último, no processo de veículo de recolha municipal, é considerado um veículo de recolha de resíduos, com sistema de compressão hidráulica, com uma carga média de 4.1t. Foram consideradas as emissões atmosféricas do consumo de combustível para uma operação do tipo *stop&go* (Doka, 2009).

Na contabilização das viagens de ida e volta foram assumidos os consumos de combustível, retirados da Volvo (2010), para cada tipologia de transporte (*vide* Tabela 5.4). Para os veículos

comerciais ligeiros, o fator de viagem de ida e volta foi estimado, face à carência de informações acessíveis sobre os consumos de combustível, discriminando a carga do veículo.

Tabela 5.4 - Dados de consumo de combustível assumidos para cada tipologia de transporte considerada neste estudo.

Veículos	Carga útil [t]	Consumo de combustível		Fator de viagem de ida e volta
		[L/100 km]		
		Veículo cheio	Veículo vazio	
<b>Pesados de classe &gt; 32t, EURO 3</b>	25	35	26	1,74
<b>Pesados de classe 16-32t, EURO 3</b>	14	40	30	1,75
<b>Pesados de classe 7.5-16 t, EURO 3</b>	8,5	30	25	1,83
<b>Comerciais ligeiros, EURO3</b>	-	-	-	1,75

No que concerne ao transporte marítimo, o processo considerado corresponde a um navio de carga transoceânico com uma capacidade de 50.000t de peso morto (dwt), em que o combustível utilizado é o fuelóleo. São incluídos também dados relativos à construção de um porto marítimo (Spielmann *et al.*, 2007).

De acordo com os pressupostos efetuados para fertilizantes, o transporte destas substâncias é intermodal. Os fertilizantes sulfato de potássio e nitrato de potássio são transportados por camião (processo: *transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3*), desde dos locais de produção até ao porto marítimo de *Tocopilla*, no Chile. Como são fabricados em locais diferentes, o seu transporte é feito em veículos separados. Uma vez no porto marítimo, estes fertilizantes são carregados e transportados por um navio transoceânico (processo: *transport, freight, sea, transoceanic ship*) até ao porto marítimo de Cádiz, em Espanha. Este porto é também o destino do transporte de nitrato de cálcio, por navio, a partir da Noruega. Do porto marítimo de Cádiz, os três fertilizantes (sulfato de potássio, nitrato de potássio e nitrato de cálcio) partilham o mesmo transporte, por camião (processo: *transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3*) até ao local da unidade de embalagem, situada a 11,5km de distância. Este local é também o destino do transporte individual dos fertilizantes produzidos em Espanha (fosfato monopotássico e sulfato de magnésio), admitindo uma distância média de 200km por camião (processo: *transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3*).

Os cinco fertilizantes anteriores são transportados da unidade de embalagem para a empresa representante em Portugal Continental, por um camião (processo: *transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3*), cuja a carga útil é dividida, em termos mássicos, pelos cinco produtos. Entre o representante em Portugal e os retalhistas, os cinco fertilizantes são transportados por camião com uma carga bruta de 16-32t (*transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3*), numa distância média de 150 km. São também comercializados pelos retalhistas ácido nítrico e água destilada. O transporte destes dois fluídos entre a unidade de produção e os retalhistas é feito por camião de tipologia 16-32t, numa distância média de 25km.

Note-se que no cenário convencional não existe água destilada, sendo aplicável apenas no cenário alternativo. Neste último o transporte destes dois fluídos é partilhado (alocação mássica).

Ainda no cenário alternativo, as cinzas são transportadas da central termoelétrica e daí transportadas até aos retalhistas por camião de tipologia 16-32t, numa distância média de 50 km.

O transporte das matérias-primas (para a preparação da solução nutritiva) desde dos retalhistas até à estufa é feita num veículo comercial ligeiro (processo: *transport, freight, light commercial vehicle*), numa distância de 50km, em que a carga útil do veículo é alocada de acordo com as necessidades mássicas de cada matéria-prima, na preparação de cada solução nutritiva do cultivo de alfaces. Deste modo, a carga útil do veículo é preparada de acordo com a fração mássica das seis matérias-primas necessárias no cenário convencional, ou das oito matérias-primas no cenário alternativo.

Na estufa os resíduos de embalagem de plástico são triados e depositados em ecopontos que, posteriormente, são recolhidos por um veículo de recolha municipal (processo: *municipal waste collection service by 21 metric ton lorry - Switzerland*) que os transporta uma unidade de triagem, numa distância de 50km.

No cenário alternativo as cinzas lixiviadas são transportadas por um veículo comercial ligeiro até ao local de valorização: unidade de produção de argamassas, a uma distância de 50 km. Já no cenário convencional, a deslocação de cinzas é efetuada desde da central termoelétrica até ao aterro, por um camião com tara superior a 32t, a uma distância de 100km.

A informação detalhada anteriormente encontra-se sistematizada na tabela seguinte.

Tabela 5.5 - Mapa transportes para cada cenário definido.

Fluxo	Sulfato de potássio	Nitrato de potássio	Nitrato de cálcio	Fosfato monopotássico	Sulfato de magnésio	Ácido Nítrico	Água destilada <sup>1</sup>	Valorização Cinza <sup>1</sup>	Resíduos embalagens	Deposição Cinza <sup>2</sup>			
<b>Origem</b>	Unidade produção - Chile		Unidade produção - Noruega	Unidade produção - Espanha		Unidade produção - Portugal		Central termoelétrica - Portugal	Estufa - Portugal	Central termoelétrica - Portugal			
<b>Veículo</b>	Camião, 32 t		Navio	Camião, 32 t		Camião 16-32t		Camião, 32 t	Veículo recolha municipal	Camião, 32 t			
<b>Distância [km]</b>	367	72	4410	200		25		50	50	100			
<b>Intermediário</b>	Porto marítimo Chile												
<b>Veículo</b>	Navio												
<b>Distância [km]</b>	11933,46												
<b>Intermediário</b>	Cádiz, Espanha												
<b>Veículo</b>	Camião, 32t												
<b>Distância [km]</b>	11,5												
<b>Intermediário</b>	Unidade embalagem												
<b>Veículo</b>	Camião, 32t												
<b>Distância [km]</b>	758												
<b>Intermediário</b>	Representante Portugal												
<b>Veículo</b>	Camião, 16-32t												
<b>Distância [km]</b>	150												
<b>Intermediário</b>	Retalhistas												
<b>Veículo</b>	Comercial ligeiro												
<b>Distância [km]</b>	50												
<b>Intermediário</b>	Estufa												
<b>Veículo</b>											Comercial ligeiro		
<b>Distância [km]</b>											50		
<b>Outros intermediários</b>											Unidade valorização	Estação triagem	Aterro

<sup>1</sup>aplicável apenas ao cenário alternativo; <sup>2</sup>aplicável apenas ao cenário convencional

### 5.3.2 Cenário convencional

O cenário convencional representa o panorama atual da produção de alfaces pelo processo de hidroponia. A Figura 5.8 ilustra o referido cenário, já apresentado anteriormente na Figura 5.1 mas agora com informação mais detalhada relativa a cada fluxo mássico, de energia e processos incluídos neste estudo.

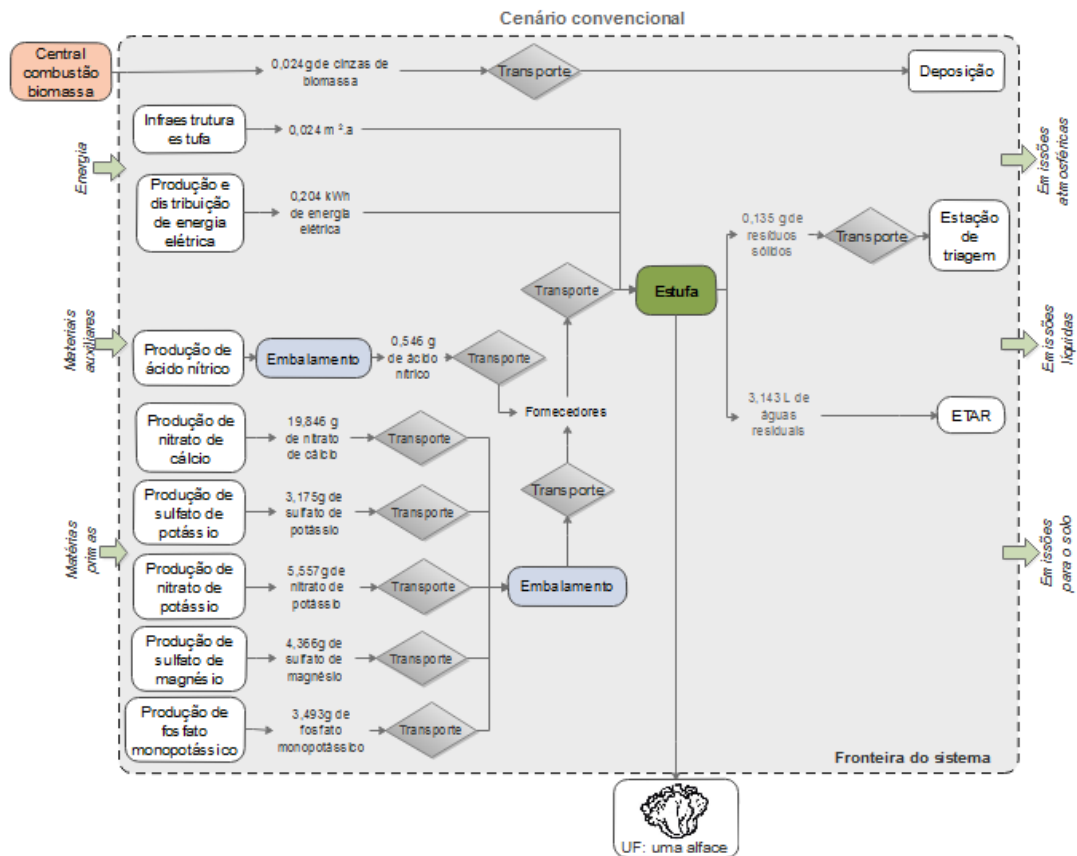


Figura 5.8 - Fronteiras do cenário convencional.

De acordo com a figura anterior, na produção da unidade funcional são considerados os processos de produção dos fluxos de entrada: ácido nítrico, nitrato de cálcio, sulfato de potássio, nitrato de potássio, sulfato de magnésio e fosfato monopotássico, produção e distribuição de energia elétrica e ainda o ciclo de vida da estufa. Foi também considerada uma unidade de embalagem/ensacamento dos fertilizantes que saem a granel das respetivas unidades de fabrico. Relativamente aos transportes dos fertilizantes, considerou-se o transporte desde os locais de produção e a estufa de hidroponia, e admitiu-se que este é feito em “alta” até aos fornecedores/retalhistas e “em baixa” entre os fornecedores e a estufa. Nas intervenções ambientais que decorrem da operação da estufa, considera-se, por unidade funcional, a triagem de 0,135g de resíduos de embalagem e ainda o tratamento de 3,143 litros de águas residuais, numa ETAR.

No cenário convencional também são consideradas as operações de gestão da cinza: transporte e deposição em aterro de resíduos não perigosos. O fluxo mássico considerado

para este resíduo, 0,024g de cinza/UF, corresponde àquele que é passível de ser usado no cenário alternativo, como integrante do plano de fertilização, de acordo com a informação apresentada no Subcapítulo 4.5.

### 5.3.3 Cenários alternativos

A partir da proposta do Subcapítulo 4.5, formularam-se dois cenários alternativos (ao cenário convencional) para a valorização de cinzas de fundo e volantes, utilizando-as na preparação da solução nutritiva usada na produção de alfaces por hidroponia. Os referidos cenários foram designados por: cenário alternativo CF e cenário alternativo CV. Nos dois subcapítulos faz-se uma descrição mais detalhada deste cenários, bem como as respetivas fronteiras. Note-se que a informação menos detalhada já havia sido apresentada no Subcapítulo 5.2.2.2.

#### 5.3.3.1 Cenário alternativo CF

O cenário alternativo CF representa o panorama da produção de alfaces com a incorporação do eluato de cinzas de fundo na solução de fertirrigação. Os processos considerados neste cenário, os *inputs* e *outputs*, bem como as fronteiras do sistema encontram-se na figura seguinte.

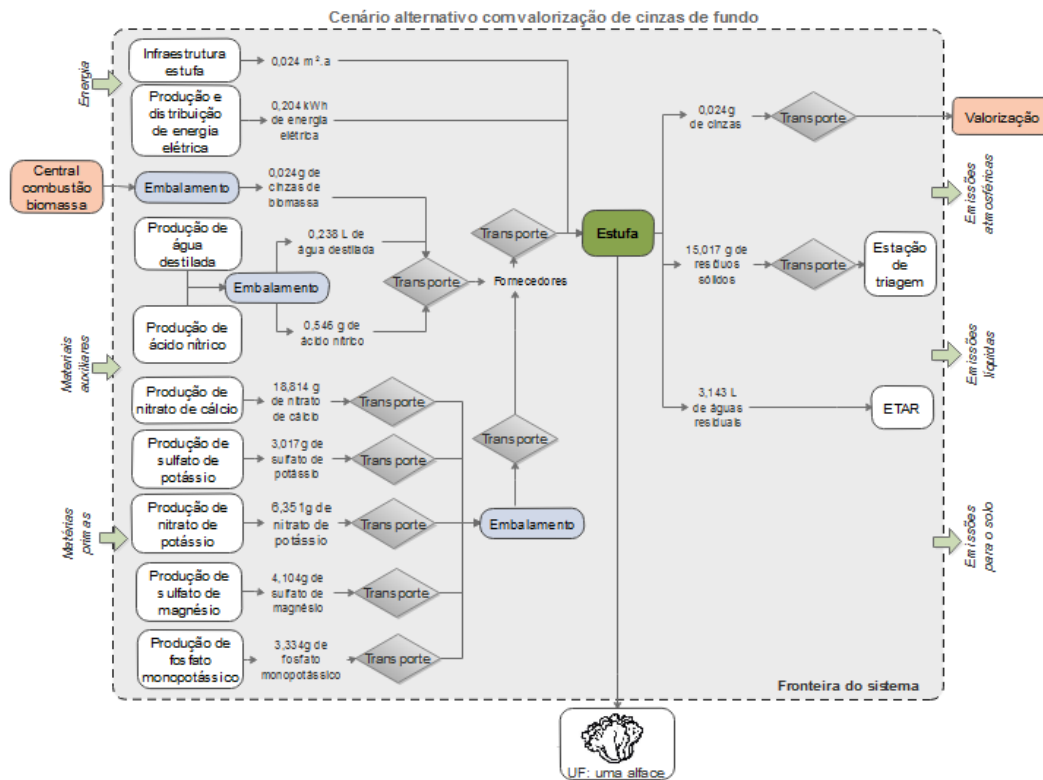


Figura 5.9 - Fronteiras do alternativo CF.

À semelhança do cenário convencional, na produção da UF são consideradas todos processos de produção de fertilizantes, ácido nítrico, produção e distribuição de energia elétrica e o processo de produção de alfaces, assim como infraestrutura da estufa. A unidade de embalagem de fertilizantes foi também incluída.

A produção de água destilada, usada na lixiviação das cinzas, e respetivo embalagem pertence ao cenário em discussão. Relativamente às cinzas, considerou-se que estas eram embaladas, na central de combustão de biomassa, antes de serem transportada e comercializadas por retalhistas. Estas cinzas são maioritariamente compostas por silício em formas pouco solúveis em água, pelo que se assumiu que durante o processo de lixiviação a redução de massa do material sólido era negligenciável. O processo de lixiviação realiza-se nas instalações da estufa e o material sólido resultante é seco ao ar antes de ser transportando para valorização numa unidade de argamassas.

Comparativamente ao cenário convencional, neste cenário existe um menor consumo de todos os fertilizantes, com exceção do nitrato de potássio, que teve um aumento de 14%. Apesar de o processo de lixiviação de cinzas implicar um consumo energético adicional, esse consumo por UF é negligenciável. Como intervenções ambientais, a aquisição de água destilada em embalagens de 20L e ainda cinzas em sacos de 25kg resulta num significativo aumento da geração de resíduos de embalagem por UF.

#### **5.3.3.2 *Cenário alternativo CV***

O cenário alternativo CV representa o panorama da produção de alfaces, no qual é usado o eluato de cinzas volantes na preparação da solução de fertirrigação. O sistema que representa este cenário é ilustrado na figura seguinte.



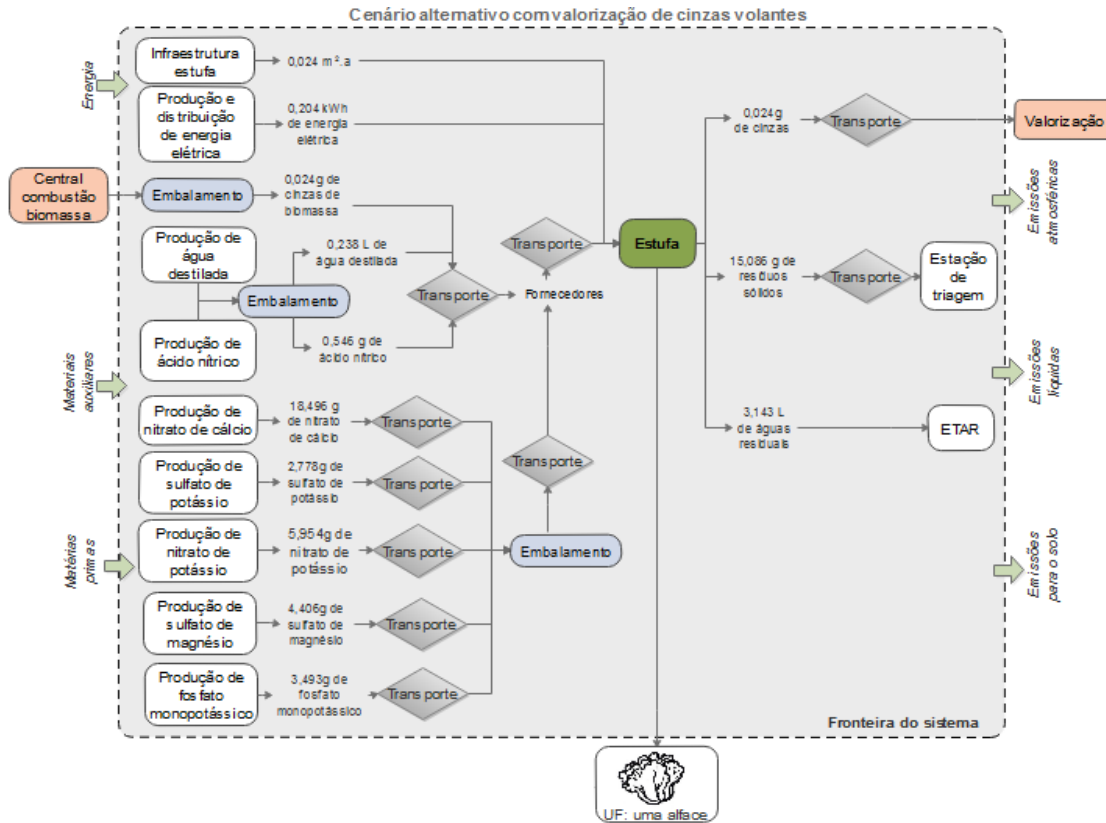


Figura 5.10 - Fronteiras do cenário alternativo CV.

As diferenças entre os cenários alternativos CV e CF residem apenas nos quantitativos dos fertilizantes, e naturalmente na tipologia de cinzas usada na preparação da solução de lixiviado. Sucintamente, e comparativamente ao cenário alternativo CF, no cenário alternativo CV, os consumos de nitrato de cálcio, sulfato de potássio e nitrato de potássio são inferiores, mas os de sulfato de magnésio e de fosfato monopotássico são superiores. Os valores dos fluxos de água destilada, ácido nítrico e águas residuais e cinzas lixiviadas mantêm-se. Nas intervenções ambientais, o fluxo de resíduos de embalagem é praticamente o mesmo.

Comparativamente ao cenário convencional, no cenário em discussão existe um decréscimo das necessidades de todos os fertilizantes, com exceção do fosfato monopotássico, cuja quantidade se mantém. Os consumos energéticos, de ácido nítrico e ainda a geração de águas residuais mantêm-se inalterados.

À semelhança do cenário alternativo CF, após o processo de lixiviação, as cinzas são secas ao ar antes de serem transportadas para valorização numa unidade de produção de adubos orgânicos.

## 5.4 AVALIAÇÃO DE IMPACTES DO CICLO DE VIDA

Neste estudo, a avaliação de impactes é calculada apenas até às fases obrigatórias da metodologia (classificação e caracterização). Assim, são excluídas as etapas facultativas como normalização, agrupamento e ponderação, de forma a minimizar os elementos subjetivos do estudo de AICV. Na fase da caracterização, as substâncias que contribuem para uma categoria de impacte são multiplicadas por um fator de caracterização, que expressa a contribuição relativa dessa mesma substância para cada categoria de impacte considerada. De acordo com o referido anteriormente, as categorias de impacte consideradas neste trabalho são: alterações climáticas, eutrofização, acidificação, formação de oxidantes fotoquímicos e a depleção de recursos abióticos.

### 5.4.1 Categorias de impacte

#### 5.4.1.1 Depleção de recursos abióticos

De modo geral, a categoria de impacte Depleção de Recursos Abióticos (DRA) é referente ao consumo de recursos não biológicos, como combustíveis fósseis, minerais, água, metais, etc. De acordo com Acero, Rodríguez e Ciroth (2016), existem vários “subimpactes” que podem ser considerados nesta categoria.

O valor do consumo dos recursos abióticos de uma dada substância, como o carvão, é uma medida da respetiva escassez que, implicitamente, depende da quantidade de recursos e do fluxo de extração. O fator de impacte engloba a quantidade de recursos que são esgotados e podem ser medidos em termos de “antimónio equivalente”, como também em consumo de água (em m<sup>3</sup>), ou em kg de minerais esgotados, ou ainda em MJ de combustíveis fósseis (Acero, Rodríguez e Ciroth, 2016).

Algumas das principais substâncias pertencentes a esta categoria de impacte que foram consideradas neste estudo, e respetivos fatores de caracterização, estão compiladas na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Fatores de depleção de recursos abióticos de alguns combustíveis fósseis (Guinée et al. 2002).

Recurso	Combustível	Fator de caracterização [kg antimónio-Eq/kg]
Solo	Carvão-hulha [kg]	0,0134
	Carvão-lignite [kg]	0,00671
	Petróleo [kg]	0,0201
	Gás natural [kg]	0,0187

Na apresentação dos resultados deste trabalho o carvão-hulha e o carvão-lignite foram considerados num único item designado por “carvão”.

#### 5.4.1.2 Acidificação

O processo de acidificação (AC) é provocado pela libertação para a atmosfera de diversas substâncias, e consequente deposição ácida nos sistemas terrestres e aquáticos. Nestes sistemas, quando o desenvolvimento das espécies não resilientes a estas perturbações fica comprometido é alterado o equilíbrio de um ecossistema. Os gases causadores de deposição ácida incluem o amoníaco, óxidos de nitrogénio e óxidos de enxofre (Acero, Rodríguez e Ciroth, 2016).

A unidade que expressa o Potencial de Acidificação (PA) é kg SO<sub>2</sub> equivalente. Este modelo não engloba diferenças regionais em termos da suscetibilidade de áreas sofrerem acidificação (Acero, Rodríguez e Ciroth, 2016).

Os fatores de impacto considerados nesta categoria são calculados de acordo com modelo adaptado RAINS 10 (Huijbregts, 1999), e são apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Potenciais de acidificação de alguns gases (Huijbregts 1999).

Emissões	Gás	Composto químico	Fator de caracterização [kg SO <sub>2</sub> -Eq/kg]
Atmosféricas	NH <sub>3</sub>	Amoníaco	1,6
	NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrogénio	0,5
	SO <sub>2</sub>	Dióxido de enxofre	1,2

#### 5.4.1.3 Alterações climáticas

As alterações climáticas (AA) estão relacionadas com as emissões de Gases de Efeito de Estufa (GEE) para a atmosfera, advindo da atividade antropogénica como utilização de combustíveis fósseis, emissão de metano em processos tecnológicos, uso de fertilizantes químicos, etc. Uma das consequências das emissões destes gases é o aquecimento global da superfície terrestre, com possíveis efeitos adversos na saúde humana e nos ecossistemas. O fator de caracterização desta categoria de impacto é o Potencial de Aquecimento Global (PAG) e pode ser calculado para diversos gases, ao longo do período de 20, 100 e 500 anos. Destes, o mais comum em estudos de ACV é o de 100 anos (Acero, Rodríguez e Ciroth, 2016).

Alguns dos GEE, assim como os respetivos fatores de caracterização, para esta categoria estão enumerados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Potenciais de aquecimento global de alguns GEE (IPCC 2006).

Emissões	Gás	Designação	PAG <sub>100</sub>
			[kg CO <sub>2</sub> eq/ kg emissão]
Atmosféricas	CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono (fóssil)	1
	CH <sub>4</sub>	Metano	25
	N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso	298

Nesta categoria de impacto não foram consideradas as emissões biogénicas de metano.

#### 5.4.1.4 Formação de oxidantes fotoquímicos

A degradação de compostos orgânicos na presença de calor e luz solar, e de determinados poluentes atmosféricos origina compostos reativos, designados de oxidantes fotoquímicos, como o ozono. Os Compostos Orgânicos Voláteis (COV), o monóxido de carbono (CO) e o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) são exemplos de substâncias precursoras de oxidantes fotoquímicos. Estes oxidantes fotoquímicos são tóxicos para o ser humano em altas concentrações (Acero, Rodríguez e Citroth, 2016).

O Potencial de Formação de Oxidantes Fotoquímicos (FOF) é calculado segundo o modelo trajectório da Comissão Económica das Nações Unidas para a Europa (UNECE), e é expresso em kg etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) equivalente, como unidade de referência.

As principais substâncias consideradas, no presente trabalho, relativas a esta categoria de impacto estão listadas na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Potenciais de formação de oxidantes fotoquímicos de alguns compostos (Derwent et al. 1998; Jenkin &amp; Hayman 1999).

Composto químico	Designação	PFOF
		[kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq/ kg emissão]
CH <sub>4</sub>	Metano	0,006
SO <sub>2</sub>	Dióxido de enxofre	0,048
CO	Monóxido de carbono	0,027

Nesta categoria de impacto não foram consideradas as emissões biogénicas de metano.

#### 5.4.1.5 Eutrofização

O fenómeno natural de eutrofização (EU) consiste no enriquecimento de ecossistemas em nutrientes, o que provoca uma produção excessiva de biomassa e diminuição da concentração de oxigénio nos meios recetores, fruto da degradação desta mesma matéria orgânica. O resultado é uma redução drástica da qualidade da água. Atualmente, este processo tem sido intensificado e acelerado de forma considerável pela ação do Homem,

resultante da emissão, quer para o ar quer para água, de amónio, nitratos, nitrogénio e ainda fósforo (Acero, Rodríguez e Citroth, 2016).

Na categoria de impacte Eutrofização estão incluídos os impactes diretos e indiretos de fertilizantes. Os impactes diretos resultam da produção de fertilizantes e os indiretos são calculados usando o método IPCC para estimar emissões para a água, causando eutrofização. Os potenciais de eutrofização (*vide* Tabela 5.10) são baseados nos procedimentos estequiométricos, descritos por Heijungs *et al.* (1992) e são expressos em kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> equivalente, a unidade de referência.

Tabela 5.10 - Potenciais de Eutrofização (PE) (Heijungs *et al.* 1992).

Compartimento ambiental	Parâmetro	Composto químico/Parâmetro	Fator de caracterização [kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> Eq/kg]
Massas de água	CQO	Carência Química de Oxigénio	0,022
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	lão nitrato	0,1
	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	lão nitrito	0,1
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	lão amónio	0,33
	N total	Nitrogénio	0,42
	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	lão fosfato	1,0
	P total	Fósforo	3,06
Atmosféricas	P total	Fósforo	3,06
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	lão nitrato	0,1
	NOx	Óxido de nitrogénio	0,13
	N <sub>2</sub> O	Monóxido de dinitrogénio	0,27
	NH <sub>3</sub>	Amoníaco	0,35
	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Ácido fosfórico	0,97
Solo	N total	Nitrogénio	0,42
	P total	Fósforo	3,06

#### 5.4.2 Método de cálculo

A equação de cálculo utilizada em cada categoria selecionada neste trabalho corresponde a:

$$\text{Impacte}_{\text{cat } j} = \sum_i m_i \cdot (\text{fator de caracterização})_{\text{cat},i} \quad (5.4)$$

Onde  $m_i$  corresponde à quantidade de intervenção (em massa ou volume).

### 5.5 INTERPRETAÇÃO

De acordo com o referido no Subcapítulo 2.6.6, na fase de interpretação num estudo de ACV deve ser feita (entre outras) uma avaliação da sensibilidade e consistência dos resultados,

aos parâmetros com maior incerteza. No âmbito deste trabalho, a análise de sensibilidade foi realizada aos parâmetros de inventário que apresentam maior incerteza, sendo estes apresentados na Tabela 5.12.

Tabela 5.11- Cenários de estudo e respetivos parâmetros de inventário sujeitos à análise de sensibilidade.

Cenário	Variáveis	Base	
<b>Convencional/ Alternativo</b>	Retalhistas - estufa	50	
	Unidade de produção de MgSO <sub>4</sub> - unidade de ensacamento	200	
	Distâncias [km]	Unidade de produção de HNO <sub>3</sub> - retalhistas	25
		Representante Portugal - retalhistas	150
		Percurso de recolha de resíduos de embalagem - estação de triagem	50
	Fluxos [L/UF]	Tratamento de águas residuais	3,143
<b>Convencional</b>	Distâncias [km]	CTB - aterro	100
<b>Alternativo</b>	Distâncias [km]	TMB - retalhistas	50
		Estufa - unidade de argamassas	50

Para cada um dos parâmetros foi estudada a influência da variação dos valores-base, utilizando uma gama de variação desde -100% até 100%, para o indicador da categoria de impacto alterações climáticas e eutrofização.

## 5.6 CONCLUSÃO

O objetivo deste estudo consiste na identificação, avaliação e comparação dos impactos ambientais do uso de cinzas de biomassa na fertirrigação de plantas hortícolas. Para tal foram definidos dois cenários: (i) o cenário convencional, onde as cinzas são depositadas em aterro e são usados exclusivamente fertilizantes na produção hidropónica de alfaces, e (ii) o cenário alternativo, com a valorização das cinzas (de fundo e volantes), como fonte parcial de nutrientes no plano de fertilização de alfaces. Um resumo do sistema de estudo, da sua função e respetiva unidade funcional encontram-se na tabela seguinte.

Tabela 5.12 Função e unidade funcional do sistema.

<b>Sistema de estudo</b>	Gestão de cinzas de biomassa (fundo de volantes)
<b>Função</b>	Deposição em aterro e valorização material
<b>Unidade Funcional</b>	1 alface (massa média de 300g)

Para uma abordagem integrada dos impactes ambientais de cada um dos cenários, foi utilizada a ferramenta ACV, e adotou-se a metodologia CML 2001. As categorias de impacte consideradas foram: alterações climáticas, eutrofização, acidificação, formação de oxidantes fotoquímicos e a depleção de recursos abióticos.

A análise de inventário foi conduzida com recurso a dados de um caso de estudo referente ao cultivo hidropónico de alfaces, e os restantes dados foram obtidos da base de dados Ecoinvent v. 3.3 (2016), de documentos (*e.g.* estrutura do mercado de eletricidade em Portugal), e ainda de artigos científicos (*e.g.* dados sobre caracterização do lixiviado de cinzas).

Note-se que certos processos (*e.g.*, fabrico de fitofármacos, fertilizante de ferro quelatado) foram excluídos em ambos os cenários (convencional e alternativos), quer devido a várias lacunas dos dados de inventário da estufa, quer devido à inexistência de informação/processos de produção nas bases de dados consultadas. Porém, do ponto de vista de comparação de cenários esta exclusão não é relevante visto que o fluxo destes materiais é igual nos dois cenários.

Durante a realização deste estudo foram feitos alguns pressupostos e, particularmente no caso das distâncias de alguns percursos, foi levada a cabo uma análise de sensibilidade no sentido de averiguar a sua importância/influência nas conclusões deste estudo.

## 6 RESULTADOS

### 6.1 INTRODUÇÃO

Os resultados da aplicação da metodologia de ACV, descrita no capítulo anterior, são apresentados e discutidos neste capítulo. Além deste subcapítulo de introdução, a estrutura deste capítulo compreende:

- três subcapítulos dedicados à apresentação e discussão de cada uma dos cenários de gestão avaliados: cenário convencional, cenário alternativo CF e cenário alternativo CV. Para cada um dos cenários é feita : (i) a análise de inventário (ICV), considerando as substâncias listadas no Subcapítulo 5.4.1 e as restantes na categoria de “outros” e (ii) a avaliação de impactes (AICV) assente nas cinco categorias de impacte selecionadas. Em qualquer uma das abordagens são identificados os processos ou substâncias que mais contribuem para potencial impacte ambiental total;

Atendendo a que todos os resultados deste capítulo têm como referência a UF (uma alface, 300g), por uma questão de simplificação de linguagem, será omitida esta referência base. Além disso, e visando facilitar a leitura e compreensão dos resultados, os processos foram agregados em grupos de acordo com a tabela seguinte.

*Tabela 6.1 - Categorias estabelecidas, e respetivos processos agregados, na análise de ICV e ACV deste estudo.*

<b>Designação dos processos agregados</b>	<b>Processos individuais</b>
<b>Infraestrutura</b>	Infraestrutura estufa
<b>Transportes</b>	Transporte desde as unidades de produção de fertilizantes até aos retalhistas Transporte associado à operação de gestão das cinzas Percurso de recolha de resíduos de embalagem de fertilizantes Transporte de fertilizantes entre retalhistas e estufa Transporte de cinzas após lixiviação entre a estufa e o local de “valorização secundária”
<b>Eletricidade</b>	Produção e distribuição de energia elétrica
<b>Fertilizantes</b>	Processos de produção de fertilizantes, ácido nítrico e água destilada e respetivos processos de embalamento
<b>Gestão resíduos</b>	Triagem de resíduos de embalagem Tratamento de águas residuais
<b>Gestão cinzas</b>	Deposição de cinzas em aterro



- um subcapítulo onde é feita a comparação da AICV dos três cenários;
- um subcapítulo com uma análise de sensibilidade aos parâmetros com maior incerteza neste estudo;
- E um último subcapítulo com as principais conclusões do estudo de ACV.

Todos os resultados apresentados neste capítulo têm como referência a unidade funcional deste estudo de ACV, i.e. uma alface. Contudo, algumas vezes (neste capítulo) esta unidade de referência é omitida por uma questão de simplificação na apresentação gráfica dos resultados ou na discussão dos mesmos. Acresce ainda referir que, sempre que sejam omitidas as unidades dos valores das várias categorias de impacte, estas correspondem a: AA - Alterações Climáticas [kg CO<sub>2</sub> eq/UF]; EU - Eutrofização [kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq/UF]; AC - Acidificação [kg SO<sub>2</sub> eq/UF]; FOF - Formação de Oxidantes Fotoquímicos [kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq/UF] e Depleção de Recursos Abióticos [kg Sb eq/UF].

## 6.2 CENÁRIO CONVENCIONAL

O cenário convencional corresponde à situação atual mais comum de gestão das cinzas de biomassa e ao uso exclusivo de fertilizantes no cultivo hidropónico de alface. Os resultados do ICV são apresentados no subcapítulo seguinte e a ACV é feita no Subcapítulo 6.2.2.

### 6.2.1 Análise de inventário do ciclo de vida

Os resultados de ICV para o cenário convencional são sumarizados em intervenções ambientais: (i) depleção de recursos abióticos, (ii) emissão de poluentes atmosféricos e ainda (iii) emissão de poluentes eutrofizantes. Os resultados encontram-se na Figura 6.1, Figura 6.2 e Figura 6.3, respetivamente.

Na depleção de recursos abióticos, a eletricidade e a infraestrutura da estufa são os processos que mais contribuem para o consumo de carvão, gás natural e petróleo. A produção de fertilizantes tem também alguma expressão no consumo destes recursos, mas é mais preponderante no grupo de “outros” recursos abióticos. Os transportes apresentam a sua maior contribuição na depleção de petróleo.

Dos processos em discussão, a deposição de cinzas em aterro é o que menos contribui para a depleção de todos os recursos, tal como pode ser verificado na figura seguinte.

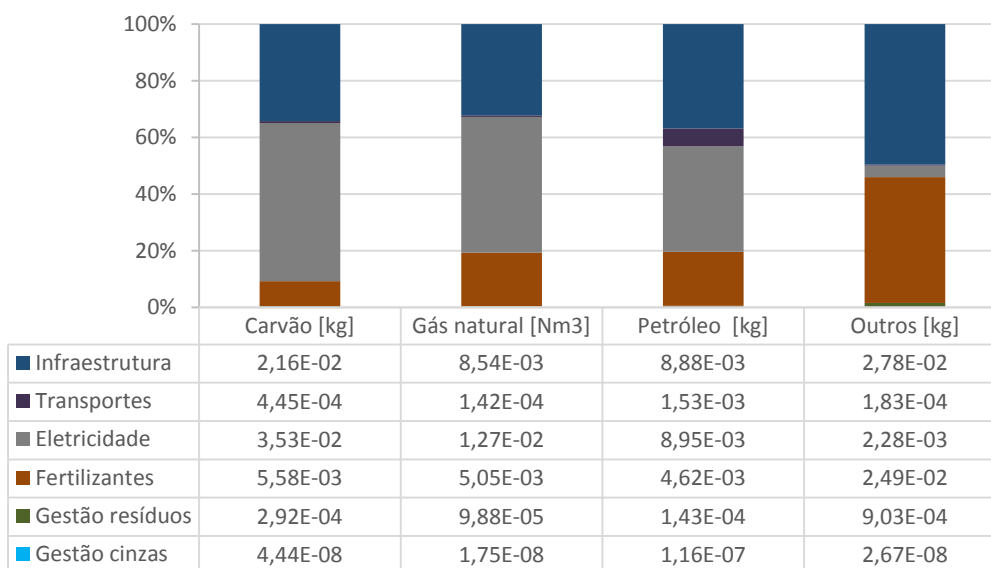


Figura 6.1 - Contribuição relativa de cada grupo de processos para a depleção de recursos abióticos no cenário convencional.

Na figura anterior, nos recursos classificados como “Outros”, verifica-se que os fertilizantes têm um relevante contributo, correspondente sobretudo à extração (da Terra) de carbonato de cálcio (1,30E-02 kg/UF) e a infraestrutura, também devido à extração CaCO<sub>3</sub> (1,06E-02), mas também de “iron, 46% in ore, 25% in crude ore”, no valor de 1,33E-02kg/UF.

Observando a Figura 6.2, e à semelhança do verificado na DRA, verifica-se que a eletricidade e a infraestrutura voltam a ser os processos mais relevantes na emissão de quase todos os poluentes atmosféricos, com exceção das substâncias NH<sub>3</sub> e N<sub>2</sub>O. Para o gás N<sub>2</sub>O, os fertilizantes contribuem com mais de 90% das emissões. Os gases de combustão emitidos pelos transportes representam uma pequena fração das emissões totais.

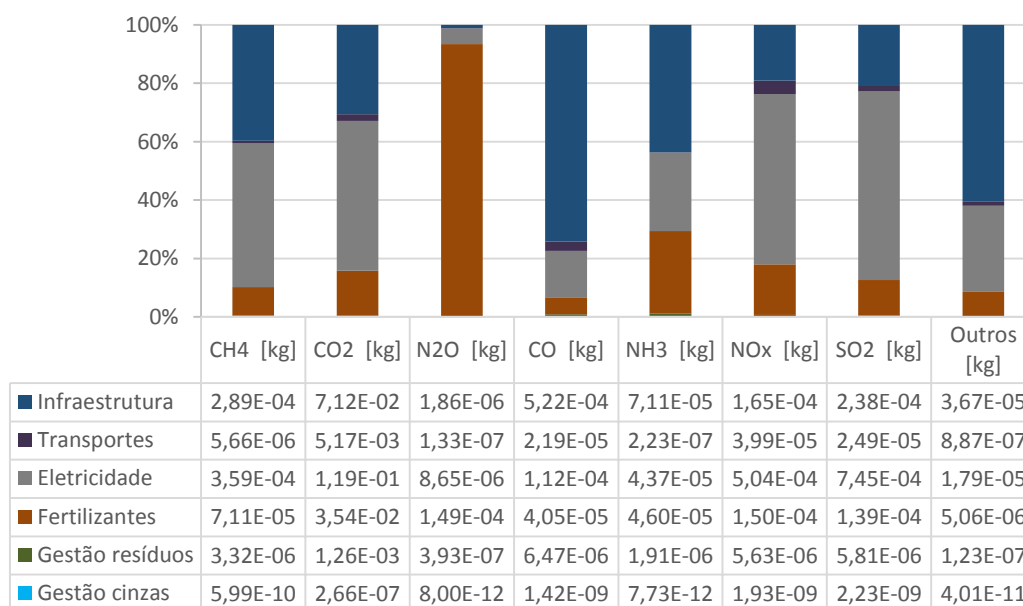


Figura 6.2 - Contribuição relativa de cada grupo de processos na emissão de poluentes atmosféricos no cenário convencional.

Na classe dos poluentes atmosféricos classificados como “Outros”, o processo infraestrutura é o que mais se evidencia devido sobretudo à emissão de “ethane, 1,1-difluoro-, HFC-152a”, no valor de  $1,77E-05$  kg/UF. O processo transportes encontra-se na segunda posição devido à emissão, principalmente, de acetaldeído ( $1,11E-07$ kg/UF) e de formaldeído  $2,06E-07$  (kg/UF). Os fertilizantes encontram-se na 3ª posição, com as emissões mais relevantes de  $3,00E-07$  kg/UF de benzeno,  $4,32E-07$  kg/UF de butadeno,  $1,08E-07$  kg/UF de etilacetato,  $1,33E-07$  kg/UF de formaldeído,  $9,21E-07$  de metanol,  $1,08E-07$  de metil etil cetona,  $5,61E-07$  kg/UF de pentano e  $5,86E-07$  kg/UF de propano.

Analisando a Figura 6.3, relativa às emissões de poluentes eutrofizantes, verifica-se que a gestão de resíduos (de embalagem e tratamento de águas residuais) é a principal responsável pela emissão dos compostos  $NH_4^+$ ,  $NO_2^-$  e  $NO_3^-$ . A produção de fertilizantes é a maior fonte de emissão de nitrogénio total e a de fósforo total é o processo de eletricidade.

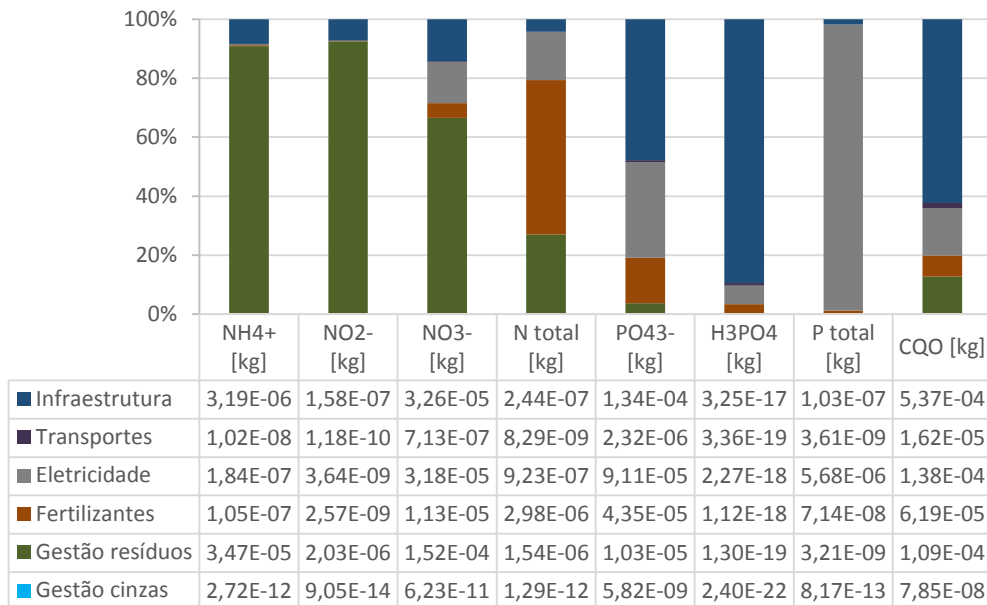


Figura 6.3 - Contribuição relativa de cada grupo de processos na emissão de poluentes eutrofizantes no cenário convencional.

Da sucinta análise de inventário ao cenário convencional, denota-se que os processos que mais contribuem para a depleção de recursos abióticos e para emissão dos diversos poluentes são principalmente a eletricidade e a infraestrutura. Relativamente a esta última, salienta-se que, segundo as informações constantes no respetivo processo do *Ecoinvent* (Capítulo 5.3.1.2), é uma unidade que carece de manutenção com uma frequência de 4 em 4 anos, nomeadamente a substituição dos vários componentes de origem polimérica (paredes, teto, calhas, etc.). Este facto pode justificar a relevância que este processo assume no consumo de recursos e na emissão de poluentes.

A deposição de cinzas em aterro tem um contributo irrisório, o que se deve ao quantitativo de cinza depositado (por UF) considerado, i.e., o correspondente à massa necessária para preparar a solução de lixiviado, usado na preparação da solução de fertirrigação do cenário alternativo (CF ou CV).

## 6.2.1 Avaliação de impacto do ciclo de vida

A avaliação de impactos do cenário convencional é ilustrada na Figura 6.4.

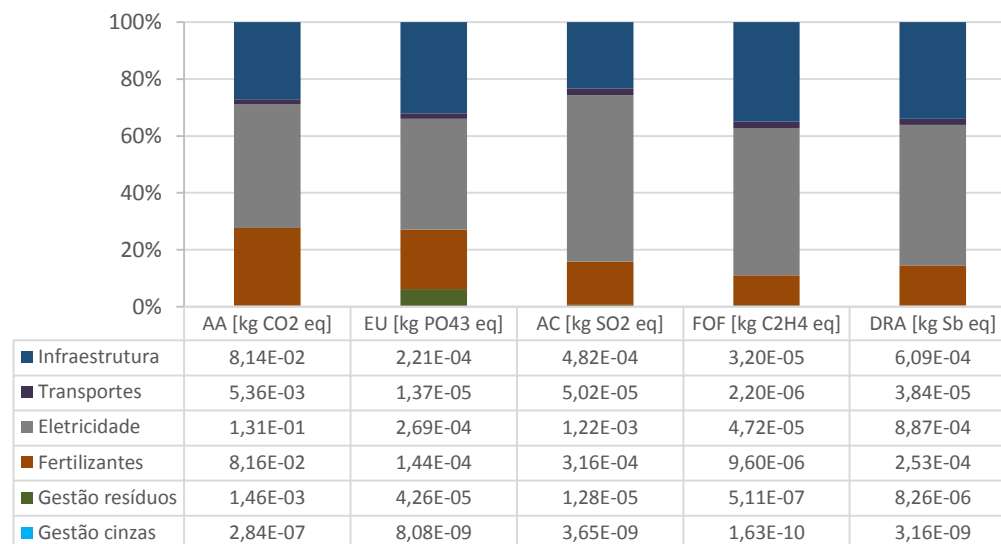


Figura 6.4 - Contribuição relativa de cada grupo de processos do cenário convencional para cada uma das cinco categorias de impacto consideradas no presente estudo.

De forma geral, a eletricidade, a infraestrutura e a produção de fertilizantes são os processos que mais contribuem para todas as categorias de impacto, ao passo que a deposição de cinzas em aterro tem uma contribuição praticamente desprezável. A gestão de resíduos tem a sua maior contribuição na categoria de impacto Eutrofização (EU).

Seguidamente é feita uma análise mais detalhada a cada categoria de impacto, com a informação mais desagregada do que a apresentada na figura anterior.

Na Figura 6.5 constam as contribuições de cada processo para as Alterações Climáticas (AA), bem como a contribuição de cada poluente desta categoria de impacto. Da sua análise verifica-se claramente que a eletricidade é o processo que mais contribui para as AA deste cenário, sendo o contributo dos processos infraestrutura e fertilizantes muito semelhantes. O GEE preponderante em todos os processos, à exceção do processo de fertilizantes, é o dióxido de carbono. No processo fertilizantes, o dióxido de nitrogénio é o GEE com maiores níveis de emissão.

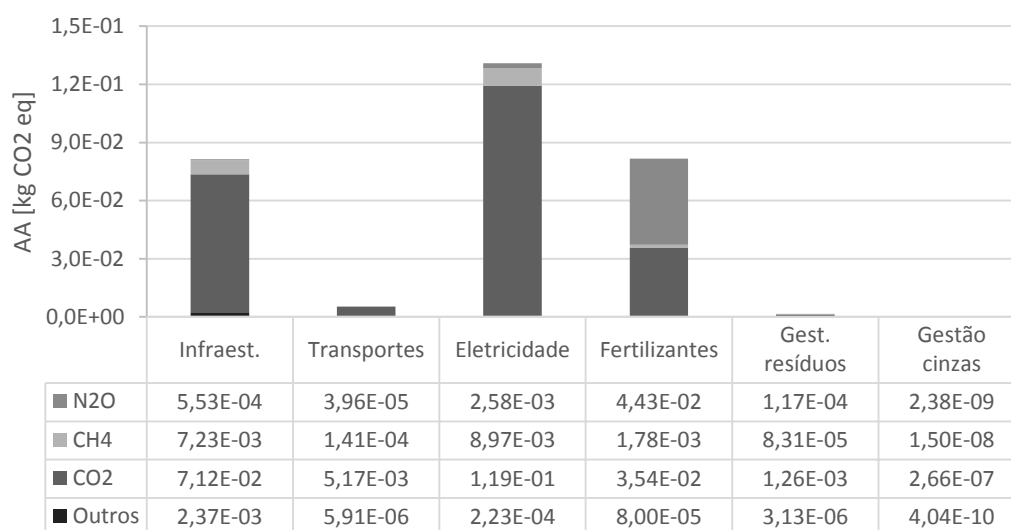


Figura 6.5 - Contribuição de cada grupo de processos para as Alterações Climáticas no cenário convencional.

A Eutrofização (EU) apresenta um potencial total de  $6,90E-4$  kg de  $PO_4^{3-}$  eq/UF, e informação mais detalhada sobre esta categoria de impacte encontra-se na Figura 6.6.

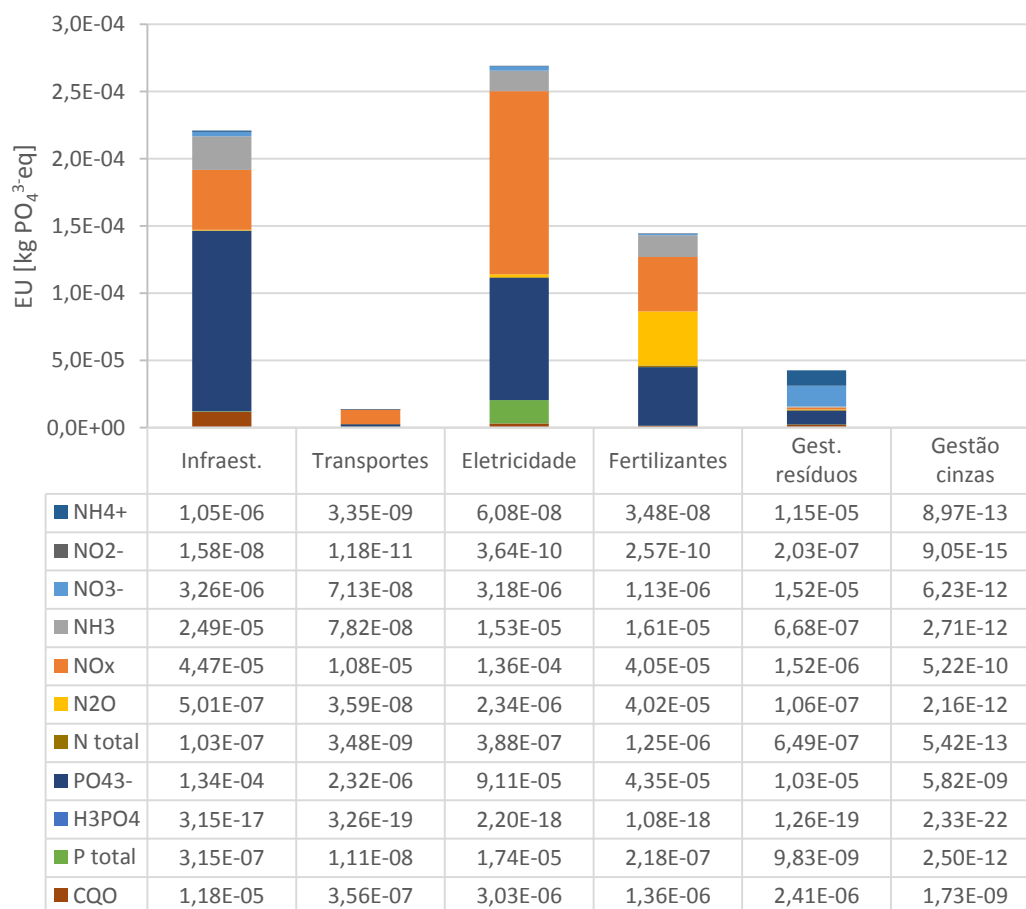


Figura 6.6 - Contribuição de cada grupo de processos para a Eutrofização no cenário convencional.

Na figura anterior observa-se que a emissão de  $\text{PO}_4^{3-}$  e o  $\text{NO}_3^-$ , com origem maioritária na eletricidade e infraestrutura, apresentam a maior contribuição para o potencial eutrofizante. A contribuição do potencial de eutrofização do  $\text{N}_2\text{O}$  (6%) é maioritariamente originária dos fertilizantes (93%).

O processo de gestão de resíduos encontra-se em 4º lugar nesta categoria de impacte, seguido dos transportes.

A Acidificação (AC) possui um potencial de impacte total de  $2,08\text{E-}3$  kg de  $\text{SO}_2$  eq/UF e, de acordo com a figura seguinte, o processo de eletricidade é o que mais contribui para esta categoria de impacte (mais de 50%), seguindo-se o processo infraestrutura. Dos três gases, o  $\text{SO}_2$  é o que apresenta maior contribuição nesta categoria de impacte.

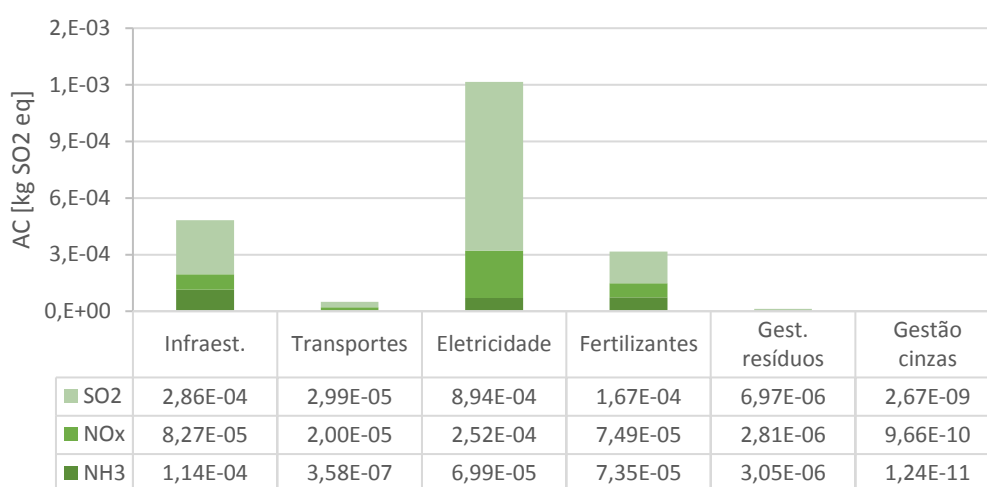


Figura 6.7 - Contribuição de cada grupo de processos para a Acidificação no cenário convencional.

A Formação de Oxidantes Fotoquímicos (FOF) apresenta um potencial total de  $9,15\text{E-}5$   $\text{C}_2\text{H}_4$  eq/UF e, à semelhança de outras categorias de impacte, os processos eletricidade e infraestrutura são os mais relevantes para este potencial (*vide* Figura 6.8). O CO e o  $\text{SO}_2$  são os principais poluentes no processo infraestrutura e eletricidade, respetivamente.

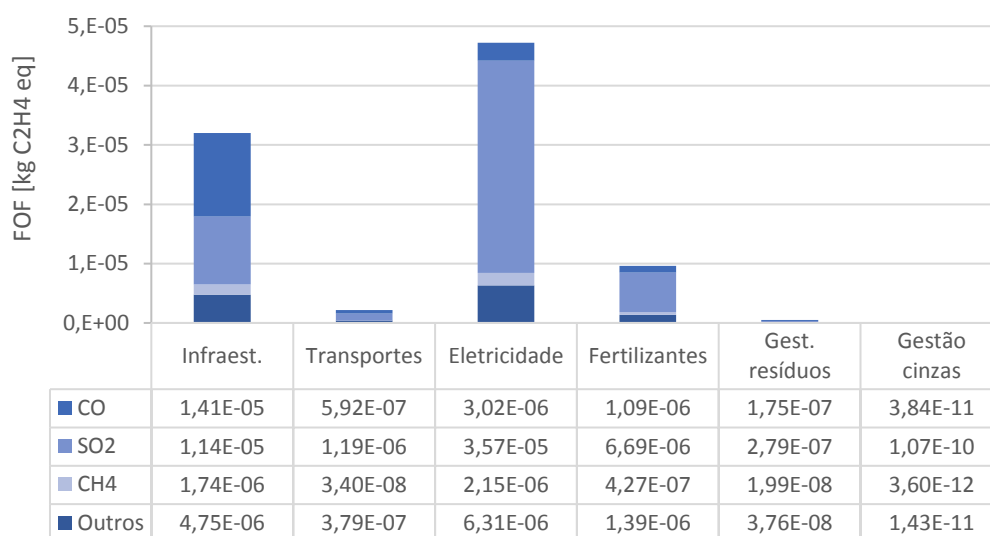


Figura 6.8 - Contribuição de cada processo para a Formação de Oxidantes Fotoquímicos (FOF) no cenário convencional.

Finalmente na Depleção de Recursos Abióticos (DRA), com um potencial total de  $1,80E-3$  kg de Sb eq/UF, o panorama não difere das demais categorias de impacte no que diz respeito à importância relativa de cada processo. Assim, a eletricidade e a infraestrutura da estufa representam o maior contributo (84%), seguindo-se os fertilizantes (14%). Em contrapartida, os impactes associados à deposição de cinza, bem no processo gestão de resíduos são minoritários, como pode ser verificado na figura seguinte.

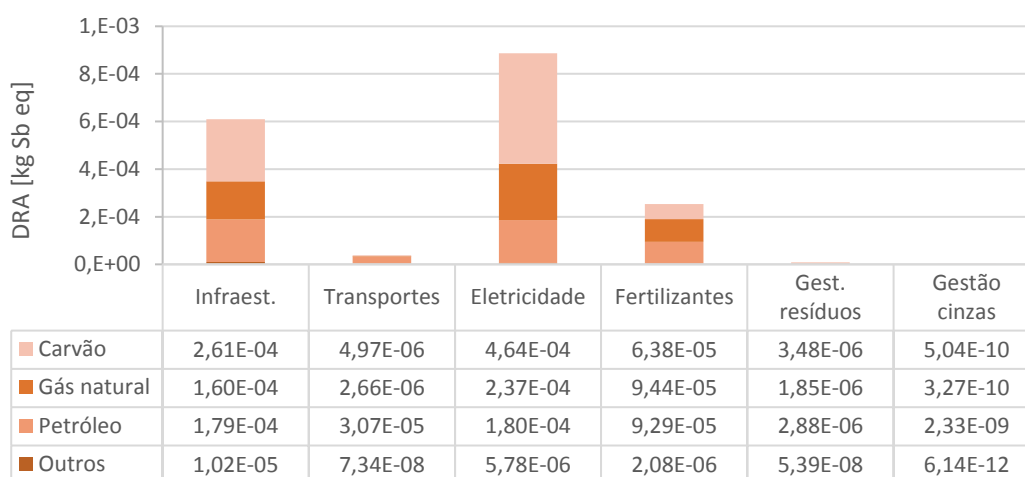


Figura 6.9 - Contribuição de cada grupo de processos para a Depleção de Recursos Abióticos no cenário convencional.

## 6.3 CENÁRIO ALTERNATIVO CF

### 6.3.1 Análise de inventário d ciclo de vida

A abordagem levada a cabo neste trabalho no que concerne à apresentação dos resultados de ICV, é similar à realizada no cenário convencional. Assim, neste cenário alternativo as intervenções ambientais são organizadas em: (i) depleção de recursos abióticos, (ii) emissão de poluentes atmosféricos e (iii) emissão de poluentes eutrofizantes.

Na categoria de impacto depleção de recursos abióticos, Figura 6.10, verifica-se que, à semelhança do observado no cenário convencional, os principais processos responsáveis pelo consumo de carvão, gás natural e petróleo são a produção e distribuição de eletricidade e a infraestrutura da estufa.

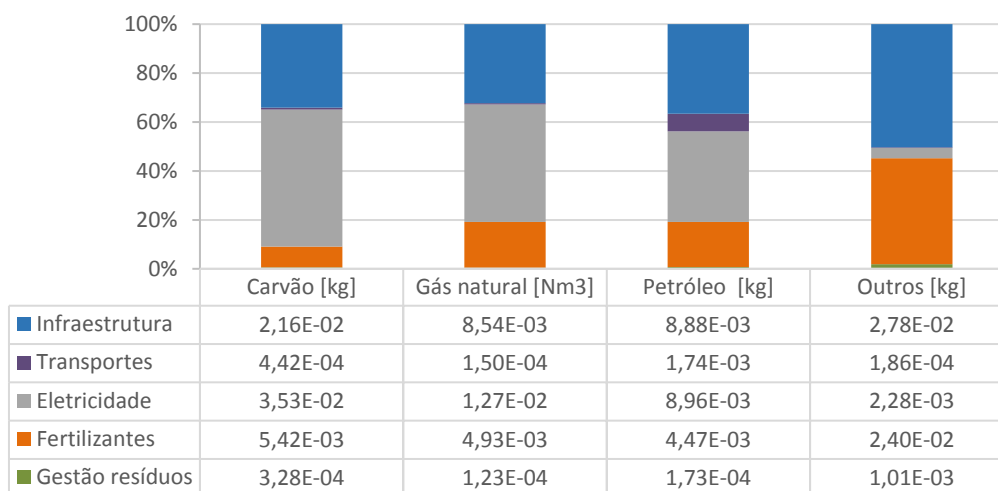


Figura 6.10 - Contribuição relativa de cada grupo de processos para a depleção de recursos abióticos no cenário alternativo CF.

Na figura anterior, nos recursos classificados como “Outros” verifica-se que os fertilizantes têm um relevante contributo devido sobretudo à extração de carbonato de cálcio (1,23E-02 kg/UF). A infraestrutura também contribui para a extração  $\text{CaCO}_3$  (1,06E-02kg/UF) e de “iron, 46% in ore, 25% in crude ore”, no montante de 1,33E-02kg/UF.

Quanto à emissão de poluentes atmosféricos, a situação é idêntica ao cenário convencional, com a eletricidade e a infraestrutura como principais fontes de todos os gases, com exceção de  $\text{NH}_3$  e  $\text{N}_2\text{O}$ , como se pode verificar na figura seguinte.



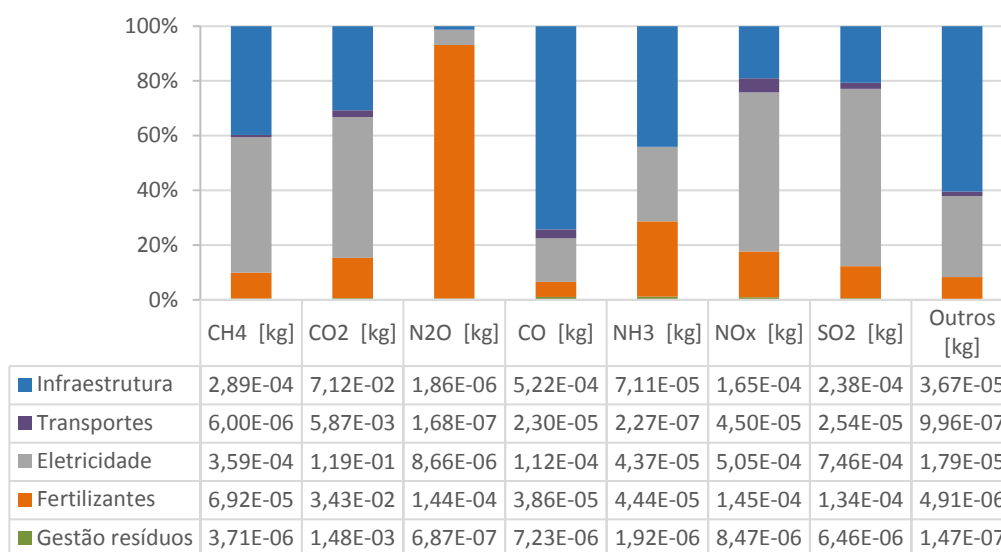


Figura 6.11 - Contribuição relativa de cada grupo de processos na emissão dos principais poluentes atmosféricos no cenário alternativo CF.

Na classe dos “Outros” poluentes encontra-se a emissão de 1,77E-05 kg de “ethane, 1,1-difluoro-, HFC-152a” no processo infraestrutura e de 1,35E-06 kg de propano, 2,76E-06 kg de pentano, 2,76E-06 kg de etano e 2,61E-06 kg de benzeno (tudo por UF) no processo eletricidade.

Para os poluentes eutrofizantes, a Figura 6.12 indica que a gestão de resíduos, mais concretamente o tratamento de águas residuais, é o principal responsável pela emissão de compostos  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{NO}_3^-$ , sendo no entanto os fertilizantes a maior fonte de emissão de nitrogénio. A infraestrutura evidencia-se na emissão de maiores cargas orgânicas (CQO) e a eletricidade nas emissões totais de fósforo. Este panorama já havia sido verificado no cenário convencional.

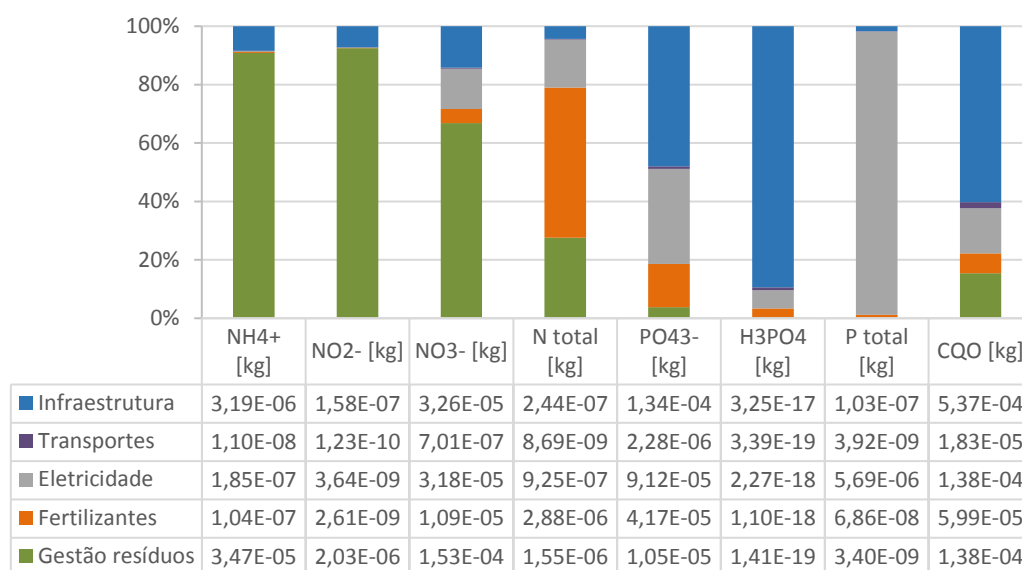


Figura 6.12 - Contribuição relativa de cada grupo de processos na emissão de poluentes eutrofizantes no cenário alternativo CF.

### 6.3.2 Avaliação de impacto do ciclo de vida

Um resumo dos impactos ambientais potenciais do cenário CF é ilustrado na Figura 6.13.

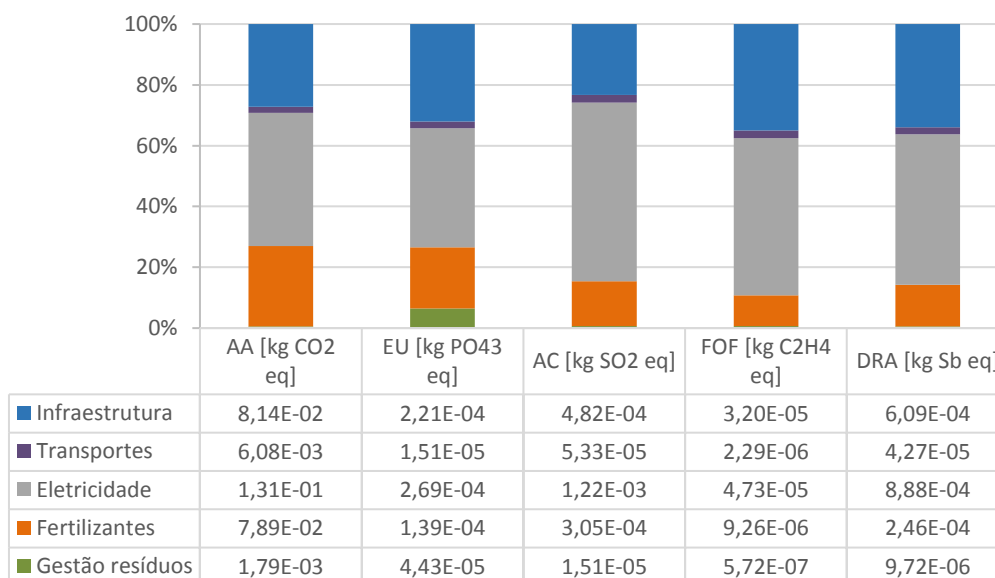


Figura 6.13 - Contribuição relativa de cada grupo de processos do cenário alternativo CF para cada uma das cinco categorias de impacto selecionadas no presente estudo.

A importância relativa dos grupos de processos considerados em cada uma das categorias de impacto é (por ordem decrescente):

- Alterações climáticas – eletricidade > infraestrutura ≈ fertilizantes > transportes > gestão de resíduos;
- Eutrofização - eletricidade > infraestrutura > fertilizantes > gestão de resíduos > transportes;
- Acidificação - eletricidade > infraestrutura > fertilizantes > transportes > gestão de resíduos;
- Formação de oxidantes fotoquímicos - eletricidade > infraestrutura > fertilizantes > transportes > gestão de resíduos;
- Depleção de recursos abióticos - eletricidade > infraestrutura > fertilizantes > transportes > gestão de resíduos.

Assim, em todas as categorias de impacte os três processos mais relevantes são a eletricidade, a infraestrutura e os fertilizantes.

Comparativamente ao cenário convencional, neste cenário alternativo não se verificam, do ponto de vista qualitativo, alterações nas tendências/influências de cada processo em cada categoria de impacte. Apesar de neste cenário não existir a deposição de cinzas em aterro, e haver a inclusão de embalagem de cinzas e produção de água destilada, os respetivos fluxos não têm expressão face aos dos três principais processos acima referidos. No que diz respeito aos fertilizantes, os consumos são ligeiramente diferentes nos dois cenários, mas parece não ter um efeito notório. Em suma, optou-se por não explorar mais detalhadamente este cenário neste subcapítulo, considerando-se mais relevante a análise comparada dos cenários que se apresentou no Subcapítulo 6.6

## **6.4 CENÁRIO ALTERNATIVO CV**

Os resultados obtidos do ICV e da AICV do cenário alternativo CV são muito semelhantes aos do cenário CF. Neste contexto, considerou-se desnecessário apresentar de forma individualizada os referidos resultados, tendo-se optado por discuti-los de forma comparada no subcapítulo seguinte.

## **6.5 ANÁLISE COMPARATIVA DOS CENÁRIOS DE GESTÃO**

A Figura 6.14 permite uma análise global de forma comparada dos potenciais impactes ambientais dos cenários estudados no presente trabalho. De modo a simplificar a visualização/interpretação da informação, os valores de algumas categorias de impacte foram multiplicados por uma constante (indicada entre parêntesis).

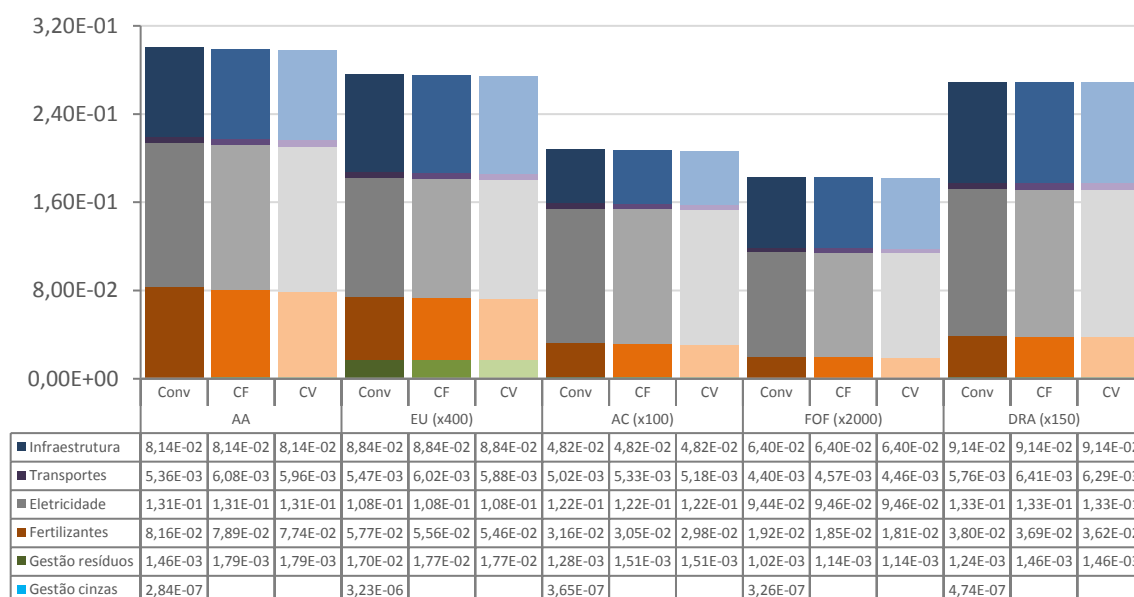


Figura 6.14 - Avaliação de impactes ambientais de cada um dos cenários estabelecidos (tonalidade escura - cenário convencional, tonalidade intermédia – cenário alternativo CF e tonalidade clara cenário alternativo CV).

As diferenças entre os perfis ambientais dos três cenários são muito reduzidas, sendo maiores entre o cenário convencional e o cenário alternativo CV. O processo “infraestrutura” da estufa e o de produção de eletricidade apresentam impactes ambientais iguais nos três cenários, devido aos quantitativos (consumos/*inputs*) serem iguais. A deposição de cinza é um processo exclusivo do cenário convencional cuja contribuição para o perfil ambiental é residual.

A redução dos quantitativos de (alguns) fertilizantes nos cenários alternativos, devido à integração das cinzas de biomassa como fonte de alguns nutrientes, aparentemente não tem uma redução expressiva nos indicadores das várias categorias de impacte. Este facto pode estar associado ao incremento dos transportes /ou à gestão de resíduos. De forma a confirmar esta hipótese, será feita uma análise mais detalhada às contribuições de cada processo, pertencentes ao grupo “ fertilizantes”, “gestão de resíduos” e “transportes”, de acordo com a Tabela 6.1.

Iniciando a análise pelo grupo “fertilizantes”, verifica-se que os impactes ambientais provenientes do embalamento são pouco significativos (máximo de 5%). Deste modo, este processo foi excluído desta análise, bem como a produção de ácido nítrico. O primeiro por ser pouco relevante neste contexto e o segundo porque os quantitativos são iguais nos três cenários. Neste contexto, o contributo dos (restantes) processos de produção dos fertilizantes agregados é ilustrado na Figura 6.15.

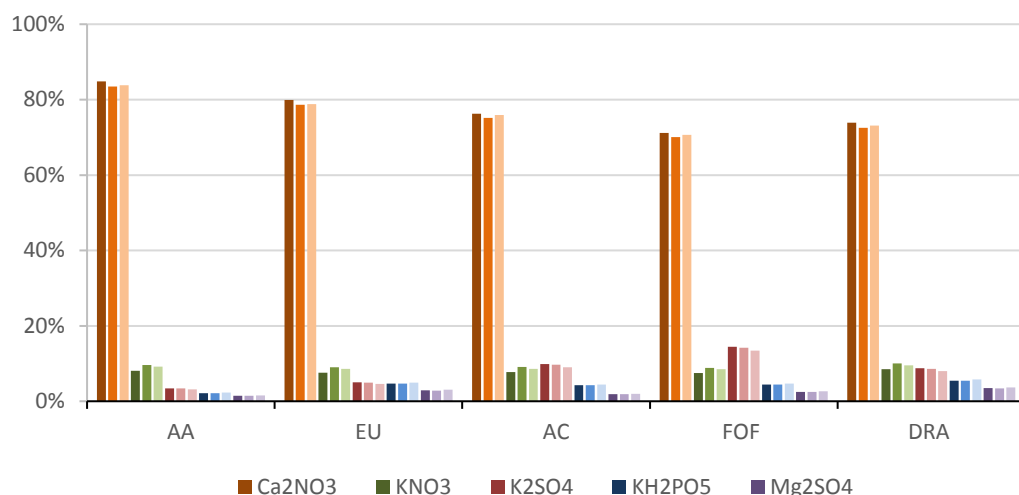


Figura 6.15 – Contribuição de cada processo de produção de fertilizantes para os indicadores das categorias de impactes do grupo “fertilizantes” (tonalidade escura - cenário convencional, tonalidade intermédia – cenário alternativo CF e tonalidade clara cenário alternativo CV).

Analisando esta figura anterior verifica-se que cada processo de produção dos fertilizantes tem contributos muito distintos para as diferentes categorias de impacte. A produção de nitrato de cálcio é o processo que mais contribui para todos os indicadores das categorias de impacte e, portanto, a redução do fluxo/consumo deste fertilizante terá efeitos mais evidentes na diminuição dos potenciais das categorias de impacte do grupo “fertilizantes”. A produção de água destilada não é abordada pois apresenta uma contribuição residual, para todas as categorias de impacte.

Os resultados comparados do grupo da gestão de resíduos encontra-se na Figura 6.16. Nesta observa-se que o tratamento de águas residuais é o processo mais relevante em termos de impactes ambientais, em todas as categorias, mesmo com o aumento do fluxo de resíduos de embalagens nos cenários alternativos. Desde modo, a redução do fluxo de geração de águas residuais proporcionaria uma diminuição mais notória nos valores das categorias de impacte.

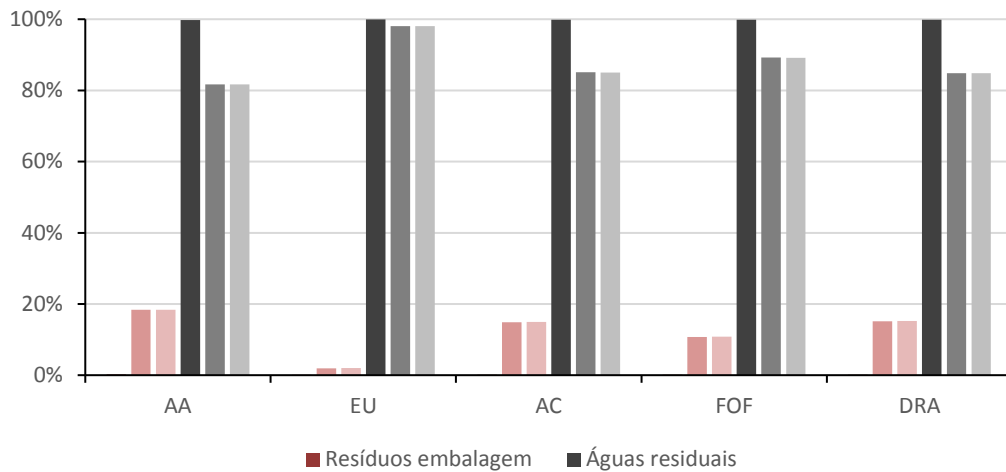


Figura 6.16 - Contribuição de cada processo de tratamento de resíduos (águas residuais e resíduos de embalagem) para os indicadores das categorias de impactes do grupo “Gestão de resíduos” (tonalidade escura - cenário convencional, tonalidade intermédia – cenário alternativo CF e tonalidade clara cenário alternativo CV).

À semelhança dos grupos anteriores, os processos pertencentes no grupo “transportes” foram comparados de forma gráfica. A contribuição de cada tipologia de transporte tem um contributo distinto para os potenciais de cada categoria de impacte, como se pode verificar na Figura 6.17.

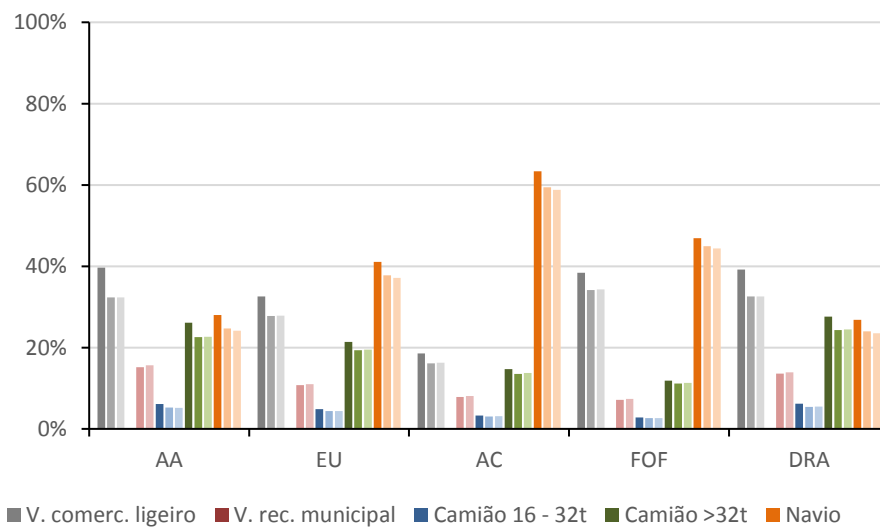


Figura 6.17 - Contribuição de cada tipo de transportes para os impactes ambientais do grupo dos transportes (tonalidade escura - cenário convencional, tonalidade intermédia – cenário alternativo CF e tonalidade clara cenário alternativo CV).

Nas categorias de impacte AA e DRA, o transporte por veículo comercial ligeiro apresenta as maiores contribuições, enquanto que para nas restantes categorias as maiores contribuições correspondem ao transporte por navio.

As distâncias de cada um dos percursos efetuados pelos meios de transporte acima referidos foram assumidas (vide Tabela 5.5) e/ou calculadas sob alguns pressupostos. No sentido de

avaliar a influência que estes valores (e outros) têm nos resultados deste estudo, levou-se a cabo uma análise de sensibilidade que se apresenta no subcapítulo seguinte.

## 6.6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

No presente trabalho, os parâmetros que se considera haver maior incerteza nos respetivos quantitativos são as distâncias dos percursos dos vários meios de transporte e o volume de águas residuais gerado na produção hidropónica de alfaces. Com vista a avaliar a influência que estes parâmetros têm nos resultados, levou-se a cabo uma análise de sensibilidade. Esta consistiu em variar em  $\pm 100\%$  os quantitativos “total das distâncias” e o volume de águas residuais e avaliar o efeito nos valores dos potenciais impactes ambientais nas categorias AA e EU.

Os resultados da análise de sensibilidade efetuados aos parâmetros descritos na Tabela 5.11 encontram-se representados na Figura 6.18 para a categoria AA, e na Figura 6.19 para a categoria EU. Atendendo a que em ambos os cenários alternativos (CF e CV), os parâmetros apresentam os mesmos quantitativos, será adotada a expressão “cenários alternativos” na interpretação dos resultados destas figuras.

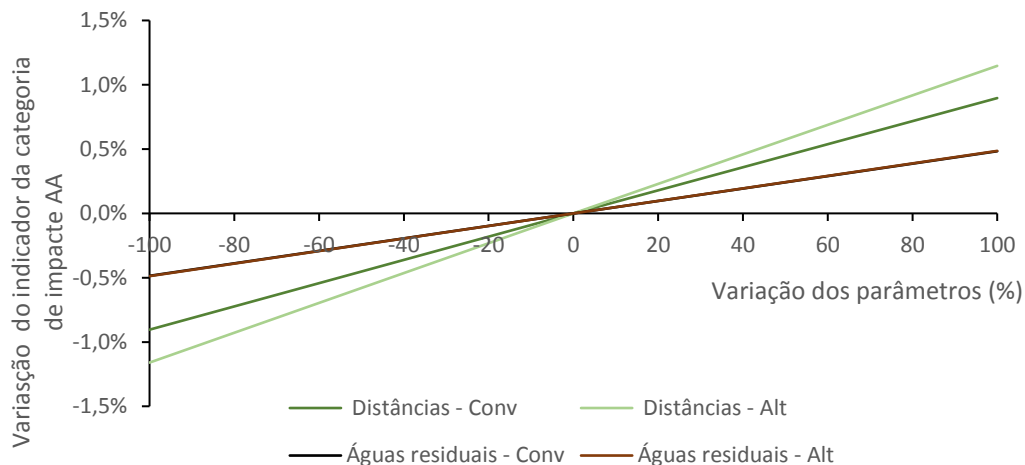


Figura 6.18 - Influência no indicador de AA da variação dos parâmetros sujeitos à análise de sensibilidade: volume de águas residuais e distâncias de percursos.

A variação dos parâmetros sujeitos a análise de sensibilidade têm uma maior influência nos cenários alternativos, sendo as distâncias o parâmetro mais relevante. Mesmo com uma variação de  $\pm 100\%$  dos parâmetros, a variação máxima do indicador de AA é inferior a 2%, pelo que se pode concluir que estes não têm um impacte significativo na categoria de impacte alterações climáticas. Esta constatação advém do facto dos processos eletricidade (que é consumida na estufa) e infraestrutura (estufa) serem os responsáveis por cerca de 70% das AA, enquanto que os transportes apenas cerca de 2%.

A influência dos parâmetros, sujeitos a análise de sensibilidade, no potencial da categoria de impacte Eutrofização pode ser visualizado na figura seguinte.

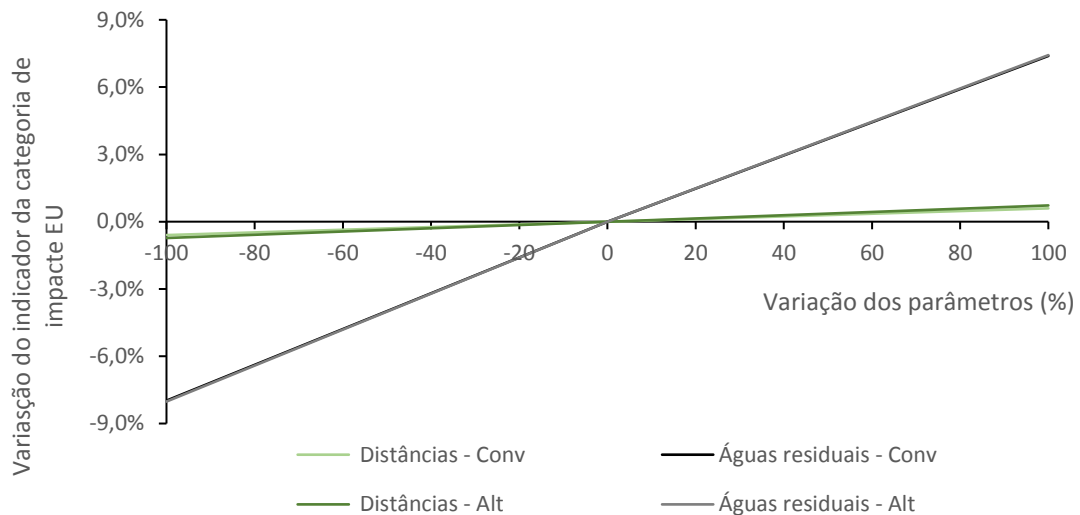


Figura 6.19 - Influência no indicador de AA da variação dos parâmetros sujeitos à análise de sensibilidade: volume de águas residuais e distâncias de percursos.

O volume de águas residuais assume maior influência no indicador desta categoria de impacto, apesar da variação deste não ultrapassar os  $\pm 9\%$ . À semelhança da análise de sensibilidade efetuada para o indicador AA, pode-se concluir que os parâmetros em análise não têm um impacto significativo na categoria de impacto eutrofização.

Assim como na categoria de impacto anterior (AA), a produção e distribuição de eletricidade e a infraestrutura (estufa) contribuem com cerca de 40% e 30%, respetivamente, enquanto que a gestão de resíduos apenas com cerca de 6%.

## 6.7 CONCLUSÃO

A aplicação da ferramenta ACV foi utilizada na identificação, avaliação e comparação dos impactos ambientais de três cenários definidos: (i) cenário convencional, (ii) cenário alternativo, com a valorização de cinzas de fundo e (iii) cenário alternativo, com a valorização das cinzas volantes. Complementarmente, foi adotada a metodologia CML 2001 e as categorias de impacto consideradas foram: alterações climáticas, eutrofização acidificação, formação de agentes fotoquímicos e depleção de recursos abióticos. As principais conclusões a reter deste estudo são:

- ✓ A análise de inventário demonstrou que o processo de produção e distribuição de eletricidade é o principal responsável pela depleção de recursos abióticos como carvão, gás natural e petróleo. Além disso, é o processo com maior emissões atmosféricas de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  e  $\text{SO}_2$ . Relativamente a substâncias eutrofizantes, a infraestrutura da estufa é a principal emissora de matéria orgânica (CQO);
- ✓ Na avaliação de impactos do ciclo de vida, a produção e distribuição de eletricidade e a infraestrutura da estufa são os processos que mais contribuem para os indicadores globais de todas as categorias de impacto. Em contrapartida, a deposição de cinzas em aterro tem uma contribuição residual nos indicadores referidos;



- ✓ Na análise comparada dos três cenários, verifica-se que as diferenças entre eles são mínimas nas cinco categorias de impacte; porém, o cenário alternativo CV apresenta os menores quantitativos. Como os *inputs* dos processos eletricidade e infraestrutura da estufa são iguais nos três cenários, não foram explorados em detalhe a sua contribuição. Ao invés, foi estudada a contribuição individual de cada processo pertencente aos grupos de processos fertilizantes, transportes e tratamento de resíduos, e identificados os que maior relevância tem, sendo respetivamente: a produção de nitrato de cálcio, o transporte por navio e por veículo comercial ligeiro e o tratamento de águas residuais.
- ✓ A análise de sensibilidade incidiu sobre os parâmetros com maior incerteza. Concluiu-se que a influência é muito baixa na variação do indicador da categoria de impacte alterações climáticas e eutrofização.



## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA UM TRABALHO FUTURO

### 7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A crescente utilização do recurso biomassa em processos de combustão em Portugal resulta na geração de quantidades crescentes de cinzas cuja prática atual de gestão mais comum é a deposição em aterro. Perante os impactos ambientais e económicos desta prática, são várias as alternativas de valorização existentes, assentes nos pilares da economia circular. Como visto, vários estudos encontrados na literatura demonstram que o lixiviado de cinzas de biomassa contém vários elementos químicos que podem servir como nutrientes no crescimento de plantas.

Na agricultura, a necessidade de aumentar a eficiência da aplicação dos fertilizantes, visando a redução da poluição ambiental e dos custos económicos, fomentou a criação de novas técnicas de fertilização. Uma dessas técnicas é, como visto, a fertirrigação, que utiliza a água de irrigação como método de transporte dos nutrientes até às plantas. Esta técnica é amplamente utilizada na produção de plantas hortícolas, como alfaces, na ausência de solo (hidroponia). Nesta técnica é preparada uma solução nutritiva, a partir da dissolução de fertilizantes, que irá ser assimilada pelas plantas.

Deste modo, foi levado a cabo um estudo de avaliação de impactes ambientais da valorização do lixiviado de cinzas de biomassa como fonte de nutrientes num sistema de cultivo hidropónico. Tendo em conta o objetivo deste trabalho, o plano de trabalho consistiu em várias etapas que foram referidas ao longo do texto e que aqui são recordadas em jeito de suma:

- pesquisa bibliográfica de estudos de caracterização química de cinzas de biomassa (volantes e de fundo) produzidas em Portugal Continental, incluindo testes de lixiviação. Dado que em estudos de ACV os consumos de energia elétrica tem uma contribuição significativa para os impactes ambientais totais dos sistemas, e atendendo a que nos testes de lixiviação há um consumo de energia elétrica, foi levado a cabo um teste laboratorial de lixiviação com diferentes tempos. Os resultados obtidos permitiram concluir que o tempo de lixiviação pode ser resumido a 30 minutos sem perda inoportável de rigor.
- Face à ausência de inventários de produção de espécies hortícolas por fertirrigação, foi conduzida uma análise de inventário da produção hidropónica de hortícolas, em que as informações foram obtidas, *in situ*, de uma unidade industrial, que pratica o dito método de cultivo de alfaces. Neste, foram definidos os fluxos mássicos e energéticos. Devido às falhas de informação reportadas, alguns fluxos foram excluídos (*e.g.*: fitofármacos). Foi ainda efetuado um levantamento da caracterização química dos fertilizantes usados;
- O potencial de redução do uso de fertilizantes foi calculado para dois cenários: (i) aplicação de lixiviado de cinzas de fundo e (ii) aplicação de lixiviado de cinzas volantes. Para ambos os cenários foi determinado o balanço de *inputs* e *outputs* do processo produtivo de

hortícolas. Como visto, o potencial de redução de fertilizantes para as condições estabelecidas não é muito elevado.

Para o estudo de avaliação de impactes ambientais foi utilizada a ferramenta ACV, que permitiu uma abordagem integrada dos impactes ambientais e avaliação comparativa de três cenários: o cenário convencional, onde as cinzas são depositadas em aterro e são usados exclusivamente fertilizantes na produção hidropónica de alfaces, e 2 cenários alternativos, com a valorização das cinzas (de fundo e volantes) como fonte parcial de nutrientes no plano de fertilização de alfaces. Complementarmente, foi adotada a metodologia CML 2001 *baseline* para as seguintes categorias de impacte: depleção de recursos abióticos, acidificação, alterações climáticas, formação de agentes fotoquímicos e eutrofização. A análise de inventário foi conduzida com recursos a dados do caso de estudo já referido e a dados obtidos da base de dados Ecoinvent v. 3.3 (2016), sendo a análise de sensibilidade efetuada, essencialmente, às distâncias de alguns percursos. As principais conclusões deste estudo foram:

- a produção e distribuição de eletricidade é o principal responsável pela depleção de recursos abióticos como carvão, gás natural e petróleo. Além disso, é o processo com maior emissões atmosféricas de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub>. Relativamente a substâncias eutrofizantes, a infraestrutura da estufa é a principal emissora de matéria orgânica em meios aquosos, equivalente a CQO.
- Na avaliação de impactes do ciclo de vida, a produção e distribuição de eletricidade e a infraestrutura da estufa são os elementos que mais contribuem para os indicadores globais de todas as categorias de impacte. Em contrapartida, a deposição de cinzas em aterro tem uma contribuição residual nos indicadores referidos.
- Na comparação de indicadores de categorias de impacte entre os três cenários, as diferenças revelaram ser mínimas porém, o cenário alternativo CV apresenta os menores quantitativos. Excluindo a produção e distribuição de eletricidade e o ciclo de vida da estufa, os processos com maior contribuição são a produção de nitrato de cálcio, o transporte por navio e por veículo comercial ligeiro e o tratamento de águas residuais.
- A análise de sensibilidade revelou que os parâmetros de maior incerteza apresentam uma influência muito baixa na variação dos indicadores de categorias de impacte selecionadas, i.e., alterações climáticas e eutrofização.

## 7.2 PROPOSTA DE TRABALHO FUTURO

Como já referido, a ACV da produção de hortícolas foi levada a cabo com base em informações recolhidas numa unidade industrial e ainda com recurso a dados de inventário de processos pré-determinados. Durante o processamento dos dados relativos ao inventário do ciclo de vida em cada um dos cenários, foram detetadas falhas na acessibilidade de informações técnicas e específicas, pelo que foi necessário assumir alguns pressupostos, colocando em causa a representatividade e fidedignidade do estudo. Neste contexto, sugere-se que, no desenvolvimento futuro de trabalhos semelhantes, o inventário de produção seja elaborado por um operário dedicado para o efeito, que acompanhe diariamente um processo de cultivo hidropónico de plantas hortícolas. A principal função deste operário seria a inventariação completa de todos os fluxos

associados ao processo, entre os quais os excluídos do presente estudo, como o uso de fitofármacos, geração de resíduos orgânicos e perigosos, substratos inertes, bem como aqueles que apenas puderam ser estimados, como as necessidades de água e geração de águas residuais. Para além dos fluxos, sugere-se a caracterização das águas residuais de modo a verificar a conformidade da sua rejeição nos coletores municipais.

Além da análise de inventário, a omissão de dados de processos específicos como a produção de plântulas foi outra das dificuldades encontradas na realização deste trabalho, que obrigou também ao estabelecimento de pressupostos. Posto isto, sugere-se o aumento da extensão das bases de dados existentes, com o desenvolvimentos de dados de inventários de processos específicos como o referido anteriormente.

Para a temática da lixiviação de cinzas, neste trabalho apenas foi levado a cabo um ensaio experimental a pH não-controlado. Seria importante no futuro estender este procedimento a condições de pH controlado e à escala industrial, avaliando nessas condições a qualidade da solução final resultante. O mesmo deveria ser feito com água “da torneira” e não com água destilada, no sentido de avaliar a influência da qualidade do eluato, perspetivando a implementação de lixiviações à escala industrial mais exequíveis economicamente. A influência do pré-tratamento das cinzas no processo de lixiviação poderá ser um alvo de investigação futura, tendo em mente que este pré-tratamento pode levar à criação de um fluxo secundário de material não valorizável, e que por sua vez possa igualmente necessitar do estudo de opções de valorização. Um pressuposto aplicado aos cenários alternativos foi a diminuição do tempo de lixiviação, de 24h para 30 minutos em prol da minimização das necessidades energéticas adicionais. Este foi baseado na experiência de laboratório descrita neste trabalho, para a análise de Ca e K ao longo de 24 horas de tempo de amostragem. Como outros nutrientes essenciais às plantas, como o P, podem ser encontrados no lixiviado, seria importante efetuar uma análise da concentração dos restantes nutrientes.

Quanto ao potencial de redução de fertilizantes, o uso de fertilizantes compostos comprometeu a maximização deste potencial, quer pela carência de azoto e fósforo nas cinzas e respetivo lixiviado, quer pela baixa concentração de certos elementos. Assim, é fundamental encontrar fontes destes dois elementos, nomeadamente em resíduos, para a preparação da solução de fertirrigação. Neste contexto, propõe-se o estudo da complementaridade do lixiviado de cinzas com um lixiviado de material orgânico, como por exemplo um composto resultante da estabilização (aeróbia ou anaeróbia) de matéria orgânica, e avaliar qual a composição da solução resultante da mistura dos dois lixiviados (ou carga de lixiviado orgânica máxima na mistura). Em última instância, equacionar o uso de fertilizantes simples como suplemento aos elementos em menores concentrações no lixiviado de cinzas, que permitirá uma outra flexibilidade na combinação dos fertilizantes, comparativamente ao que pôde ser feito neste trabalho.

Dois outros fatores que provavelmente terão influenciado/condicionado os resultados deste estudo são: (i) a razão volúmica de lixiviado que se admitiu integrar na solução de fertirrigação (1/100) e (ii) o rendimento da produção de alfaces registado no caso de estudo. A influência do primeiro fator deverá ser testada incrementando-o num estudo de ACV, de modo a avaliar o seu efeito nos impactes ambientais. Relativamente ao segundo fator, infere-se que para o número de alfaces produzido, os consumos de energia elétrica são significativos, e isso ficou bem patente em todas as análises de dados feitas no capítulo anterior, onde o processo da eletricidade foi sempre

um dos mais importantes. A (suposta) baixa produtividade de hortícolas justifica a importância que assume o processo “infraestrutura” em todas as categorias de impacto. Se a produtividade aumentar, a contribuição deste processo para os potenciais impactos ambientais diminuirá seguramente.

A opção de valorização de cinzas através da integração do seu lixiviado na preparação da solução nutritiva de um cultivo hidropónico levanta uma série de questões de carácter experimental que são revelantes para a viabilidade da sua implementação. Uma delas é a presença de outros elementos como o sódio, cloro e metais pesados que podem interferir negativamente na produção hidropónica de plantas hortícolas. Por conseguinte, uma proposta de caminho a seguir no desenvolvimento futuro deste tema de trabalho é a implementação de um sistema de produção de hortícolas por hidroponia à escala piloto, para analisar experimentalmente algumas situações como:

- bioacumulação de metais pesados pelas plantas, fornecidos pelo eluato;
- influência da concentração adicional de outros elementos químicos na condutividade elétrica da solução nutritiva e a resposta das plantas perante a exposição a estes elementos;
- avaliação de efeitos fitotóxicos e impacto no rendimento da produção;
- possibilidade de ocorrência de fenómenos como precipitação de certos elementos químicos e ainda a competição de nutrientes e outros elementos, na zona radicular das plantas.

De acordo com o Decreto Lei nº103/2015, de 15 de junho, as cinzas volantes da combustão de madeira não tratada podem ser utilizadas na produção de materiais fertilizantes como adubos orgânicos, adubos organominerais e ainda corretivos orgânicos. Assim, uma outra sugestão de trabalho futuro seria a análise da conformidade do uso de cinzas volantes neste tipo de fertilizantes, após o processo de lixiviação.

Para finalizar, seria recomendável uma análise económica da opção de valorização estudada neste trabalho, com vista a determinar a sua viabilidade de implementação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACERO, Authors Aitor P.; RODRÍGUEZ, Cristina; CIROTH, Andreas - **Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories**. Germany : GreenDelta, 2016
- AHMARUZZAMAN, M. - A review on the utilization of fly ash. **Progress in Energy and Combustion Science**. India. 36:3 (2010) 327–363.
- ALTHAUS, H. J. *et al.* - **Life cycle inventories of chemicals**. Ecoinvent ed. EMP Dubendorf, CH : Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007
- ALVES, Sofia *et al.* - Aplicação de cinza de biomassa na remoção de dióxido de carbono. Em BORREGO, CARLOS *et al.* (Eds.) - **10ª Conferência Nacional do Ambiente**. DAO ed. Aveiro : Universidade de Aveiro, 2013. ISBN 978-989-98673-0-7v. IV. p. 937–938.
- ANFAC - **European Motor Vehicle Parc (2009-2014)**. Madrid : Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones (ANFAC), 2014
- ARVELAKIS, S. *et al.* - Effect of leaching on the ash behavior of olive residue during fluidized bed gasification. **Biomass and Bioenergy**. Greece. 22:1 (2002) 55–69. ISSN 09619534.
- AUGUSTO, L.; BAKKER, M. R.; MEREDIEU, C. - Wood ash applications to temperate forest ecosystems - Potential benefits and drawbacks. **Plant and Soil**. France. 306:1–2 (2008) 181–198. ISSN 0032079X.
- AYALA, Sankaram; PRAKASA RAO, E. V. S. - Perspectives of soil fertility management with a focus on fertilizer use for crop productivity. **Current Science**. 82:7 (2002) 797–807. ISSN 00113891.
- BAIRD, Jack - **Sulfur as a Plant Nutrient**. USA : The North Carolina Agricultural Extension Service, 1991
- BASU, Prabir - **Combustion and Gasification in Fluidized Beds**. Halifax, Nova Scotia : CRC- Taylor & Francis Group, 2006. ISBN 9788578110796.
- BAUER, Christian; TREYER, Karin - **Electricity markets in version 3 of the ecoinvent database: modeling and results**. Villigen, Switzerland : Paul Scherrer Institute, 2013
- BLACKSHAW, Robert E.; SEMACH, Gregory; JANZEN, H. Henry - Fertilizer application method affects nitrogen uptake in weeds and wheat. **Weed Science**. Canada. 50:5 (2002) 634–641. ISSN 0043-1745.
- BRUIJN, H. DE; DUIN, R. VAN; HUIJBREGTS, M. A. J. - **Handbook on Life Cycle Assessment**. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2002. ISBN 978-1-4020-0228-1.
- CARUSO, Gianluca *et al.* - Effects of cultural cycles and nutrient solutions on plant growth, yield and fruit quality of alpine strawberry (*Fragaria vesca* L.) grown in hydroponics. **Scientia Horticulturae**. Italy. 129:3 (2011) 479–485. ISSN 03044238.
- CELPA - **Boletim Estatístico**. Lisboa : Associação da Indústria Papeleira, 2014
- CHAMBERS, B. J.; SMITH, K. A.; PAIN, B. F. - Strategies to encourage better use of nitrogen in animal manures. **Soil Use and Management**. UK. 16:TOC (2000) 157–161.
- CHAN-NAVARRETE, Rafael *et al.* - Genetic diversity for nitrogen use efficiency in spinach (*Spinacia Oleracea* L.) cultivars using the ingestad model on hydroponics. **Euphytica**. The Netherlands. 199:1–2 (2014) 155–166. ISSN 15735060.

- COELHO, Ana Margarida Santiago L. - **Gestão de Cinzas produzidas em centrais de cogeração operadas com biomassa**. Aveiro : Universidade de Aveiro, 2010 Dissertação de mestrado.
- CONOSUL - **ConoSul Hydroponics Representações®** [Em linha], atual. 2012. [Consult. 24 nov. 2016]. Disponível em WWW:<URL:www.conosul.com.br/wp-content/uploads/2014/11/hidroponia2.jpg>.
- CUNHA, João - **Manual de Solos e Fertilização**. Lisboa : Ministério da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e Pescas, 2007
- DAHL, Olli *et al.* - Comparison of the characteristics of bottom ash and fly ash from a medium-size (32 MW) municipal district heating plant incinerating forest residues and peat in a fluidized-bed boiler. **Fuel Processing Technology**. Finland. 90:2009) 871–878. ISSN 03783820.
- Decreto-Lei nº 73/2011. **Diário da República n.º 116, Série I de 17 de Junho de 2011** (11- 3251–3300).
- Decreto-Lei nº 276/2009. **Diário da República nº 192, Série I de 2 de Outubro de 2009**. (09- 7154–7165).
- DEMEYER, A.; VOUNDI NKANA, J. C.; VERLOO, M. G. - Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: An overview. **Bioresource Technology**. Belgium. 77:3 (2001) 287–295. ISSN 09608524.
- DEMIRBAS, Ayhan - Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**. Turkey. 30:2 (2004) 219–230. ISSN 03601285.
- DIAS, André Diogo Costa Messias - **Estudo da valorização de cinzas de biomassa na produção de materiais para a construção de recifes artificiais**. Lisboa : Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, 2011 Dissertação de mestrado.
- DOKA, Gabor - **Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services**. Dübendorf : Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2009
- DOKA, Gabor - **Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services - Part IV «Wastewater treatment»**. Dübendorf : Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2009
- EASTERWOOD, G. W. - Calcium's Role In Plant Nutrition. **Fluid Jornal**. Winter:2002) 3.
- ESPERANÇA, Erica - **Serviços ecossistémicos de um campo agrícola: efeitos da fertilização**. Aveiro : Universidade de Aveiro, 2013 Dissertação de mestrado.
- ETIÉGNI, L.; CAMPBELL, A. G. - Physical and chemical characteristics of wood ash. **Bioresource Technology**. Idaho, USA. 1991) 173–178.
- FANG, Xiang; JIA, Li - Experimental study on ash fusion characteristics of biomass. **Bioresource Technology**. China. 104:2012) 769–774. ISSN 09608524.
- FLORENCIO, Lourdinha; BASTOS, Rafael Kopschitz Xavier; AISSE, Miguel Mansur - **Reúso Das Águas De Esgoto Sanitário**. Rio de Janeiro : PROSAB, 2006
- FREIRE, Márcia; LOPES, Helena; TARELHO, Luís A. C. - Critical aspects of biomass ashes utilization in soils: Composition, leachability, PAH and PCDD/F. **Waste Management**. Portugal. 46:2015) 304–315. ISSN 18792456.
- FURLANI, P. R. - **Instruções para o cultivo de hortaliças de folhas pela técnica de hidroponia - NFT**.



Campinas : Instituto Agronômico, 1998

FURLANI, P. R. *et al.* - **Cultivo hidropônico de plantas**. Campinas : Instituto Agronômico, 1999

GEROMEL, Nelson - **Técnicas de Hidroponia**. Brasil : Geronet Services, 2015

GRAMMELIS, P. *et al.* - Effects of biomass co-firing with coal on ash properties. Part II: Leaching, toxicity and radiological behaviour. **Fuel**. Greece. 85:16 (2006) 2316–2322. ISSN 00162361.

GRAMMELIS, Panagiotis - **Solid Biofuels for Energy: A lower Greenhouse Gas Alternative**. Athens, Greece, 1st : Springer, 2011. ISBN 978-1-84996-392-3.

GREENDELTA - **OpenLCA Nexus database** [Em linha], atual. 2016. [Consult. 27 out. 2016]. Disponível em WWW:<URL:https://nexus.openlca.org/>.

HAGIN, J.; SNEH, M.; LOWENGART-AYCICEGI, A. - **Fertigation: Fertilization through Irrigation**. Switzerland : International Potash Institute, 2002

HAROLD F. REETZ, Jr. - **Fertilizers and their Efficient Use**. First ed. Paris : International Fertilizer Industry Association, 2016. ISBN 979-10-92366-04-4.

HEBBAR, S. S. *et al.* - Studies on NPK drip fertigation in field grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). **European Journal of Agronomy**. India. 21:1 (2004) 117–127. ISSN 11610301.

HEIJUNGS, R. *et al.* - **Environmental Life Cycle Assessment of Products - Vol1: Guide**. Leiden : Centre of Environmental Science, 1992

HISCHIER, R. - Life Cycle Inventories of Packaging and Graphical Paper. **Ecoinvent 3.3 dataset documentation**. Europe. 11:2007) 3.

HUANG, Min *et al.* - **Market Analysis of Hydroponic Lettuce in the Nashville Region**. Nashville : University of Tennessee, 2002

HUIJBREGTS, Mark - **Life-cycle impact assessment of acidifying and eutrophying air pollutants**. The Netherlands : Interfaculty Department of Environmental Science, University of Amsterdam, 1999

HULTBERG, Malin; CARLSSON, Anders S.; GUSTAFSSON, Susanne - Treatment of drainage solution from hydroponic greenhouse production with microalgae. **Bioresource Technology**. Sweden. 136:2013) 401–406.

IFA; UNEP - **Mineral Fertilizer Use and the Environment**. Revised ed. Paris : International Fertilizer Industry Association, 2000. ISBN 2950629938.

IFDC; UNIDO - **Fertilizer Manual**. IFDC ed. USA : Kluwer Academic Publishers, 1996. ISBN 0-7923-5032-4.

INFOMINE RESEARCH GROUP - **Calcium nitrate market research in the CIS**. Europe : Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2011

INGERSLEV, Morten *et al.* - Element budgets of forest biomass combustion and ash fertilisation - A Danish case-study. **Biomass and Bioenergy**. Denmark. 35:7 (2011) 2697–2704. ISSN 09619534.

INGERSLEV, Morten *et al.* - Effects of wood chip ash fertilization on soil chemistry in a Norway spruce plantation on a nutrient-poor soil. **Forest Ecology and Management**. Denmark.

- 334:2014) 10–17. ISSN 03781127.
- INOXPA - **Website** [Em linha], atual. 2016. [Consult. 17 out. 2016]. Disponível em WWW:<URL:http://www.inoxpa.pt/produtos/produto/agitador-vertical-bci>.
- ISO - **ISO 14044:2006 - Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines.** [Em linha], atual. 2006. [Consult. 20 nov. 2016]. Disponível em WWW:<URL:https://www.iso.org>.
- ISO - **ISO 14044:2006 - Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework** [Em linha], atual. 2006. [Consult. 20 nov. 2016]. Disponível em WWW:<URL:https://www.iso.org>.
- ITTEN, René *et al.* - **Life Cycle Inventories of Electricity Mixes and Grid.** Usher : Paul Scherrer Institute (PSI), 2014
- JENKINS, B. .. *et al.* - Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology.** USA. 54:1–3 (1998) 17–46. ISSN 03783820.
- KAFKAFI; TARCHITZKY - **Fertigation: A tool for Efficient Fertilizer and Water Management.** 1st. ed. Paris, France : IFA;IPI, 2011. ISBN 978-2-9523139-8-8.
- KALEEM ABBASI, M.; SHAH, Zahir; ADAMS, W. A. - Effect of the nitrification inhibitor nitrapyrin on the fate of nitrogen applied to a soil incubated under laboratory conditions. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science.** Pakistan. 166:4 (2003) 513–518.
- KETTERINGS, Quirine M.; REID, Shaw; RAO, Renuka - Cation Exchange Capacity (CEC). **Cornell University Cooperative Extension.** New York. 2007) 1–2.
- KHAN, A. A. A. *et al.* - Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. **Fuel Processing Technology.** The Netherlands. 90:1 (2009) 21–50. ISSN 03783820.
- KOCH, Peter *et al.* - **AGRIBALYSE® : Rapport methodologique - Version 1.2.** ADEME ed. France : Angers, 2015
- KOPPEJAN, Jaap; LOO, Sjaak VAN - **Handbook of Biomass Combustion & Co-firing.** 1st. ed. London : Earthscan, 2008. ISBN 978-1-84407-1.
- LAL, R. - Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma.** USA. 123:1–2 (2004) 1–22. ISSN 00167061.
- LEE, Jun Gu; LEE, Byoung Yil; LEE, Hee Jae - Accumulation of phytotoxic organic acids in reused nutrient solution during hydroponic cultivation of lettuce (*Lactuca sativa* L.). **Scientia Horticulturae.** Korea. 110:2 (2006) 119–128. ISSN 0304-4238.
- LIANG, Qiong *et al.* - Effects of 15 years of manure and inorganic fertilizers on soil organic carbon fractions in a wheat-maize system in the North China Plain. **Nutrient Cycling in Agroecosystems.** China. 92:1 (2012) 21–33. ISSN 13851314.
- LIETEN, P. *et al.* - Recent situation of strawberry substrate culture in Europe. **Acta Horticulturae.** Leuven, Belgium. 649 (2004) 193–196.
- LIND, Terttaliisa *et al.* - Ash formation mechanisms during combustion of wood in circulating fluidized beds. **Proceedings of the Combustion Institute.** Belgium. 28:2 (2000) 2287–2295. ISSN 15407489.

- LUCAS, R. E.; DAVIS, J. F. - Relationships between pH values of organic soils and availabilities of 12 plants nutrients. **Soil Science**. USA. 92:3 (1961). ISSN 0038-075X.
- MAASWINKEL, R. H. M.; WELLES, G. W. H. - Factors influencing glassiness in lettuce. **Netherlands Journal of Agricultural Science (Netherlands)**. Netherlands. 1986). ISSN 0028-2928.
- MACKOWIAK, C. L. *et al.* - Comparison of aerobically-treated and untreated crop residue as a source of recycled nutrients in a recirculating hydroponic system. **Advances on Space Research**. USA. 18:1-2 (1996) 281-287. ISSN 02731177.
- MALAVOLTA, Eurípedes - **Elementos de nutrição mineral de plantas**. Agronômica ed. [S.l.] : Agronômica Ceres, 1980. ISBN 8531800196.
- MARQUES, Fernandes - **Relatório - Grupo de Trabalho da Biomassa**. 1st. ed. Lisboa : Comissão de Agricultura e Mar, 2013. ISBN 978-972-556-613-8.
- MARSCHNER, Horst.; MARSCHNER, Petra. - **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3rd. ed. Germany : Academic Press, Londres, 1995. ISBN 9780123849052.
- MARTINEZ HERNANDEZ, J. J.; BAR-YOSEF, B.; KAFKAFI, U. - Effect of surface and subsurface drip fertigation on sweet corn rooting, uptake, dry matter production and yield. **Irrigation Science**. Israel. 12:3 (1991) 153-159. ISSN 0342-7188.
- MARTIRENA, Fernando *et al.* - Rudimentary, low tech incinerators as a means to produce reactive pozzolan out of sugar cane straw. **Cement and Concrete Research**. Cuba. 36:6 (2006) 1056-1061. ISSN 00088846.
- MASARIRAMBI, Michael T. *et al.* - Effects of chicken manure on growth , yield and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L .) «Taina» under a lath house in a semi-arid sub-tropical environment. **American-Eurasian Journal Agricultural & Environmental Science**. Swaziland. 12:3 (2012) 399-406. ISSN 1818-6769.
- MASIÁ, A. A. T. *et al.* - Use of TMA to predict deposition behaviour of biomass fuels. **Fuel**. Netherlands. 86:15 (2007) 2446-2456. ISSN 00162361.
- MAVROGIANOPOULOS, G.; VOGLI, V.; KYRITSIS, S. - Use of wastewater as a nutrient solution in a closed gravel hydroponic culture of giant reed (*Arundo donax*). **Bioresource Technology**. Greece. 82:2 (2002) 103-107. ISSN 09608524.
- MCKENDRY, Peter - Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. **Bioresource Technology**. United Kingdom. 83:1 (2002) 37-46. ISSN 09608524.
- MODELO, Regina - **Valorização de resíduos sólidos da indústria de celulose e papel**. Aveiro : Universidade de Aveiro, 2014 Dissertação de doutoramento.
- MORARD, P.; SILVESTRE, J. - Plant injury due to oxygen deficiency in the root environment of soilless culture: A review. **Plant and Soil**. France. 184:1996) 243-254. ISSN 0032-079X.
- MORARD, Philippe; LACOSTE, Ludovic; SILVESTRE, Jérôme - Effect of oxygen deficiency on uptake of water and mineral nutrients by tomato plants in soilless culture. **Journal of Plant Nutrition**. France. 23:8 (2000) 1063-1078. ISSN 0190-4167.
- MORRIS, Michael *et al.* - Fertilizer use in african agriculture. Lessons learned and good practice guidelines. **Experimental Agriculture**. Washington. 44:1 (2007) 162. ISSN 0014-4797.
- MOZAFAR, A. - Nitrogen Fertilizers and the Amount of Vitamins in Plants: a Review. **Journal of Plant Nutrition**. Switzerland Version. 16:12 (1993) 2479-2506. ISSN 0190-4167.

- MÓZNER, Zsófia; TABI, Andrea; CSUTORA, Mária - Modifying the yield factor based on more efficient use of fertilizer - The environmental impacts of intensive and extensive agricultural practices. **Ecological Indicators**. Budapest. 16:2012) 58–66. ISSN 1470160X.
- NARODOSLAWSKY, M.; OBERNBERGER, I. - From waste to raw material - The route from biomass to wood ash for cadmium and other heavy metals. **Journal of Hazardous Materials**. Austria. 50:2–3 (1996) 157–168. ISSN 03043894.
- NEMECEK, Thomas; KAGI, Thomas - **Life Cycle Inventories of Swiss and European Agricultural Production Systems**. Zurich and Dübendorf, CH : Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007
- NORDGREN, Daniel *et al.* - Ash transformations in pulverised fuel co-combustion of straw and woody biomass. **Fuel Processing Technology**. Sweden. 2013) 52–58. ISSN 03783820.
- NUTRISAFRA - **Nutrisafra Fertilizantes, Ltda** [Em linha], atual. 2013. [Consult. 7 nov. 2013]. Disponível em WWW:<URL:http://www.nutrisafra.com.br/>.
- OBERNBERGER, Ingwald *et al.* - Concentrations of inorganic elements in biomass fuels and recovery in the different ash fractions. **Biomass and Bioenergy**. Austria. 12:3 (1997) 211–224. ISSN 09619534.
- OBERNBERGER, Ingwald; BRUNNER, Thomas; BÄRNTHALER, Georg - Chemical properties of solid biofuels-significance and impact. **Biomass and Bioenergy**. Austria. 30:11 (2006) 973–982. ISSN 09619534.
- OBERNBERGER, Ingwald; SUPANCIC, Klaus - Possibilities of ash utilisation from biomass combustion plants. **Proceedings of the 17th European Biomass Conference & Exhibition**. Italy. 2009) 12.
- ODLARE, Monica; PELL, Mikael - Effect of wood fly ash and compost on nitrification and denitrification in agricultural soil. **Applied Energy**. Sweden. 86:1 (2009) 74–80. ISSN 03062619.
- OHSE, Silvana *et al.* - Quality of Lettuce Cultivars Grown in Hydroponic Solution. **Scientia**. Brasil. 2001) 181–185. ISSN 0103-9016.
- PADOVA, Claudir; OLIVEIRA, Jorge (Centro Ciências Agrárias) - **Hidroponia: Produção Alternativa de Hortaliças Folhosas**. Florianópolis : Universidade Federal de Santa Catarina, 2000 Relatório de estágio curricular.
- PARK, Byung Bae *et al.* - Wood ash effects on plant and soil in a willow bioenergy plantation. **Biomass and Bioenergy**. New York. 28:4 (2005) 355–365. ISSN 09619534.
- PARK, J. B. K.; CRAGGS, R. J.; SUKIAS, J. P. S. - Removal of nitrate and phosphorus from hydroponic wastewater using a hybrid denitrification filter (HDF). **Bioresource Technology**. New Zealand. 100:13 (2009) 3175–3179. ISSN 09608524.
- Diretiva 2008/98/CE. **Jornal Oficial da União Europeia, de 19 de Novembro de 2008** (08- 3–30).
- PINTO, João - **Características da cinza de combustão de biomassa em leito fluidizado**. Aveiro : Universidade de Aveiro, 2011 Dissertação de mestrado.
- POTRICH, Ani; PINHEIRO, Renes; SCHMIDT, Denise - Alface hidropónica como alternativa de produção de alimentos de forma sustentável. **Enciclopédia Biosfera**. Brasil. 8:15 (2012) 36–48. ISSN 1098-6596.

- QUIMGRA S.A - **História** [Em linha], atual. 2016. [Consult. 6 dez. 2016]. Disponível em WWW:<URL:http://www.quimgra.com/historia.html>.
- RAUN, William R. *et al.* - Improving Nitrogen Use Efficiency in Cereal Grain Production with Optical Sensing and Variable Rate Application. **Agronomy Journal**. USA. 94:4 (2002) 815–820. ISSN 0002-1962.
- RAUTARAY, S. K.; GHOSH, B. C.; MITTRA, B. N. - Effect of fly ash, organic wastes and chemical fertilizers on yield, nutrient uptake, heavy metal content and residual fertility in a rice-mustard cropping sequence under acid lateritic soils. **Bioresource Technology**. India. 90:3 (2003) 275–283. ISSN 09608524.
- RESH, H. M. - **Cultivos hidropónicos: nuevas técnicas de producción**. [S.l.] : Mundi-Prensa, 1997. ISBN 9788471146410.
- RESINORTE - **RESINORTE - Valorização e tratamento de resíduos sólidos, S. A.** [Em linha], atual. 2016. Disponível em WWW:<URL:http://resinorte.pt/appt/empresa>.
- Plano Energético 2020. **Diário da República n.º 73 , 1ª série de 15 de Abril de 2010**
- RIBBING, C. - Environmentally friendly use of non-coal ashes in Sweden. **Waste Management**. Sweden. 27:10 (2007) 1428–1435. ISSN 0956053X.
- RIBEIRO, João - **Aplicação de Cinza de Biomassa no Solo: Estudo do Perfil e Lixiviado**. Aveiro : Universidade de Aveiro, 2013 Dissertação de mestrado.
- RICE, E. L. - **Allelopathy**. 2nd. ed. USA : Universidade de Minnesota, 1984. ISBN 9780125870559.
- RODDY, E. - **Fertigation Fertilizer Sources** [Em linha], atual. 2006. Disponível em WWW:<URL:www.omafra.gov.on.ca/english/crops/hort/news/vegnews/2006/vg0406a2.htm>.
- SÁ, Sara *et al.* - Gestão de cinzas de biomassa e avaliação do potencial fertilizante. Em BORREGO, CARLOS *et al.* (Eds.) - **10ª Conferência Nacional do Ambiente**. DAO ed. Aveiro : Universidade de Aveiro, 2013. ISBN 978-989-98673-0-7. p. 398–403.
- SAARSALMI, Anna *et al.* - 30-Year effects of wood ash and nitrogen fertilization on soil chemical properties, soil microbial processes and stand growth in a Scots pine stand. **Forest Ecology and Management**. Finland. 278:2012) 63–70. ISSN 03781127.
- SAIDUR, R. *et al.* - A review on biomass as a fuel for boilers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Malaysia. 15:5 (2011) 2262–2289. ISSN 13640321.
- SALUNKHE, D. K.; DESAI, B. B. - Effects of agricultural practices, handling, processing and storage on vegetables. Em KARMAS, ENDEL; ROBERT, S.HARRIS (Eds.) - **Nutritional Evaluation of Food Processing**. 1st. ed. New York : Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1988. p. 23–71.
- SCHMITT, Michael; REHM, George - **Potassium for Crop Production** [Em linha]. [S.l.] : University of Minnesota, 2002, atual. 2002. [Consult. 23 nov. 2016]. Disponível em WWW:<URL:http://www.extension.umn.edu/agriculture/nutrient-management/potassium/potassium-for-crop-production/>.
- SCHWARTZKOPF, Carl - Potassium, Calcium, Magnesium - How They Relate to Plant Growth. **USGA green section**. USA. 1972).
- SHELDRIK, William F.; SYERS, J.Keith; LINGARD, John - A conceptual model for conducting nutrient

- audits at national, regional, and global scales. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**. 62:1 (2002) 61–72. ISSN 1573-0867.
- SILVA, David Filipe Ramos - **Valorização das cinzas de combustão de biomassa na calagem e reciclagem de nutrientes no solo** [Em linha]. Aveiro : Universidade de Aveiro, 2016, atual. 2016. [Consult. 23 nov. 2016]. Disponível em WWW:<URL:http://hdl.handle.net/10773/16299>.
- SILVA, David; TARELHO, Luís; FIGUEIREDO, José - Estudo da variabilidade das características das cinzas produzidas numa central termoelétrica a biomassa. Em BORREGO, CARLOS *et al.* (Eds.) - **10ª Conferência Nacional do Ambiente**. DAO ed. Aveiro : Universidade de Aveiro, 2013. ISBN 978-989-98673-0-7. p. 945–946.
- SNE, M. *et al.* - **Guidelines for planning and design of micro irrigation in arid and semi-arid regions**. New Delhi, India : International Commission on Irrigation and Drainage, 2006. ISBN 8189610090 9788189610098.
- SONNEVELD, C.; VOOGT, W. - Response of tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) to an unequal distribution of nutrients in the root environment. **Plant and Soil**. The Netherlands. 124:2 (1990) 251–256. ISSN 0032079X.
- SONNEVELD, Cees; VOOGT, Wim - **Plant Nutrition of Greenhouse Crops**. Netherlands : Springer, 2009. ISBN 9788578110796.
- SPARKS, D. L. - **Potassium Dynamics in Soils**. New York : Springer-Verlag, 1987. ISBN 978-1-4612-9112-1.
- SPIELMANN, Michael *et al.* - **Transport Services, v2.0**. Dübendorf : Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007
- SQM - **Annual Report**. Chile : Sociedad Química y Minera de Chile S.A., 2015
- SQM - **Informação por nutrientes** [Em linha]. [S.l.] : Sociedad Química y Minera de Chile S.A., 2016, atual. 2016. [Consult. 30 ago. 2016]. Disponível em WWW:<URL:http://www.sqm.com/en-us/productos/nutricionvegetaldeespecialidad/informacionpornutrientes>.
- STANKOWSKI, S.; MACIOROWSKI, R.; GIBCYNSKA, M. - The biomass ash. Waste or useful by-product? **Ashes from TPPs: removal, transport, processing, landfilling**. Moscow. 2012) 200–203.
- STOORVOGEL, J. J.; SMALING, E. M. A.; WINDMEIJER, P. N. - Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales. **Fertilizer Research**. 35:3 (1993) 227–235. ISSN 01671731.
- TARELHO, L. A. C. *et al.* - Treatment by leaching of bottom bed ash from biomass combustion in bubbling fluidized bed. **Ash 2012**. Stockholm, Sweden. 2012) 10.
- TARELHO, L. A. C. *et al.* - Characteristics of distinct ash flows in a biomass thermal power plant with bubbling fluidised bed combustor. **Energy**. Aveiro. 90:2015) 387–402. ISSN 03605442.
- TARELHO, Luís *et al.* - **Caraterísticas das cinzas produzidas durante a combustão de biomassa e opções para a sua valorização**. DAO ed. Aveiro, Portugal : Universidade de Aveiro, 2013. ISBN 978-989-98673-0-7.
- TEIXEIRA, E. R. - Characterization of Bottom Ashes From Forest Biomass Combustion in Fluidized Bed. **Internation Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation**. Porto.

2012).

- THEIS, Mischa *et al.* - Fouling tendency of ash resulting from burning mixtures of biofuels. Part 3. Influence of probe surface temperature. **Fuel**. 85:14–15 (2006) 2002–2011. ISSN 00162361.
- THY, P. *et al.* - High temperature elemental losses and mineralogical changes in common biomass ashes. **Fuel**. 85:5–6 (2006) 783–795. ISSN 00162361.
- TILMAN, David *et al.* - Agricultural sustainability and intensive production practices. **Nature**. 418:6898 (2002) 671–7.
- TORTOSA MASIÁ, A. A. *et al.* - Characterising ash of biomass and waste. **Fuel Processing Technology**. 88:11–12 (2007) 1071–1081. ISSN 03783820.
- TRAZZI, P. A.; CALDEIRA, M. V. W.; COLOMBI, Rogério - Animal manure on substrate for forest seedling production: physical and chemical attributes. **Scientia Forestalis**. Piracicaba. 2012) 455–462. ISSN 1413-9324.
- TUDOHIDROPONIA - **E-book** [Em linha], atual. 2016. [Consult. 8 out. 2016]. Disponível em WWW:<URL:http://tudohidroponia.net/nft-um-tipo-de-hidroponia/>.
- URRESTARAZU, Miguel; MAZUELA, Pilar Carolina - Effect of slow-release oxygen supply by fertigation on horticultural crops under soilless culture. **Scientia Horticulturae**. 106:4 (2005) 484–490. ISSN 03044238.
- VAMVUKA, D.; KAKARAS, E. - Ash properties and environmental impact of various biomass and coal fuels and their blends. **Fuel Processing Technology**. 92:3 (2011) 570–581. ISSN 03783820.
- VASSILEV, Stanislav V. *et al.* - An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**. 89:5 (2010) 913–933. ISSN 00162361.
- VASSILEV, Stanislav V. *et al.* - An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification. **Fuel**. 105:2013) 40–76. ISSN 00162361.
- VICENTE, José *et al.* - **Análise de ciclo de vida dos produtos**. Viseu : Instituto Politécnico de Viseu, 2004
- VOLVO - **Emissions from Volvo's trucks** [Em linha]. [S.l.] : Volvo Truck Corporation, 2010, atual. 2010. [Consult. 20 nov. 2016]. Disponível em WWW:<URL:http://www.volvotrucks.com/SiteCollectionDocuments/VTC/Corporate/About us/Environment-2012/Emis\_eng\_20640\_10005.pdf>.
- VOOGT, W.; SONNEVELD, C. - Interactions between nitrate and chloride in nutrient solutions for substrate grown tomato. **Proceedings of the IS on Growing Media and Hydroponics**. Leuven. 644:2004) 359–368.
- WERKELIN, Johan *et al.* - Ash-forming elements in four Scandinavian wood species part 3: Combustion of five spruce samples. **Biomass and Bioenergy**. 35:1 (2011) 725–733. ISSN 09619534.
- WISELOGEL, A. E. *et al.* - Compositional changes during storage of large round switchgrass bales. **Bioresource Technology**. 56:1 (1996) 103–109. ISSN 09608524.
- WOOD, C. W.; MULLINS, G. L.; HAJEK, B. F. - **Phosphorous in Agriculture**. USA : Soil Quality Institute, 2003

- YARA - **Yara sells holding in SQM** [Em linha]. [S.l.] : Yara International S.A., 2016, atual. 2016. [Consult. 20 out. 2016]. Disponível em WWW:<URL:http://yara.com/about/history/2004\_2005/new\_deal\_with\_chiles\_sqm.aspx>.
- YARA - **Yara's production sites** [Em linha], atual. 2016. Disponível em WWW:<URL:http://yara.com/about/production\_sites/>.
- YIN, Chungen; ROSENDAHL, Lasse A.; KÆR, Søren K. - Grate-firing of biomass for heat and power production. **Progress in Energy and Combustion Science**. 34:6 (2008) 725–754. ISSN 03601285.
- YU, J. Q.; MATSUI, Y. - Phytotoxic Substances in Root Exudates of Cucumber (*Cucumis sativus* L.). **Journal of Chemical Ecology**. 20:1 (1994) 21–31. ISSN 0098-0331.
- YU, Jing Quan; MATSUI, Yoshihisa - Extraction and Identification of Phytotoxic Substances Accumulated in Nutrient Solution for the Hydroponic Culture of Tomato. **Soil Science and Plant Nutrition**. 39:4 (1993) 691–700. ISSN 0038-0768.
- YU, Qijun *et al.* - Reaction between rice husk ash and Ca(OH)<sub>2</sub> solution and the nature of its product. **Cement and Concrete Research**. 29:1 (1999) 37–43. ISSN 00088846.
- ZERONI, Moshe; GALE, Joseph; BEN-ASHER, Jiftah - Root aeration in a deep hydroponic system and its effect on growth and yield of tomato. **Scientia Horticulturae**. 19:3–4 (1983) 213–220. ISSN 03044238.
- ZEVENHOVEN-ONDERWATER, M. *et al.* - The ash chemistry in fluidised bed gasification of biomass fuels. Part I: Predicting the chemistry of melting ashes and ash-bed material interaction. **Fuel**. 80:10 (2001) 1489–1502. ISSN 00162361.
- ZONTA, Everaldo - Produção de cultivares de tomateiro em hidroponia e fertirrigação sob razões de nitrogênio e potássio. **Horticultura Brasileira**. 28:4 (2010) 446–452. ISSN 01020536.



## ANEXOS

### ANEXO A

Anexo A.1 - Caracterização do resíduo de oliveira lixiviada e não lixiviada (Arvelakis et al., 2002)

		Resíduo de oliveira	Resíduo de oliveira lixiviada
Análise imediata [% m, bs]	Humidade	5,5	7,83
	Cinzas	4,6	2,43
	Voláteis	76	78,5
	Carbono Fixo	19,4	19,07
Análise elementar [% m, bs]	C	50,7	54,05
	H	5,89	5,8
	O	36,97	35,49
	N	1,36	1,9
	S	0,3	0,3
	Cl	0,18	0,03

## ANEXO B

Anexo B.1 - Composição de alguns tipos de combustíveis de biomassa e respetivas cinzas (adaptado de Basu (2006); Zevenhoven-Onderwater *et al.*, 2001).

	Unidades	Combustível				
		Casca de arroz	Resíduos de Madeira	Pó de serragem	Resíduos Florestais	Eucalipto
<b>Poder calorífico</b>	MJ/kg, bs	16,2	20,14	20	-	-
<b>Humidade</b>	% m	9,7	14,2	53,9	29,6	7,3
<b>Sólidos voláteis</b>	-	66	79,1	39,19	-	-
<b>Análise elementar [%m, bssc]</b>						
<b>C</b>	-	40,2	49	50,6	48,2	48,83
<b>H</b>	-	5	5,9	6	6	6
<b>O</b>	-	36,3	40,7	42,78	44,57	44,06
<b>N</b>	-	0,3	2,5	0,2	-	-
<b>S</b>	-	0,05	0,05	0,01	0,02	0,02
<b>Cl</b>	-	0,1	0,03	0,01	0,01	0,1
<b>Cinzas</b>	-	18,2	1,9	0,41	1,2	0,95
<b>Composição [% m, bs]</b>		<b>Cinzas</b>				
<b>SiO<sub>2</sub></b>	-	89	32	4,9	2,77	2,82
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	-	0,41	6,2	0,93	0,68	0,27
<b>TiO<sub>2</sub></b>	-	-	14	0,2	-	-
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	-	0,25	2,8	1,3	0,38	0,94
<b>CaO</b>	-	0,75	17	32	28,6	59,47
<b>MgO</b>	-	0,43	2,7	4,8	6,7	5,79
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	-	0,06	2,8	2,4	0,92	3,4
<b>K<sub>2</sub>O</b>	-	2,2	4,7	8,7	23,9	10,67
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	-	-	6,3	-	11,6	3,53
<b>SO<sub>3</sub></b>	-	0,49	-	19	-	-