

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

PQI 3535: Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)



Gil Anderi da Silva
Luiz Kulay

EXERCÍCIO DE FIXAÇÃO n.3
comentários

Exercício n.2

São conhecidos os seguintes dados:

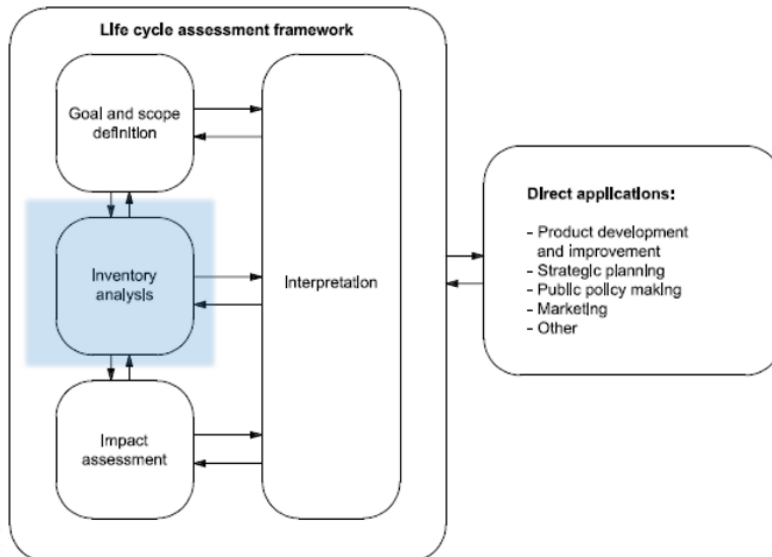
- Frascos de Alumínio:
 - capacidade de embalagem por frasco: 0,8 L
 - massa de uma lata de alumínio: 55 g
- Frascos de PET:
 - capacidade de embalagem por frasco: 1,0 L
 - massa de um frasco de PET: 75 g
- Sacolas de Papel:
 - uma sacola de papel comporta cinco frascos de alumínio ou quatro frascos de PET
 - massa de uma sacola de papel: 50 g
- Sacolas de Polietileno:
 - uma sacola de polietileno comporta cinco frascos de alumínio ou quatro frascos de PET
 - massa de uma sacola de polietileno: 30 g

Aspecto Ambiental	Material	Obtenção de Matérias-Primas	Manufatura de Materiais	Manufatura do Produto	Transporte
Água (m ³ /t)	Alumínio	100	100	100	100
	PET	80	80	100	100
	Papel	120	150	100	100
	Polietileno	80	90	100	100
CO ₂ eq (kg/t)	Alumínio	100	100	100	100
	PET	120	120	80	100
	Papel	150	80	70	100
	Polietileno	120	120	80	100
Energia Elétrica (kWh/t)	Alumínio	100	100	100	–
	PET	80	50	90	–
	Papel	30	10	30	–
	Polietileno	80	50	90	–

Dispondo apenas das informações descritas acima, indique:

- a) Qual conjunto (frasco e sacola) você escolheria para transportar 4,0 L de óleo? Que argumentos respaldam essa decisão?
- b) Apresente sugestões de alteração desses conjuntos que:
 - Permitam de fato selecionar uma das alternativas sob análise, por conta desta atingir os melhores desempenhos em termos dos consumos de água e eletricidade e de emissões de CO₂ dentre todas as opções analisadas;
 - Façam com que todos os conjuntos apresentem desempenhos equivalentes para os requisitos ambientais avaliados.

Estrutura do Método de ACV



(ISO 14040:2006)

Analise do Inventario (ICV) Etapas Operacionais

Em termos operacionais a condução da Análise de Inventário (ICV) consiste de duas atividades:

- Coleta de Dados
- Tratamento de Dados

Analise do Inventario (ICV) Etapas Operacionais

A atividade de Tratamento dos Dados se divide em duas ações, a serem implementadas (quando couber) de forma consecutiva:

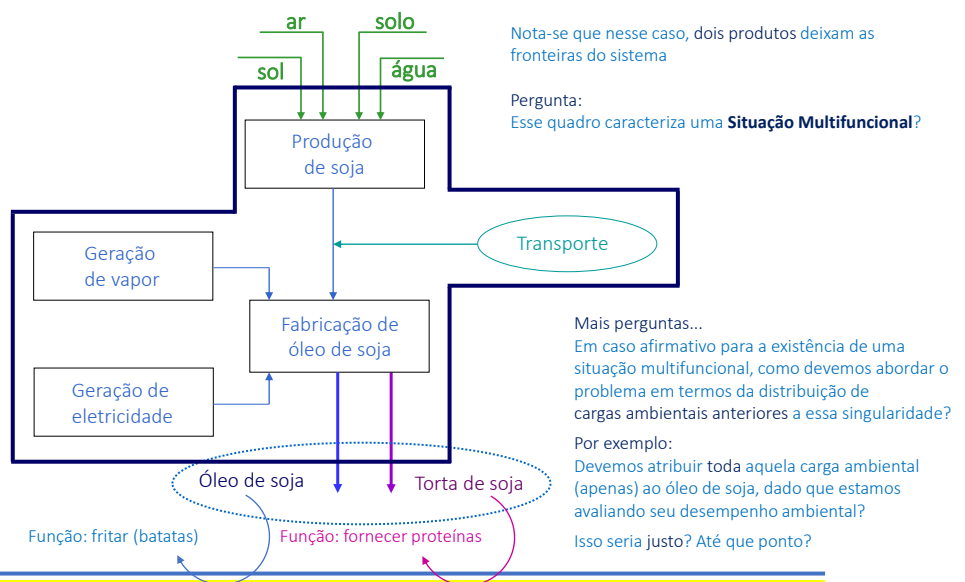
- Correlação dos dados à Unidade Funcional (ou ao Fluxo de Referência)
 - Tratamento de Situações Multifuncionais
-
-

Analise do Inventario (ICV) Etapas Operacionais

A atividade de Tratamento dos Dados se divide em duas ações, a serem implementadas (quando couber) de forma consecutiva:

- Correlação dos dados à Unidade Funcional (ou ao Fluxo de Referência)
- Tratamento de Situações Multifuncionais

Situações de Multifuncionais



O que são Situações de Multifuncionalidade? Quando elas ocorrem?

Os ciclos de vida de diferentes produtos estão interconectados. Às vezes, vários produtos (ou funções) compartilham o(s) mesmo(s) processo(s)

Quando a carga ambiental desses processos deve (ou precisa) ser expressa em relação a apenas um desses produtos (ou funções), cria-se um problema (ou situação) multifuncional

Existem três situações gerais em que problemas multifuncionais podem ser encontrados:

- Processos que geram vários produtos (saídas múltiplas)
- Processo que recebem produtos diferentes (entradas múltiplas)
- Processos envolvendo reciclagem em circuito aberto (Open Loop Recycling: OLR)

Situações Multifuncionais: Processos que geram múltiplos produtos (multi-output)

Em processos que resultam na geração de vários produtos, o problema multifuncional pode ser descrito por meio da seguinte pergunta:

"Quanto do consumo de recursos e emissões do processo está associado aos diferentes produtos produzidos nesse sistema?"

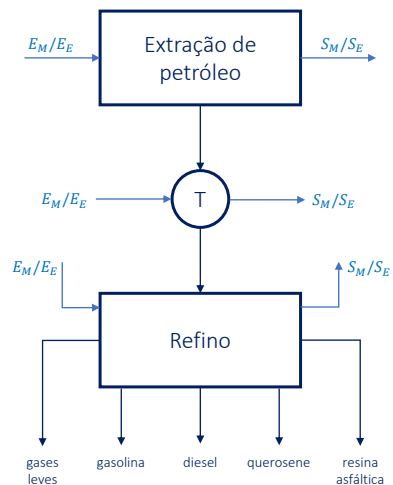
Exemplo: Refino de petróleo

Aspectos ambientais:

- correntes de entrada e saída de matéria e energia

Pergunta:

Quanto de recursos e emissões deve ser atribuído individualmente a gases leves, diesel, gasolina, querosene, resina asfáltica (entre outras frações)?



Situações Multifuncionais: Processos que recebem múltiplos produtos (multi-input)

Para processos que recebem vários produtos, a pergunta que descreve o problema multifuncional seria:
"Caso seja necessário, como distribuir consumos e emissões associados às práticas realizadas no sistema entre os diferentes fluxos nele introduzidos?"

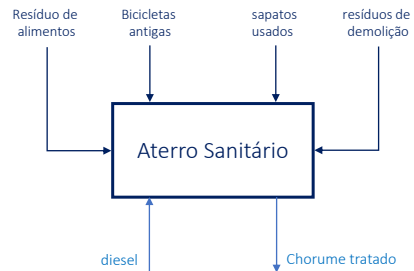
Exemplo: Cenários de tratamento de rejeitos (aterros sanitários, plantas de incineração, ETEs)

Aspectos ambientais (qualificados):

- diesel para operação de máquinas
- chorume tratado que foi gerado no aterro sanitário

Pergunta:

Quanto de chorume deve ser atribuído individualmente a rejeitos alimentícios, de demolição, a bicicletas ou mesmo, sapatos antigos (entre outros rejeitos)?
E quanto ao diesel, como proceder?



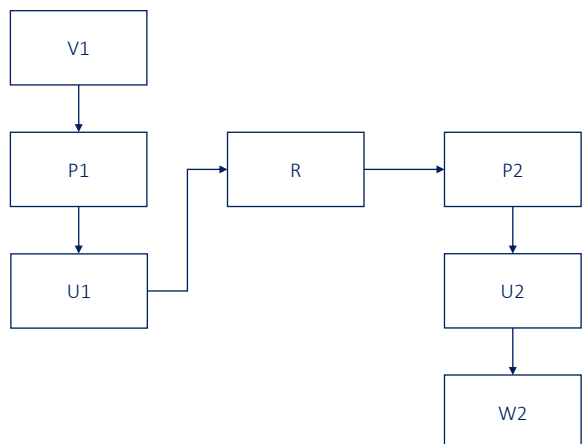
Situações Multifuncionais: Processos envolvendo reciclagem em circuito aberto (Open Loop Recycling: OLR)

O que são sistemas em Open Loop Recycling?

- Um sistema OLR se configura quando um produto é reciclado em um produto diferente
- Em geral (mas não obrigatoriamente), sistemas que compreendem OLR acarretam perda de qualidade dos produtos envolvidos

Exemplos:

- reciclagem de embalagem de alimentos em outros tipos de embalagem
- reciclagem de energia a partir de incineração de rejeitos
- reciclagem de carroceria de automóveis em caixilhos para janela



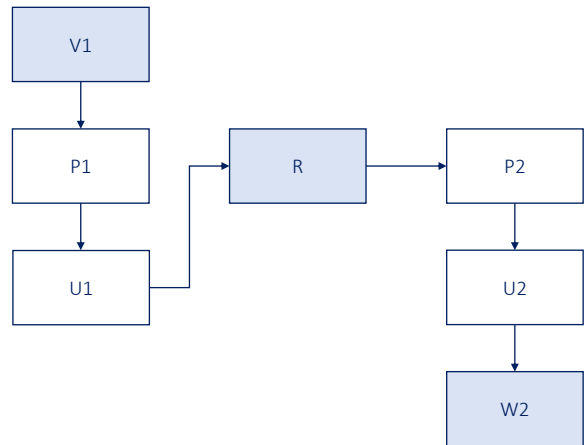
Situações Multifuncionais: Processos envolvendo reciclagem em circuito aberto (Open Loop Recycling: OLR)

Apenas algumas das atividades dos sistemas OLR são compartilhadas entre os produtos nele envolvidos. São elas:

- extração dos recursos naturais utilizados em ambos os produtos
- atividades relacionadas a reciclagem (limpeza, moagem, (re) fusão)
- atividades relacionadas ao tratamento + disposição final de rejeitos

Os problemas multifuncionais no OLR envolvem apenas os processos compartilhados.

As demais etapas do sistema são proprietárias de cada produto



O que diz a norma ISO sobre o tema?

4.3.4 Alocação (= Tratamento de Multifuncionalidades)

4.3.4.1 Considerações gerais

As entradas e saídas devem ser alocadas aos diferentes produtos de acordo com **critérios claros** forma clara, que devem ser documentados e explicados em conjunto com o procedimento **para tratamento de multifuncionalidades**.

A soma das entradas e saídas de um processo elementar que são alocadas deve ser igual à soma dessas entradas e saídas antes da alocação.

Sempre que diversas alternativas de procedimentos de alocação parecerem aplicáveis, uma análise de sensibilidade deve ser conduzida para explicitar as conseqüências da substituição da abordagem selecionada.

- As atividades compartilhadas entre sistemas de produtos devem ser identificadas antes de serem alvo dos procedimentos para tratamento de multifuncionalidades
- 'Regra dos 100%'
- Análise de Sensibilidade: descreve o que ocorreria caso fosse adotado um procedimento diferente daquele que escolhido

O que diz a norma ISO sobre o tema?

4.3.4.2 Procedimento de alocação

O estudo deve identificar os processos compartilhados com outros sistemas de produto e tratá-los de acordo com o procedimento passo-a-passo apresentado abaixo:

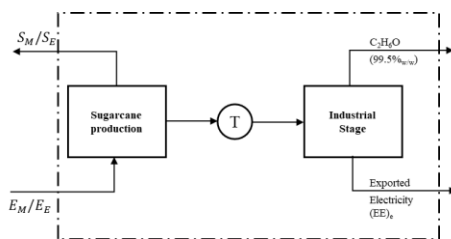
a) **Passo 1:** Convém que a alocação seja evitada sempre que possível a:

1) divisão dos processos elementares a serem alocados em dois ou mais subprocessos e coleta dos dados de entrada e saída relacionados a esses subprocessos;

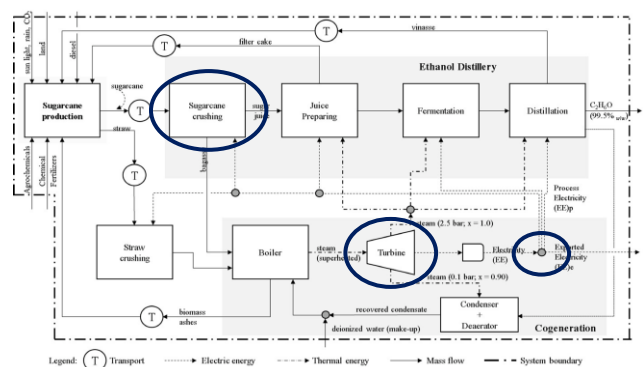
- Aumento do nível de detalhe da modelagem
- Adequado para processos multi-output (nem todos os produtos da refinaria passam por uma mesma torre de destilação)
- Adequado para processos multi-input (os efluentes ácidos do branqueamento de celulose não sofrem tratamento ¹ário)
- Não adequado para OLR
- São necessários dados e trabalho extra

Divisão de Processos (aumento do nível de detalhe)
Exemplo: Processamento de etanol com exportação de eletricidade

Sistema menos detalhado



Sistema mais detalhado



O que diz a norma ISO sobre o tema?

4.3.4.2 Procedimento de alocação

O estudo deve identificar os processos compartilhados com outros sistemas de produto e tratá-los de acordo com o procedimento passo-a-passo apresentado abaixo:

a) **Passo 1:** Convém que a alocação seja evitada, sempre que possível, por meio de:

- 1) divisão dos processos elementares a serem alocados em dois ou mais subprocessos e coleta dos dados de entrada e saída relacionados a esses subprocessos;
- 2) expansão do sistema de produto de modo a incluir as funções adicionais relacionadas aos co-produtos, levando em consideração os requisitos de 4.2.3.3.

- Sistema em estudo recebe **crédito** por ter **evitado** a produção de produto alternativo – pelo fato deste ter sido substituído por aquele que caracteriza o problema multifuncional – no exercício de certa função
- Premissa: *'Se o sistema em estudo fornecer mais produto a outro sistema, menos deste mesmo produto precisará ser produzido a partir de uma rota alternativa'*
- Pré-requisito da expansão do sistema: deve haver uma maneira **alternativa** de produzir as funções 'extras'
- A expansão do sistema introduz **incertezas** sobre como modelar os processos adicionais, que afeta os resultados globais da ACV (Finnveden & Ekvall, 1998)

O que diz a norma ISO sobre o tema?

4.3.4.2 Procedimento de alocação

b) **Passo 2:** Quando a alocação não puder ser evitada, convém que as entradas e saídas do sistema sejam subdivididas entre seus diferentes produtos ou funções, de maneira a refletir as relações físicas subjacentes entre eles; isto é, convém que seja refletida a maneira pela qual as entradas e saídas são alteradas por mudanças quantitativas nos produtos ou funções providos pelo sistema.

c) **Passo 3:** Quando uma relação física por si só não puder ser estabelecida ou usada como base para a alocação, convém que as entradas sejam alocadas entre os produtos e funções de uma maneira que reflita outras relações entre eles. Por exemplo, dados de entrada e saída podem ser alocados entre co-produtos proporcionalmente ao seu valor econômico.

- Tratamento de situações multifuncionais por particionamento (= **Alocação**)
- Particionamento significa que consumos de recursos e emissões associados ao processo multifuncional e àqueles colocados a montante deste são divididos entre os produtos por ele gerados
- As relações físicas não devem ser vistas como formas para equilibrar cargas ambientais. A elas compete descrever os efeitos dos coprodutos (ou das funções atendidas pelo sistema) sobre correntes de entrada e saída
- Muito embora os critérios baseados em valor econômico introduzam incertezas [$f = (\text{tempo; espaço; circunstância})$] estes refletem o valor que a sociedade imputa aos produtos (ou serviços) considerados pela alocação

O que diz a norma ISO sobre o tema?

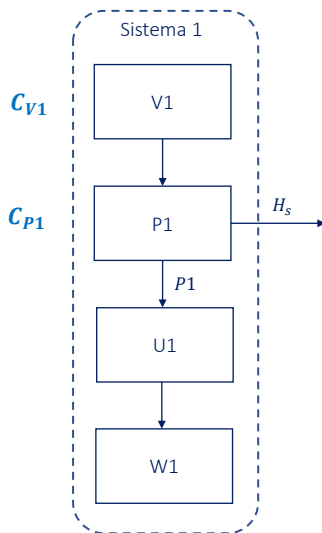
4.3.4.2 Procedimento de alocação

Algumas saídas podem ser parcialmente co-produtos e parcialmente resíduo. Em tais casos, é necessário identificar a razão entre co-produtos e resíduos, uma vez que as entradas e saídas devem ser alocadas apenas **apenas à parcela de coprodutos**

Procedimentos de alocação devem ser aplicados de forma **uniforme a entradas e saídas similares** em consideração. Por exemplo, se a alocação for feita para produtos utilizáveis (isto é, produtos intermediários ou descartados) que deixam o sistema, então o procedimento de alocação deve ser similar ao utilizado para tais produtos entrando no sistema.

O inventário é baseado em balanços de material entre entrada e saída. Convém, portanto, que os procedimentos de alocação **se aproximem** quanto possível de tais relações fundamentais entre entrada/saída e suas características.

Particionamento (= Alocação)



Exemplo: aplicação de fatores de alocação (f_{P1} e f_{H_S})

$$\begin{aligned} C_{V1} &= f_{P1} \cdot C_{V1} + f_{H_S} \cdot C_{V1} \\ C_{P1} &= f_{P1} \cdot C_{P1} + f_{H_S} \cdot C_{P1} \end{aligned}$$

Sendo: $f_{P1} + f_{H_S} = 1$

Assim, a carga ambiental total ($C_{T,S1}$) associada ao atendimento da função **U1** pelo produto **P1** será de

$$C_{T,S1} = f_{P1} \cdot (C_{V1} + C_{P1}) + C_{U1} + C_{W1}$$

Por outro lado, a carga ambiental associada a (H_S) ao deixar o sistema 1 (= C_{H_S}) em direção a outro sistema corresponde a

$$C_{H_S} = f_{H_S} \cdot (C_{V1} + C_{P1})$$

Ela irá se somar a outras cargas ambientais geradas no sistema de destino para compor a carga total acumulado para efeito de atendimento da função que justifica sua existência

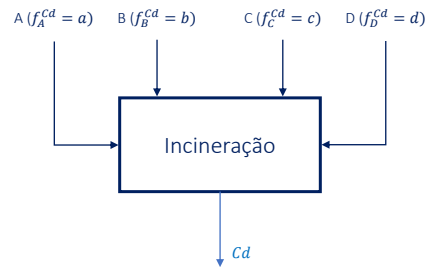
Tratamento de Situações de Multifuncionalidade
Alocação de Cargas Ambientais
Critérios de Relações Físicas

Relações físicas:

- Não se resume ao uso de razões mássicas ou molares como critério de alocação entre as entradas e saídas de um processo multifuncional
- Se o fator de alocação coincidir com os fluxos de massa relativos dos coprodutos, isso deve ser motivado por alguma relação técnico-casual

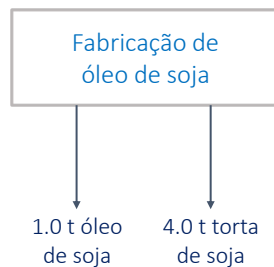
Exemplos:

- Teor de um componente
- Poder Calorífico Inferior ou Conteúdo Energético
- Energia (ou Calor) de Reação
- Propriedades Termodinâmicas
- (...)



$$a \neq b \neq c \neq 0 \text{ mas } d = 0$$

Tratamento de Situações de Multifuncionalidade
Alocação de Cargas Ambientais (Allocation)
Critérios de Relações Físicas: massa



Razão de alocação:

$$\text{Óleo: } f_{OS} = 1/5$$

$$\text{Torta: } f_{TS} = 4/5$$

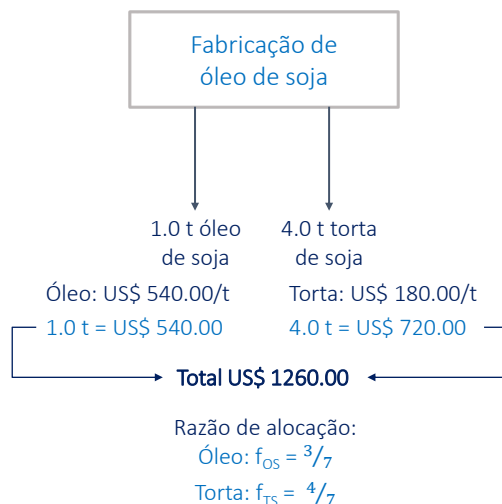
Analise do Inventario (ICV)
Tabela de Valores correlacionados à UF

<u>Processo elementar</u> Aspecto Ambiental	Produção de soja (t de óleo)	Geração de vapor (t de óleo)	Geração de eletricidade (t de óleo)	Fabricação de óleo (t de óleo)	Transporte (t de óleo)
energia (GJ)	2.90	4.14	1.589		0.5716
gás carbônico (kg)	226.5	194	109.4		54.03
monóxido de carbono (kg)	0.050	0.048	0.00508		0.1334
hidrocarbonetos (kg)	0.023	2.40	0.00928		0.0867
óxido de nitrogênio (kg)	0.355	0.60	0.0021		0.80
óxido de enxofre (kg)	1.60	0.168	0.01365		0.0587
nitrogênio (kg)	15.0				
fósforo (kg)	7.50				
defensivos (kg)	68.25				
hexano (kg)				3.00	

Analise do Inventario (ICV)
Tratamento de Situações de Multifuncionalidade – Alocação
Critérios Físicos: massa
Tabela de Valores Consolidados

<u>Processo elementar</u> Aspecto Ambiental	Produção de soja (t de óleo)	Geração de vapor (t de óleo)	Geração de eletricidade (t de óleo)	Fabricação de óleo (t de óleo)	Transporte (t de óleo)
energia (GJ)	0.58	0.83	0.32		0.11
gás carbônico (kg)	45.3	38.8	21.9		10.8
monóxido de carbono (kg)	0.010	0.0096	0.0010		0.027
hidrocarbonetos (kg)	0.0046	0.48	0.0019		0.017
óxido de nitrogênio (kg)	0.071	0.12	0.00042		0.16
óxido de enxofre (kg)	0.32	0.033	0.0027		0.012
nitrogênio (kg)	3.00				
fósforo (kg)	1.50				
defensivos (kg)	13.6				
hexano (kg)				0.60	

Analise do Inventario (ICV)
 Tratamento de Situações de Multifuncionalidade – Alocação
 Critérios Econômicos: valor comercial



Analise do Inventario (ICV)
 Tratamento de Situações de Multifuncionalidade – Alocação
 Critérios Físicos: relações econômicas
 Tabela de Valores Consolidados

Processo elementar Aspecto Ambiental	Produção de soja (t de óleo)	Geração de vapor (t de óleo)	Geração de eletricidade (t de óleo)	Fabricação de óleo (t de óleo)	Transporte (t de óleo)
energia (GJ)	1.24	1.77	0.68		0.24
gás carbônico (kg)	97.1	83.1	46.9		23.2
monóxido de carbono (kg)	0.021	0.021	0.0022		0.057
hidrocarbonetos (kg)	0.010	1.03	0.0040		0.037
óxido de nitrogênio (kg)	0.15	0.26	0.00090		0.34
óxido de enxofre (kg)	0.69	0.072	0.0059		0.025
nitrogênio (kg)	6.43				
fósforo (kg)	3.21				
defensivos (kg)	29.3				
hexano (kg)				1.29	

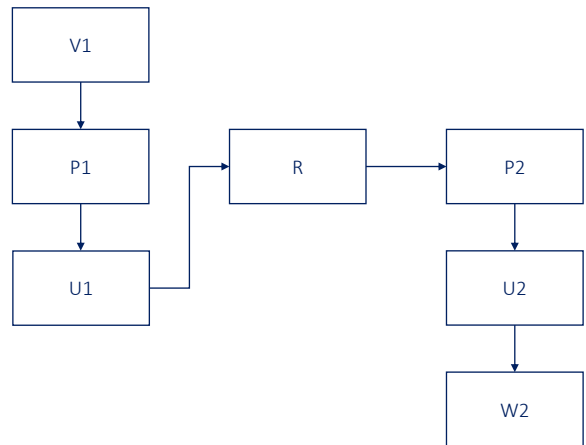
Situações Multifuncionais:
Processos envolvendo reciclagem em circuito aberto (Open Loop Recycling: OLR)

O que são sistemas em Open Loop Recycling?

- Um sistema OLR se configura quando um produto é reciclado em um produto diferente
- Em geral (mas não obrigatoriamente), sistemas que compreendem OLR acarretam perda de qualidade dos produtos envolvidos

Exemplos:

- reciclagem de embalagem de alimentos em outros tipos de embalagem
- reciclagem de energia a partir de incineração de rejeitos
- reciclagem de carroceria de automóveis em caixilhos para janela

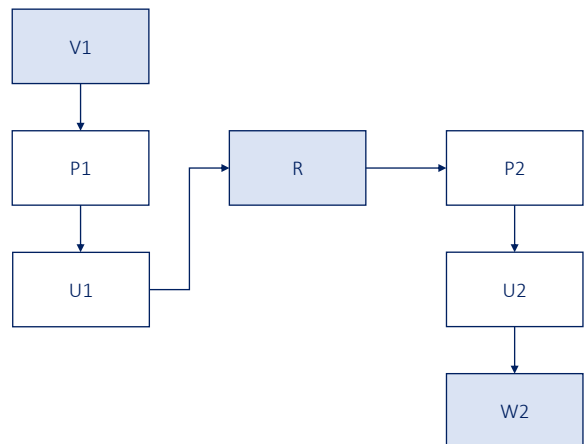


Situações Multifuncionais:
Processos envolvendo reciclagem em circuito aberto (Open Loop Recycling: OLR)

Apenas algumas das atividades dos sistemas OLR são compartilhadas entre os produtos que nele estão envolvidos.

São elas:

- extração dos recursos naturais utilizados em ambos os produtos
- atividades relacionadas a reciclagem (limpeza, moagem, (re) fusão)
- atividades relacionadas ao tratamento + disposição final de rejeitos



Os problemas multifuncionais no OLR envolvem apenas os processos compartilhados. As demais etapas do sistema são proprietárias de cada produto

Situações Multifuncionais: Processos com Open Loop Recycling (OLR)

Alocação em reciclo aberto (OLR) é um aspecto bastante debatidas em termos metodológicos
Os (vários) métodos propostos para tratar a questão podem ser classificados em:

i. Métodos baseados em argumentos de *'justiça'*

Abordagem: Que produto pode ser considerado 'responsável' pelas atividades **compartilhadas** de um sistema OLR?

- 'Cut-off'
- Perda relativa de qualidade
- Rejeito como consequência da extração de recursos naturais
- Extração de recursos naturais como consequência da ausência de reciclagem

ii. Métodos orientados a mudança (*'changed-oriented'*): aproximação da Expansão de Sistema

Abordagem: O que aconteceria se o sistema de reciclagem fosse alterado?

- Aproximação para reciclo em circuito fechado (CLR)
- Método 50/50

Situações Multifuncionais: Processos com Open Loop Recycling (OLR)

Alocação em reciclo aberto (OLR) é um aspecto bastante debatidas em termos metodológicos
Os (vários) métodos propostos para tratar a questão podem ser classificados em:

i. Métodos baseados em argumentos de *'justiça'*

Abordagem: Que produto pode ser considerado 'responsável' pelas atividades **compartilhadas** de um sistema OLR?

- 'Cut-off'
- Perda relativa de qualidade
- Rejeito como consequência da extração de recursos naturais
- Extração de recursos naturais como consequência da ausência de reciclagem

ii. Métodos orientados a mudança (*'changed-oriented'*): aproximação da Expansão de Sistema

Abordagem: O que aconteceria se o sistema de reciclagem fosse alterado?

- Aproximação para reciclo em circuito fechado (CLR)
- Método 50/50

Processos com OLR: Método 'Cut-off'

Conceito:

- Apenas as cargas geradas diretamente por um produto lhe são atribuídas
- Para o método de cut-off não são necessários dados de fora do ciclo de vida do produto em estudo

Sistema 1: L_{V1}

Sistema 2: L_{R1}

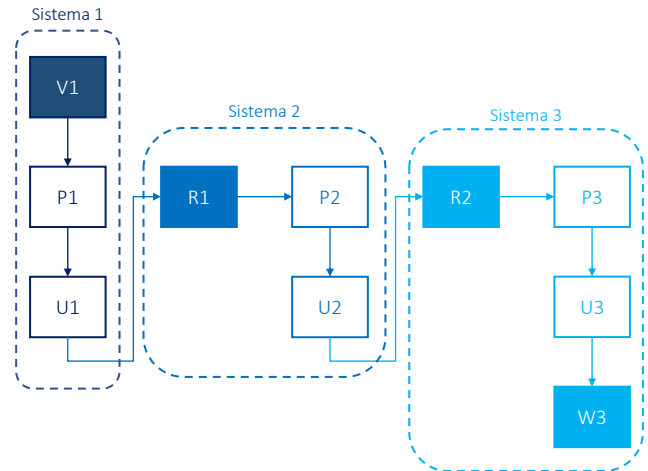
Sistema 3: $L_{R2} + L_{W3}$

Logo, as cargas totais (L_t) associadas a cada produto (ou à função que esse cumpre em cada situação) serão, respectivamente:

Sistema 1: $L_{t,1} = L_{V1} + L_{P1} + L_{U1}$

Sistema 2: $L_{t,2} = L_{R1} + L_{P2} + L_{U2}$

Sistema 3: $L_{t,3} = L_{R2} + L_{P3} + L_{U3} + L_{W3}$



Processos com OLR: Método de Perda de Qualidade

Conceito:

- A carga ambiental é atribuída a todos os produtos envolvidos no OLR de forma equitativa e em função da perda relativa de qualidade que ocorre em cada etapa
- É difícil medir a qualidade de um material usado em diferentes produtos em um OLR.
Ex.: Admitindo que o produto n.1 (∴ no sistema 1) seja garrafa PET, importam suas propriedades de barreiras.
Ao ser usado como material têxtil no sistema 2, passa a ser relevante sua elasticidade.
E se aplicado (depois) como combustível no sistema 3 seu Poder Calorífico será o fator determinante no caso em questão

- Assim, é provável que a única medida prática de qualidade em um sistema OLR seja o valor econômico (Q)

“O quanto a sociedade remunera (ou valoriza) cada binômio produto ⇔ função?”

- De qualquer forma, o método requer conhecimento e dados sobre todo o sistema de reciclagem. Além disso, há várias propostas para indicar os processos a serem alocados dessa maneira

Processos com OLR: Método de Perda de Qualidade

No exemplo, são divididas entre os três produtos as cargas de ditas não proprietárias (extração de recursos naturais, processos de reciclagem e gerenciamento de rejeitos)

$$\text{Sistema 1: } \left[\frac{Q_1}{Q_1 + Q_2 + Q_3} \right] (L_{V1} + L_{R1} + L_{R2} + L_{W3})$$

$$\text{Sistema 2: } \left[\frac{Q_2}{Q_1 + Q_2 + Q_3} \right] (L_{V1} + L_{R1} + L_{R2} + L_{W3})$$

$$\text{Sistema 3: } \left[\frac{Q_3}{Q_1 + Q_2 + Q_3} \right] (L_{V1} + L_{R1} + L_{R2} + L_{W3})$$

Nesse caso, as cargas totais (L_t) serão,

$$\text{Sistema 1: } L_{t,1} = L_{P1} + L_{U1} + \left[\frac{Q_1}{Q_1 + Q_2 + Q_3} \right] (L_{V1} + L_{R1} + L_{R2} + L_{W3})$$

$$\text{Sistema 2: } L_{t,2} = L_{P2} + L_{U2} + \left[\frac{Q_2}{Q_1 + Q_2 + Q_3} \right] (L_{V1} + L_{R1} + L_{R2} + L_{W3})$$

$$\text{Sistema 3: } L_{t,3} = L_{P3} + L_{U3} + \left[\frac{Q_3}{Q_1 + Q_2 + Q_3} \right] (L_{V1} + L_{R1} + L_{R2} + L_{W3})$$

