



Avaliação do Ciclo de Vida
Aula 7 – Modelação III
14 Dezembro 2022



Modelos de inventário

Modelo “Alocação, corte por classificação”

Filosofia subjacente a esta abordagem:

- as consequências ambientais da produção primária (a primeira) de um material são sempre alocadas ao utilizador principal desse material.
 - se o material for reciclado, o produtor primário não recebe nenhum crédito pelo fornecimento de quaisquer materiais recicláveis.
- ⇒ **materiais recicláveis** estão disponíveis sem carga ambiental para os processos de reciclagem,
- ⇒ **materiais secundários** (reciclados) carregam apenas as cargas ambientais dos processos de reciclagem



Modelo “Alocação no ponto de substituição”

Modelo “Alocação no ponto de substituição”

Filosofia subjacente ao modelo APOS:

- a **responsabilidade ambiental** sobre os resíduos gerados é **compartilhada** entre **produtores** e subsequentes **utilizadores** que beneficiam dos processos de tratamento usando os produtos de valor neles originados.
- Este modelo usa a **expansão do sistema** de produto(s) para **evitar a alocação** dentro dos **sistemas de tratamento**.
- esta abordagem baseia-se portanto no princípio de que **a alocação no fim da vida**, ou seja, nas atividades de tratamento, **deve ser evitada**.



Modelo “Alocação no ponto de substituição”

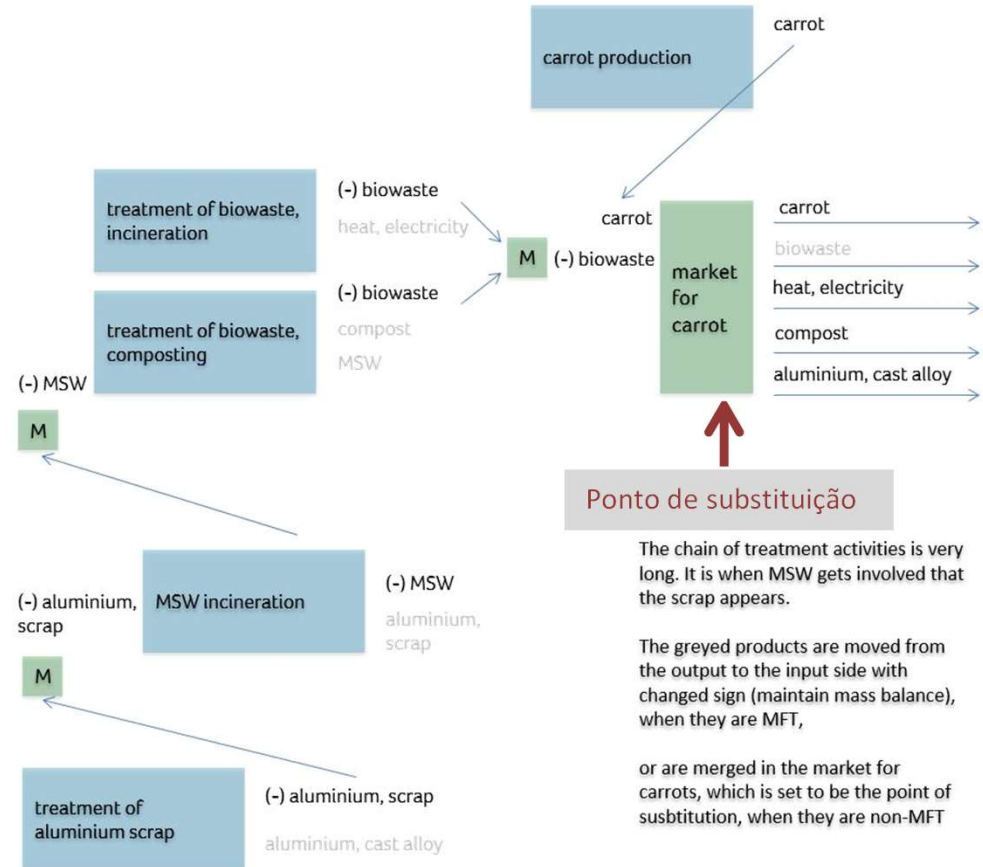
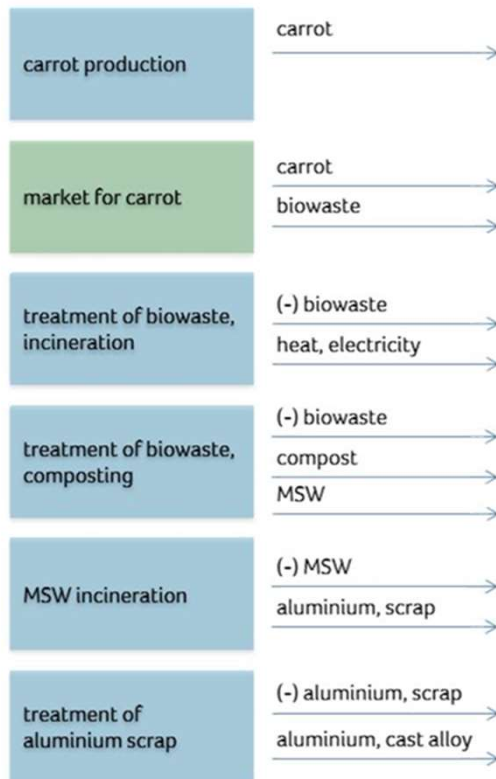
Nomenclatura utilizada para a classificação de resíduos:

- **material para tratamento (mft)**
 - cada **atividade** que **produz** um **produto** que requer **tratamento** adicional antes de adquirir valor económico, é **considerada em conjunto** com todas as **atividades de tratamento** necessárias para esse produto **em um único sistema**.
 - As trocas da atividade de **produção** e as das atividades de **tratamento** são então **alocadas** para **todos os diferentes subprodutos com valor no sistema** (tanto das atividades de produção quanto das atividades de tratamento).
 - O **ponto de substituição** reside na primeira atividade da cadeia de abastecimento, a jusante da atividade de tratamento (ou de reciclagem) que produz um produto com valor económico.

Modelo “Alocação no ponto de substituição”

Why do I have carrots on my recycled aluminium?

Estas são as atividades envolvidas, os seus produtos de referência e subprodutos



Ponto de substituição

The chain of treatment activities is very long. It is when MSW gets involved that the scrap appears.

The greyed products are moved from the output to the input side with changed sign (maintain mass balance), when they are MFT,

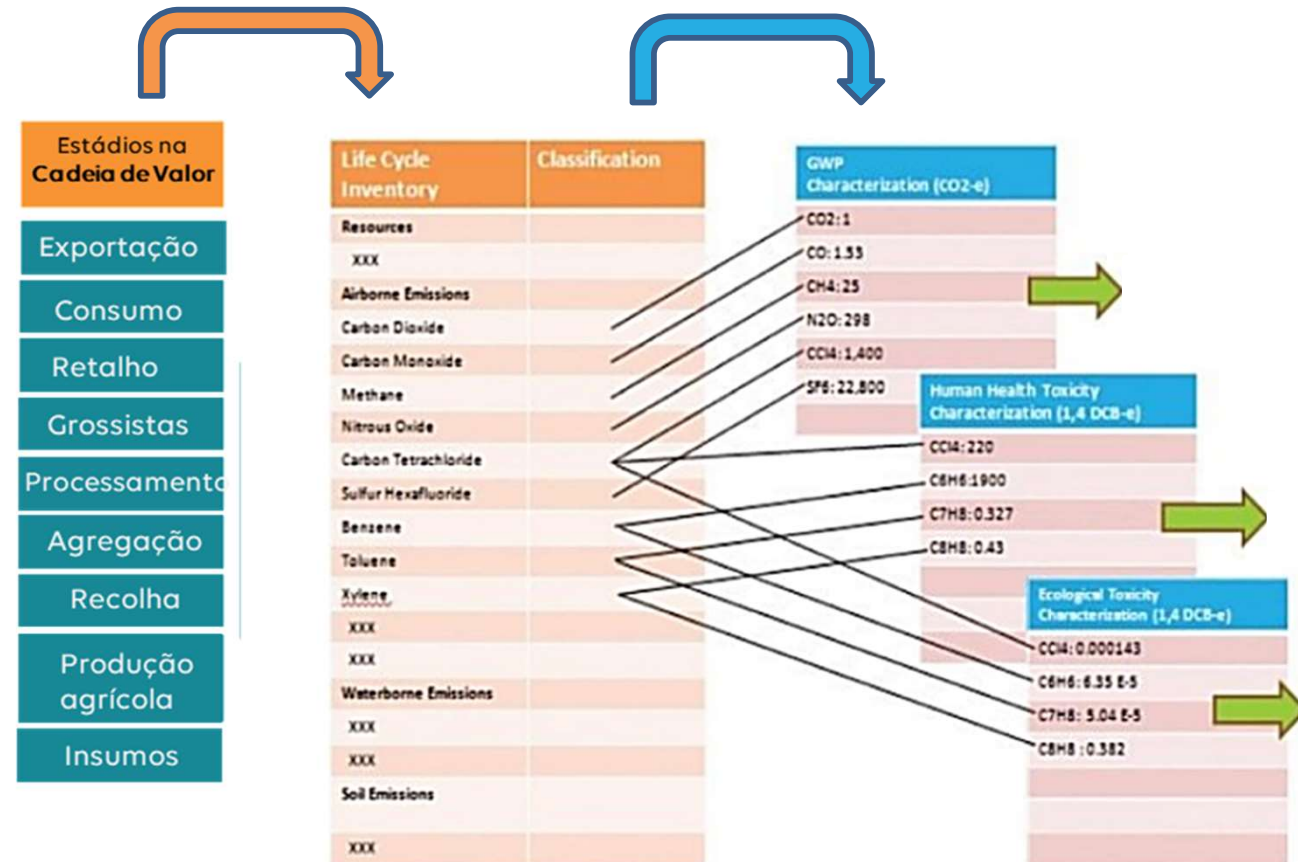
or are merged in the market for carrots, which is set to be the point of substitution, when they are non-MFT

M Note: for sake of readability, this symbol is used to represent intermediate markets

Componente 2: Construção do Inventário

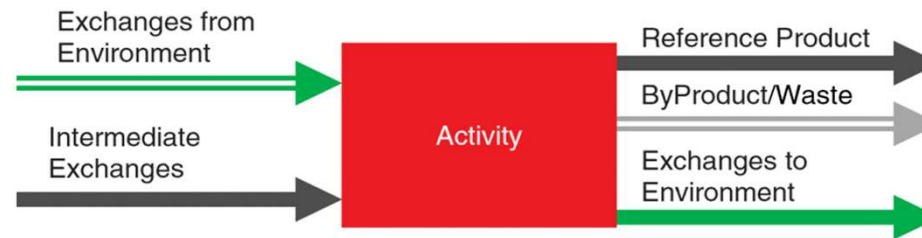
Modelo da análise de Inventário

Modelo LCIA

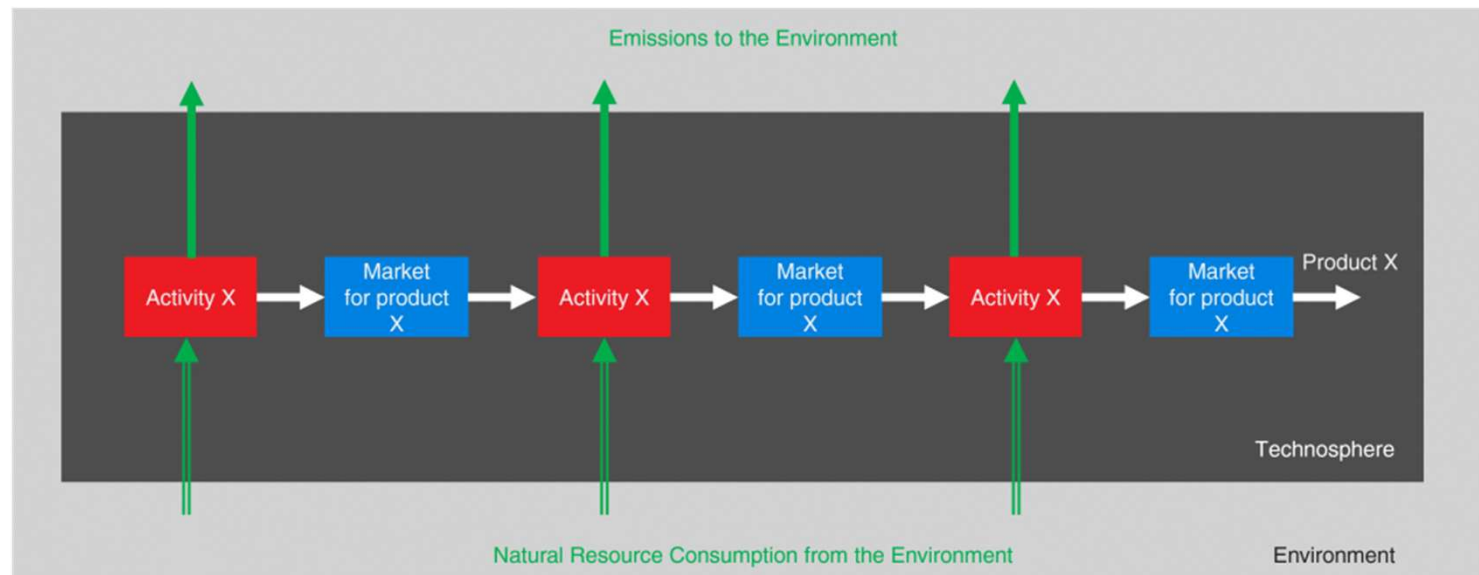


Modelação do inventário: cadeia de valor

Processo unitário (sentido lato)

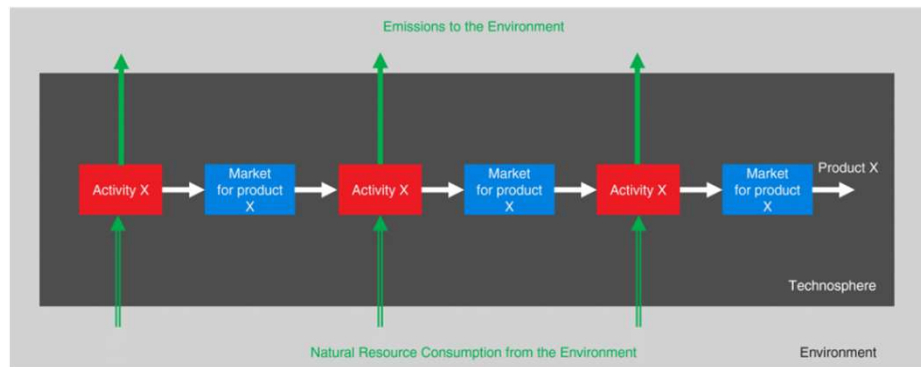


Cadeia de valor



Modelação de Impactes da cadeia de valor

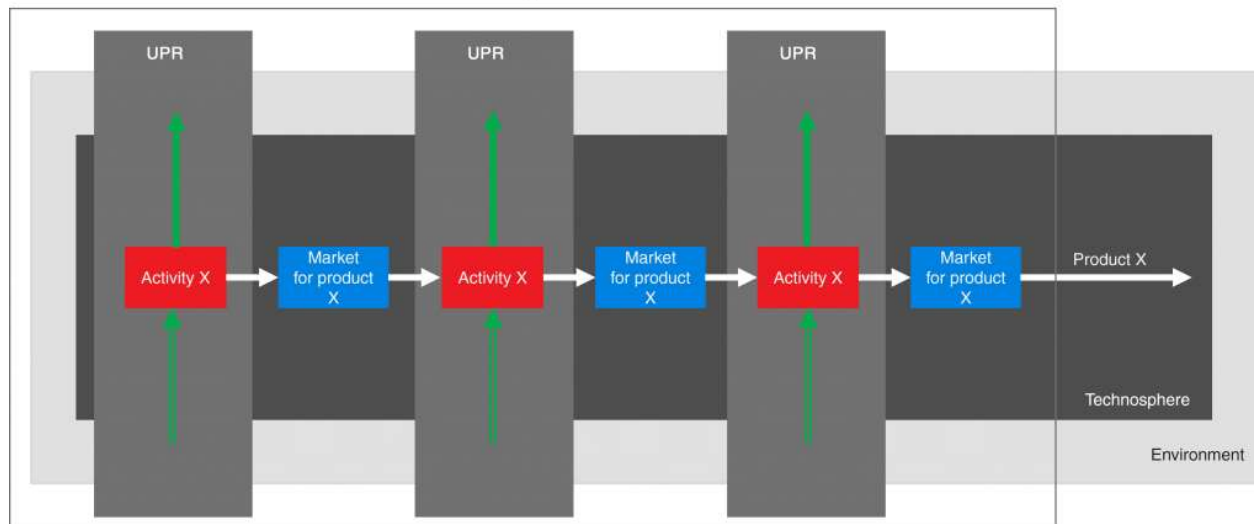
Cadeia de valor



MATRIZ DO SISTEMA
 $P = (PE \mid PF)$

-20	...	4
-10	...	0
...
...
-800		...
49	...	97
...
...
...
0,02	...	0,5
...
0	...	-50

LCI



Qual a
dimensão?

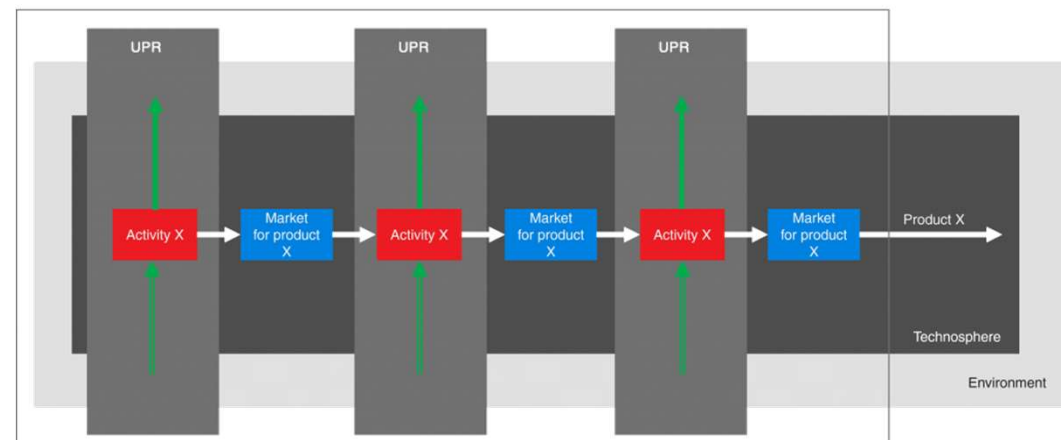
Modelação de Impactes da cadeia de valor

Quando o consumo de recursos naturais ou emissões do mesmo tipo ocorrem em diferentes estágios de uma cadeia de valor, os seus valores são agregados.

Isso resulta numa lista dos recursos naturais extraídos e das emissões lançadas no meio ambiente associadas ao ciclo de vida do produto final, do berço ao portão da fábrica (“from cradle to gate”).

Sempre que o tratamento de fim de vida do produto ou os processos de descarte e/ou tratamento de resíduos são necessários, o ciclo de vida é do berço ao túmulo (“from cradle to grave”).

Assim, esta lista agregada de trocas elementares associadas ao ciclo de vida de um produto é chamada de inventário do ciclo de vida (LCI) e este inventário é consequentemente cumulativo.

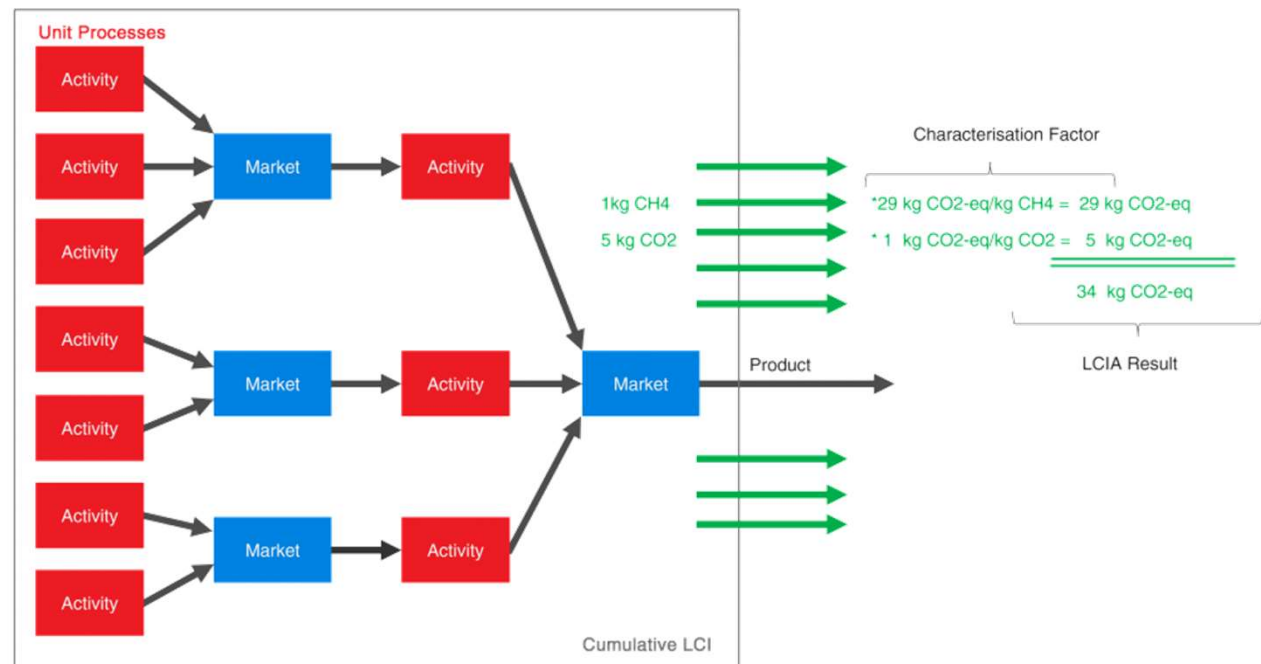


Modelação de Impactes da cadeia de valor

A lista de inventário de trocas elementares ainda não fornece informações sobre os impactes ambientais causado pelo consumo de recursos naturais e pelas emissões para o meio ambiente.

É aqui que entram os métodos de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (LCIA).

Estes métodos quantificam o “que e quanto” dano ou benefício ambiental está associado a uma troca elementar na forma dos chamados fatores de caracterização (FCs). (recordar Aula 3)





Avaliação de Impactes em ACV (LCIA)

4 componentes:

2 obrigatórias (associadas à modelação dos impactes)

Caracterização

Nesta fase, as massas das substâncias que contribuem para uma categoria de impactes são multiplicadas por um fator de caracterização (FC) que expressa a relativa contribuição dessas substâncias

Avaliação de danos

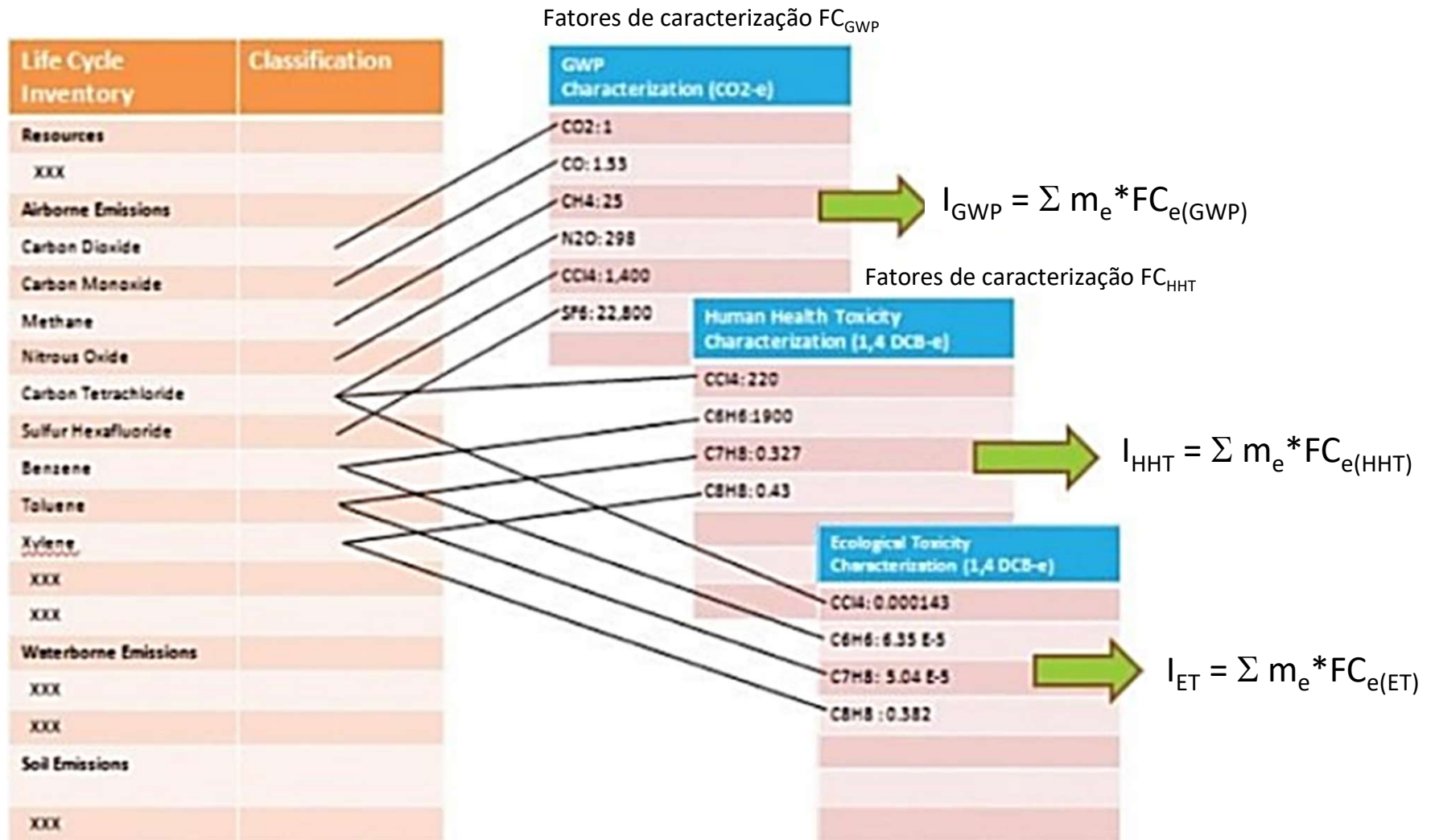
Aqui o objetivo é fazer uso de fatores de conversão de meio a ponto final (FCm-f), combinando assim uma série de indicadores de categoria de impacte numa categoria de dano (também chamada de área de proteção)

2 facultativas

Normalização (interna ou externa)

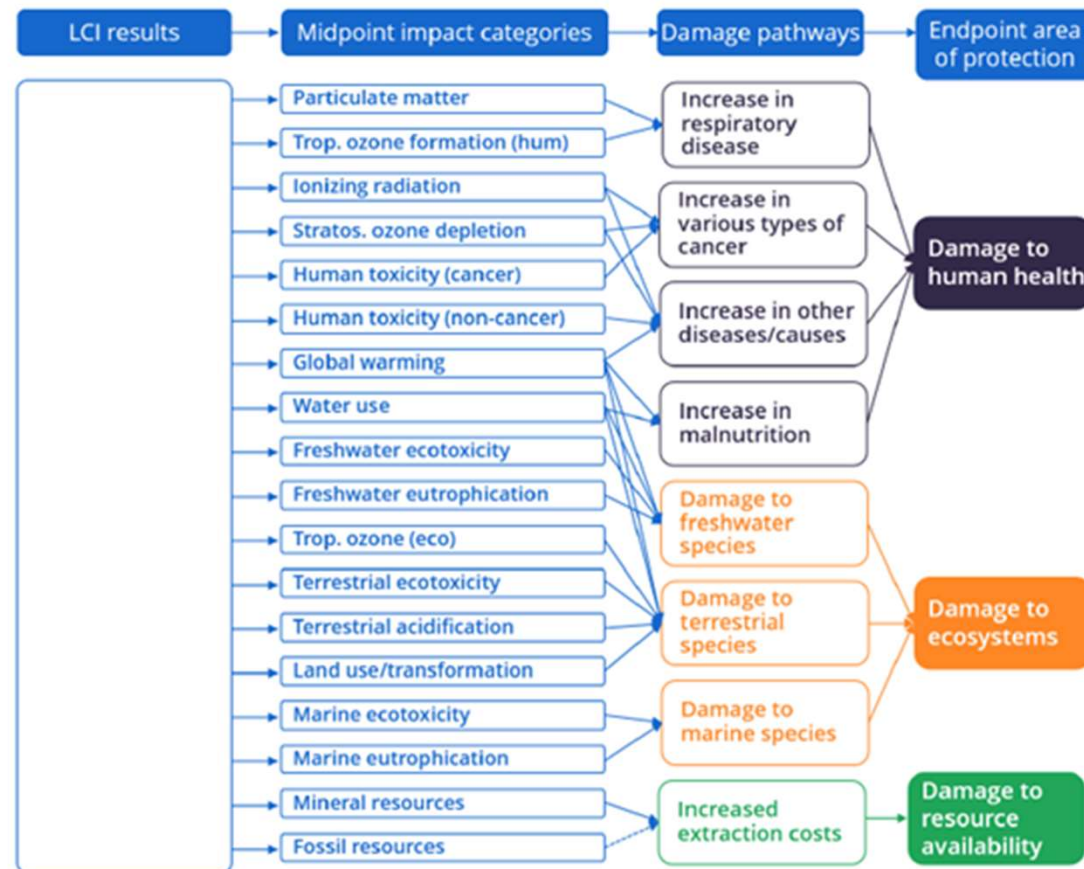
Ponderação (weighting)

Componente 3: Avaliação de impactes (AICV)



Avaliação de Impactes em ACV (AICV=LCIA)

Exemplo: ReCiPe 2016



FC

FCe



Modelação de Impactes em ACV (LCIA)

Exemplo: ReCiPe 2016

3 perspetivas e grupos de valores correspondentes (*cf.* “Cultural Theory” de Thompson *et al.*, 1990)

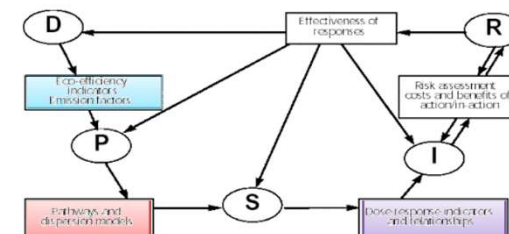
1. **Perspetiva individualista** (I) – baseada no interesse de curto prazo, tipos de impacto incontestáveis e otimismo tecnológico em relação à adaptação humana.
2. **Perspetiva hierárquica** (H) – tem por base o consenso científico no que diz respeito ao prazo e plausibilidade dos mecanismos de impacto.
3. **Perspetiva igualitária** (E) – assente no Princípio da Precaução, tem em conta o período de tempo mais longo em que se podem fazer sentir as consequências dos impactes bem como todas as vias de impacto para as quais existem dados disponíveis

Modelação de Impactes em ACV (LCIA)

Exemplo: ReCiPe 2016

Abordagem:

1. Identificação das vias de impacte e áreas de proteção afetadas
2. Escolhas de valor para as categorias de impacte consideradas, em função de cada uma das 3 perspetivas de valor (20, 100 ou 1000 anos)
3. Estabelecimento dos compartimentos de origem das emissões, dos recetores ambientais e das vias de exposição humana
4. Determinação dos fatores de caracterização dos pontos intermédios
5. Conversão dos pontos intermédios (impactes de caracterização = middlepoints) em pontos finais (endpoints = impactes nas áreas de proteção)



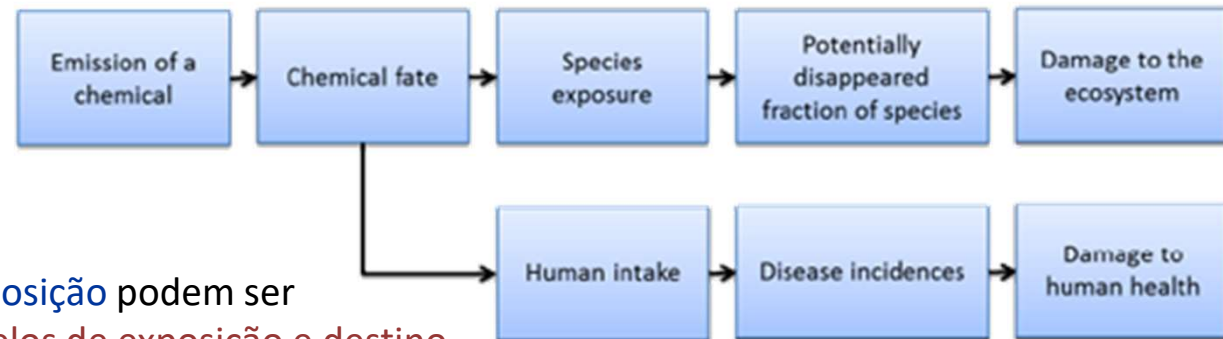
Modelação de Impactes em ACV (LCIA)

Exemplo: ReCiPe 2016 - Toxicidade

O fator de caracterização de toxicidade humana e ecotoxicidade é responsável pela persistência ambiental (**destino**), acumulação na cadeia alimentar humana (**exposição**) e toxicidade (**efeito**) de um produto químico

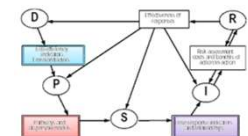
1. Vias de impacte e áreas de proteção afetadas

Cadeia de causa e efeito, das emissões aos danos ao ecossistema e danos à saúde humana



Os fatores de **destino** e **exposição** podem ser calculados através de **modelos de exposição e destino multi-meios 'avaliativos'**, enquanto os fatores de **efeito** podem ser derivados de **dados de toxicidade em seres humanos e animais de laboratório**.

O modelo de destino, exposição e efeitos multi-meios aplicado é **USES-LCA 2.0** (Sistema Uniforme para Avaliação de Substâncias adaptado para LCA, de Van Zelm *et al.* 2009) que abarca 3094 substâncias.

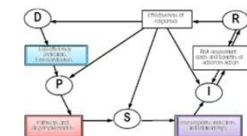


Modelação de Impactes em ACV (LCIA)

Exemplo: ReCiPe 2016 - Toxicidade

- Escolhas de valor para as categorias de impacte consideradas, em função de cada uma das 3 perspetivas de valor (20, 100 ou 1000 anos)

Choice category	Individualist	Hierarchist	Egalitarian
Time horizon	20 years	100 years	Infinite
Exposure routes for human toxicity	Organics: all exposure routes. Metals: drinking water and air only	All exposure routes for all chemicals	All exposure routes for all chemicals
Environmental compartments for marine ecotoxicity	Sea + ocean for organics and non-essential metals. For essential metals, sea compartment included only, excluding oceanic compartments	Sea + ocean for all chemicals	Sea + ocean for all chemicals
Carcinogenicity	Only chemicals with TD50 classified as 1, 2A, 2B by IARC	All chemicals with reported TD50	All chemicals with reported TD50
Minimum number of tested species for ecotoxicity	4	1	1



Modelação de Impactes em ACV (LCIA)

Exemplo: ReCiPe 2016 - Toxicidade

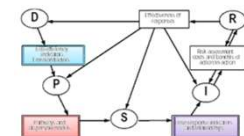
- Estabelecimento dos compartimentos de origem das emissões, dos recetores ambientais e das vias de exposição humana

$$ETP_{x,i,j,c} = \sum_g \frac{FF_{x,i,j,g,c} \times EF_{x,j,c}}{FF_{DCB,ref,j,g,c} \times EF_{DCB,j,c}}$$

$$HTP_{i,x,c/nc,c} = \sum_r \sum_g \frac{iF_{x,i,r,g,c} \times EF_{x,r,c/nc,c}}{iF_{DCB,ua,r,g,c} \times EF_{DCB,r,c/nc,c}}$$

ETP – ecotoxicidade potencial
 HTP – toxicidade humana potencial
 FF – fator de destino
 EF – fator de efeito
 iF – fator de exposição
 DCB – diclorobenzeno

Emission compartments <i>i</i>	Environmental receptors <i>j</i>	Human exposure routes
Urban air	Terrestrial environment (excl. agri land)	Inhalation
Rural air	Freshwater environment	Ingestion via root crops
Fresh water	Marine environment	Ingestion via leaf crops
Seawater		Ingestion via meat products
Agricultural soil	Os efeitos sobre o solo agrícola foram excluídos para evitar dupla contabilização com a categoria de impacto “uso do solo”	Ingestion via dairy products
Industrial soil		Ingestion via eggs
		Ingestion via freshwater fish
		Ingestion via marine fish
		Ingestion via drinking water



Modelação de Impactes em ACV (LCIA)

Exemplo: ReCiPe 2016 - Toxicidade

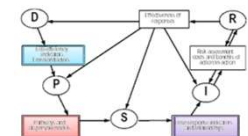
4. Determinação dos fatores de caracterização dos pontos intermédios (FC)

$$ETP_{x,i,j,c} = \sum_g \frac{FF_{x,i,j,g,c} \times EF_{x,j,c}}{FF_{DCB,ref,j,g,c} \times EF_{DCB,j,c}}$$

$$HTP_{i,x,c/nc,c} = \sum_r \sum_g \frac{iF_{x,i,r,g,c} \times EF_{x,r,c/nc,c}}{iF_{DCB,ua,r,g,c} \times EF_{DCB,r,c/nc,c}}$$

- ETP – ecotoxicidade potencial
- HTP – toxicidade humana potencial
- FF – fator de destino
- EF – fator de efeito
- iF – fator de exposição
- DCB – diclorobenzeno
- g – escala geográfica
- r – vias de exposição (ingestão, ...)

Substance	Emission compartment	Individualist	Hierarchist	Egalitarian
Terrestrial ecotoxicity				
1,4-Dichlorobenzene	Urban air	6.3E-03	6.3E-03	6.3E-03
1,4-Dichlorobenzene	Fresh water	5.7E-03	5.7E-03	5.7E-03
1,4-Dichlorobenzene	Seawater	2.7E-03	2.7E-03	2.7E-03
1,4-Dichlorobenzene	Industrial soil	1	1	1
Nickel	Urban air	2.1E+01	5.4E+01	2.1E+02
Nickel	Fresh water	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Nickel	Seawater	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Nickel	Industrial soil	7.6E+00	3.7E+01	4.5E+02
Human toxicity (carcinogenic)				
1,4-Dichlorobenzene	Urban air	1	1	1
1,4-Dichlorobenzene	Fresh water	6.9E-01	6.9E-01	6.9E-01
1,4-Dichlorobenzene	Seawater	1.9E-01	1.9E-01	1.9E-01
1,4-Dichlorobenzene	Industrial soil	2.3E-01	2.3E-01	2.3E-01
Nickel	Urban air	3.1E+01	3.7E+02	9.1E+02
Nickel	Fresh water	3.4E+00	2.3E+01	2.5E+02
Nickel	Seawater	0.0E+00	3.5E+00	1.2E+03
Nickel	Industrial soil	2.1E+00	1.2E+01	3.6E+02
Human toxicity (non-carcinogenic)				
1,4-Dichlorobenzene	Urban air	1	1	1
1,4-Dichlorobenzene	Fresh water	1.7E+01	1.7E+01	1.7E+01
1,4-Dichlorobenzene	Seawater	8.3E-01	8.2E-01	8.2E-01
1,4-Dichlorobenzene	Industrial soil	1.1E+00	1.1E+00	1.1E+00
Nickel	Urban air	3.6E+01	2.3E+03	5.8E+03
Nickel	Fresh water	2.3E+01	1.5E+02	1.7E+02



Modelação de Impactes em ACV (LCIA)

Exemplo: ReCiPe 2016 - Toxicidade

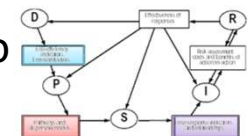
5. Conversão dos pontos intermédios (impactes de caracterização = middlepoints) em pontos finais (endpoints = impactes nas áreas de proteção)

Os **fatores de caracterização dos “endpoints”** (FCe) são obtidos dos FC, através de um fator de conversão constante por categoria de impacte:

$$FCe_{x,c,a} = FC_{x,c} \times F_{m-e,c,a}$$

onde: **c** - perspetiva cultural; **a** - área de proteção (human health, terrestrial ecosystems, freshwater ecosystems, marine ecosystems or resource scarcity); **x** – produto e; **F_{m-e,c,a}** – fator de conversão dos pontos intermédios em pontos finais, para a perspetiva a e a área de proteção a

Os **fatores de conversão dos pontos intermédios em pontos finais** (**F_{m-e}**) são constantes por categoria de impacte uma vez que os mecanismos ambientais são considerados idênticos para todos os stressores (ex. diclorobenzeno, níquel, ...) após a localização do impacte do ponto intermédio na cadeia causa-efeito.



Avaliação de Impactes em ACV (LCIA)

4 componentes:

2 facultativas

Normalização (interna ou externa)

Vários métodos permitem que os resultados dos indicadores de categoria de impacto sejam comparados com um valor de referência (ou normal).

Isso significa que o valor da categoria de impacto é dividido pela referência.

$$N_j = S_j / A_j$$

sendo: N_j - resultado normalizado do impacto na categoria de impacto; S_j - resultado do impacto na categoria de impacto j ; A_j - factor de normalização (normalization score).

Essa referência pode ser:

- **interna** (divisão pelo valor da linha de base, pelo valor máximo, médio, total da categoria de impacto,...) [ex. análise “hotspot” apresentado na Aula 4]
- **externa** (ex. divisão pela carga ambiental média anual de um país ou continente, dividida pelo número de habitantes, para um determinado ano).

Para exemplo, ver ficheiro “Normalization scores ReCiPe 2016.xlsx”

Avaliação de Impactes em ACV (LCIA)

4 componentes:

2 facultativas

Ponderação (weighting)

Conversão dos resultados dos indicadores de cada uma das categorias de impacte a uma escala comum, por meio de fatores numéricos baseados em escolhas de valor.

Os potenciais para diferentes impactos são avaliados, sendo então estabelecidos diferentes fatores de ponderação: um fator para cada categoria de impacte e de dano.

Distinguem-se três tipos de métodos de ponderação:

- ponderação monetária, baseada no que se está disposto-a-pagar ou em abordagens de preferências hierarquizadas (por exemplo, através de inquéritos)
- ponderação distância-ao-alvo, utilizando legislação e/ou metas políticas;
- ponderação por painel de “stakeholders”, utilizando julgamento de especialistas ou de interessados no processo de decisão.

$$X = \sum_j W_j \cdot S_j$$

X - representa o “índice ambiental”
 W_j - factor de peso respeitante à categoria de impacte j
 S_j - representa o resultado do impacte j.

Análise de Qualidade dos Dados em ACV

Table 1: Point of introduction in the LCA of different types of uncertainty, and examples of possible sources. Based on Huijbregts (1998a)

Type	LCA phase				
	Goal and scope	Inventory	Choice of impact categories	Classification	Characterisation
Data inaccuracy		Inaccurate emission measurements			Uncertainty in life times of substances and relative contribution to impacts
Data gaps		Lack of inventory data			Lack of impact data
Unrepresentative data		Lack of representative inventory data			
Model uncertainty		Static instead of dynamic modelling. Linear instead of non-linear modelling			Static instead of dynamic modelling. Linear instead of non-linear modelling
Uncertainty due to choices	Choice of functional unit, system boundaries	Choice of allocation methods, technology level, marginal/average data	Leaving out known impact categories		Choice of characterisation methods
Spatial variability		Regional differences in emission inventories			Regional differences in environmental sensitivity
Temporal variability		Differences in yearly emission inventories			Choice of time horizon. Changes in environmental characteristics over time
Variability between objects/sources		Differences in performance between equivalent processes			Differences in environmental and human characteristics
Epistemological uncertainty	Ignorance about relevant aspects of studied system	Ignorance about modelled processes	Impact categories are not known	Contribution to impact category is not known	Characterisation factors are not known
Mistakes	Any	Any	Any	Any	Any
Estimation of uncertainty		Estimation of uncertainty of inventory parameters			Estimation of uncertainty of characterisation parameters

Fonte: AE Bjorklund, 2002

Análise de Qualidade dos Dados em ACV

Table 3: Overview of tools available to address (reduce and/or illustrate) different types of uncertainty in LCA. Based on Huijbregts (1998a)

	Data Inaccuracy	Data gaps	Unrepresentative data	Model uncertainty	Uncertainty due to choices	Spatial variability	Temporal variability	Variability in objects/sources	Epistemological uncertainty	Mistakes	Estimation of uncertainty
Standardisation					x					x	
Data bases		x	x								x
Data quality goals	x		x								
Data quality indicators	x		x								
Validation of data										x	
Parameter estimation		x									
Additional measurements	x	x	x					x			
Higher resolution models				x		x	x				
Critical review		x	x		x				x	x	x
Sensitivity analysis	x		x	x	x	x	x	x			
Uncertainty importance analysis	x		x	x	x	x	x	x			
Classical statistical analysis	x					x	x	x			
Bayesian statistical analysis	x					x	x	x			
Interval arithmetic	x										
Vague error intervals	x										
Probabilistic simulation	x							x			
Scenario modelling			x	x	x	x	x	x			
Rules of thumb	x										



Avaliação do Ciclo de Vida
Aula 7 – Modelação III
14 Dezembro 2022