



Metodologia para Avaliação Ambiental de Unidades de Reciclagem Química de Compósito de Poliéster com Fibra de Vidro

Nina Palermo Döbereiner

Projeto de Final de Curso

Orientador:

Prof. Estevão Freire

Janeiro de 2018

**METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE UNIDADES
DE RECICLAGEM QUÍMICA DE COMPÓSITO DE POLIÉSTER
COM FIBRA**

Nina Palermo Döbereiner

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários para à obtenção de grau

Aprovado por:

Elen Beatriz A. V. Pacheco, Ds. C.

Lara Costa Barbora.

Adriana dos Anjos, Ds. C.

Orientado por:

Estevão Freire, Ds C.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Janeiro de 2018

Döbereiner, Nina Palermo

Avaliação da sustentabilidade de unidades de reciclagem de compósitos termoplásticos/ Nina Palermo Döbereiner. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2018

78p,;il

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2018.

Orientador: Estevão Freire

1. Reciclagem 2. Compósito polimérico 3. ACV 4. Monografia(Graduação EQ-UFRJ) 5. Estevão Freire, Dr.

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE UNIDADES DE RECICLAGEM QUÍMICA DE COMPÓSITO DE POLIÉSTER COM FIBRA

Nina Palermo Döbereiner

Janeiro,2018

Orientador: Estevão Freire, Dr.

Com o objetivo avaliar processos de reciclagem de compósitos poliméricos sob o ponto de vista ambiental, este trabalho traz uma metodologia que propõe comparar os processos de um mesmo patamar. A partir do levantamento de condições operacionais e desenhos dos sistemas na literatura,são realizadas simulações dos processos de reciclagem. Assim, a pesquisa desenvolve um inventário de ciclo de vida, que permite analisar os impactos ambientais da reciclagem de materiais compósitos poliméricos pelo método de análise de ciclo de vida (ACV).

Palavras-chave: reciclagem, compósito polimérico, ACV

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVO.....	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1	Materiais compósitos.....	12
3.1.1	Compósitos poliméricos reforçados por fibras	14
3.1.2	Distribuição do Consumo de Compósitos Poliméricos	17
3.2	Análise de Ciclo de Vida.....	20
3.2.1	Análise de Ciclo de Vida do Processo Reciclagem de Compósitos.....	23
3.3	Reciclagem de Compósitos Poliméricos	24
3.3.1	Distribuição da Reciclagem de Compósitos Poliméricos no Mundo	29
3.4	Incentivo para desenvolvimento sustentável do fim de vida de compósitos	30
4	METODOLOGIA.....	31
4.1	Obtenção de dados do Inventário de Ciclo de Vida	33
4.1.1	Metodologia de levantamento das condições operacionais dos processos.....	33
4.1.2	Metodologia das simulações.....	34
4.2	Avaliação dos impactos ambientais dos processos de reciclagem	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
5.1	Levantamento de dados para o ICV	38
5.2	Avaliação dos impactos ambientais.....	46
5.2.1	Individual	46
5.2.2	Comparativa	52
6	CONCLUSÃO.....	55
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	56
8	BIBLIOGRAFIA	57
	ANEXO I – PREMISSAS PARA BUSCA DE PUBLICAÇÕES.....	63
	ANEXO II – CONDIÇÕES OPERACIONAIS E ESCOPO DAS SIMULAÇÕES DOS PROCESSOS DE RECICLAGEM.....	64
	ANEXO III – DADOS BASE DO ICV PARA O SIMAPRO	73
	ANEXO IV – GRAFICOS DOS RESULTADOS DO ACV DO PROCESSO DE HIDROLISE ACIDA E DE GASEIFICAÇÃO.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 ilustração com as fases dos compósitos (8).....	12
Figura 2 Tipos de reforço: 1. Particulado 2. Fibras 3.Estrutural (12)	13
Figura 3 a) Cadeia polímero termoplástico b) Cadeia polímero termorrígido (20).....	16
Figura 4: Mercado europeu de compósitos reforçados por fibra de vidro em 2012 (23)	18
Figura 5: Análise do mercado brasileiro de compósitos termorrígidos Matriz Epóxi. 19	
Figura 6: Análise do mercado brasileiro de compósitos termorrígidos Matriz Poliéster e Éster-vinílica.....	19
Figura 7 Esquema Ciclo de Vida (28).....	20
Figura 8 Marcos de referência de uma análise de ciclo de vida (ACV)	21
Figura 9 Resumo das etapas consideradas na análise do ciclo de vida,	23
Figura 10 Fluxograma geral dos tipos de reciclagem.....	25
Figura 11 Fluxograma processos de reciclagem termoquímica	26
Figura 12 Fluxograma de reciclagem química.....	27
Figura 13 Fluxograma do campo de estudo.....	32
Figura 14 Metodologia de cálculo das quantidades de emissões equivalentes	36
Figura 15 Tabela resumida das condições simuladas na Glicólise	39
Figura 16 Fluxograma do processo de reciclagem via Glicólise (Hysys).....	40
Figura 17 Condições de entrada da simulação da pirólise	41
Figura 18 Fluxograma do processo de reciclagem via Pirólise (Hysys)	42
Figura 19 Condições de entrada da simulação da Hidrólise (condições supercríticas).....	43
Figura 20 Fluxograma do processo de reciclagem via Hidrólise (condições supercríticas) (Hysys).....	43
Figura 21 Condições de entrada da simulação da Hidrólise (ácida)	44
Figura 22 Fluxograma do processo de reciclagem via Hidrólise (ácida, HNO ₃) (Hysys)	44
Figura 23 Condições de entrada da simulação da Gaseificação.....	45
Figura 24 Fluxograma do processo de reciclagem via Gaseificação (Hysys);	45
Figura 25 Comparativo dos impactos ambientais equivalentes entre cenário I (com valorização) e cenário II (sem valorização) para a Glicólise.....	47

Figura 26 Representatividade dos parâmetros da glicólise nos impactos ambientais (Cenário I)	48
Figura 27 Comparativo dos impactos ambientais equivalentes entre cenário I (com valorização) e cenário II (sem valorização) para a pirólise	49
Figura 28 Representatividade dos parâmetros da pirólise nos impactos ambientais (Cenário I)	50
Figura 29 Comparativo dos impactos ambientais equivalentes entre cenário I (com valorização) e cenário II (sem valorização) para a hidrolise supercrítica.....	51
Figura 30 Representatividade dos parâmetros da hidrolise supercrítica nos impactos ambientais (Cenário I)	51
Figura 31 Comparativo dos resultados de acidificação aquática (kg SOeq)	53
Figura 32 Comparativo dos resultados de eutrofização aquática (kg PO ₄ P-lim)	53
Figura 33 Comparativo dos resultados de aquecimento global (kg CO ₂ eq)	54

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Tipos de fibra de vidro para reforço de compósitos	15
Tabela 2: Comparativo de propriedades dos tipos de fibra de vidro. (19)	16
Tabela 3 Tipos de valorização ou reaproveitamento de cada processo de reciclagem	37
Tabela 4 Resultado da pesquisa em patentes e artigos dos dados dos processos de reciclagem.....	38

NOMENCLATURAS

BHET :Tereftalato de bis-hidroxietila

DMT :Tereftalato de dimetila

PET :Polietileno tereftalato

TPA :Ácido tereftálico

EG :Etileno glicol

P-100 :Bomba

CRV-100 :Reator de Conversão

MIX : Misturador

E-101 :Trocador de Calor

VLV-100 : Válvula

X -100 : Separador

V-100 : Coluna Flash

K-100 : Compressor

T-100 :Coluna de destilação

FH-100 :Forno

1 INTRODUÇÃO

A busca de novos materiais ou combinação de materiais capazes de corresponder às novas necessidades tecnológicas tem impulsionado o desenvolvimento das ciências dos materiais nos últimos anos. Os materiais compósitos surgiram nesse contexto, a fim de conferir propriedades que podem ser ajustadas de acordo com a aplicação que será empregada ao material, garantindo ao mesmo tempo, por exemplo, rigidez, resistência mecânica e a corrosão, durabilidade e flexibilidade. Esta diversidade de propriedades é garantida através da combinação de tipos de componentes que podem ser utilizados como matriz, reforço e aditivos. O desenvolvimento de materiais compósitos ao longo das últimas décadas avançou de tal maneira nas ciências dos materiais que permitiu que passassem a substituir materiais metálicos e cerâmicos. (1)

A categoria mais importante de compósitos em termos de desempenho e variedade de aplicações é o de matriz polimérica, geralmente, constituído por uma resina polimérica como fase matriz e fibras como reforço. Estes compósitos apresentam propriedades mecânicas vantajosas à temperatura ambiente, baixo peso, bem como processos simples de fabricação e custo reduzido. Atualmente, os benefícios que os materiais compósitos poliméricos conferem incentivam o crescimento de novos mercados em setores como transporte, construção, corrosão, infraestrutura, elétrico, aeronáutico e aeroespacial. (2) (3)

Contudo, hoje, os compósitos poliméricos são considerados um dos grandes causadores de problemas ambientais, já que, até o momento não foram desenvolvidas soluções eficientes em escala mundial para o fim de vida deste material. Após o período de vida útil dos compósitos, comumente, os materiais são dispostos em aterros sanitários, levando centenas de anos para se decompor e interferindo de forma negativa nos processos de estabilização biológica e de compostagem. (2) (3)

Vários aspectos são motivadores para a reciclagem e utilização desses polímeros contidos nos resíduos sólidos urbanos, tais como, a preservação de fontes esgotáveis de matéria prima, economia de energia, redução de custos com disposição final do resíduo, o aumento da vida útil dos aterros sanitários, a recuperação de áreas impactadas pelo mau acondicionamento dos resíduos e principalmente redução de gastos com a limpeza e saúde públicas e a geração de emprego e renda. (3)

Sendo assim, torna-se cada vez mais necessário a busca por soluções para o fim de vida dos materiais, e, especificamente, de materiais compósitos poliméricos.

Alguns países, como a Inglaterra e a Alemanha, iniciaram investigações para reuso e reciclagem deste material. No entanto, grande parte desta busca ainda não resultou em processos em escala industrial. Existem poucas usinas no mundo que reciclam o material, reaproveitando o calor emitido pela decomposição da resina. O reforço, como é comprometido pelo alto calor, não pode ser recuperado e é descartado como resíduo sólido. A reciclagem mecânica e o reuso do material a partir da utilização em outros materiais como carga no processo já é mais empregado e difundido, mas não extingue o problema como um todo. (2)(3)(4)

Entretanto, existem soluções em estudo que são capazes de aproveitar mais os componentes do material e impactar menos o ambiente com emissões de gás e descarte de resíduos ou efluentes não tratados. Estes novos processos, como a solvólise e gaseificação, seguem em escala laboratorial ou piloto e estimulam o reaproveitamento das fibras para que sejam rentáveis financeiramente. Os objetivos destes métodos são recuperar a energia liberada ao longo do processo e os componentes que estão presentes na corrente de saída, tratar possíveis emissões de poluentes e garantir um fim de vida sustentável para os compósitos poliméricos. (5)

Em todo caso, é necessário avaliar os impactos ambientais que os processos de reciclagem geram para concluir se realmente são eficientes quando analisados numa escala mais global, mesmo considerando um caminho sustentável.

A análise de ciclo de vida (ACV) é uma metodologia que avalia os impactos ambientais que um processo ou um produto geram. Por meio de ACV é possível mensurar e avaliar os processos de reciclagem de compósitos polímeros estudados que podem ser mais vantajosos ambientalmente. No entanto, para realizar um ACV precisa-se de informações de balanços de massa e energia que não são encontrados facilmente na literatura para o caso destes processos. Um recurso para garantir dados que possam ser comparados por terem mesmo nível de maturidade e mesma base é a modelagem dos processos. (6)

A fim de simplificar a modelagem, existem programas que simulam os processos e geram os dados necessários para inserir na análise de ciclo de vida e sanar alguns questionamentos sobre os impactos ambientais dos processos de reciclagem de compósitos poliméricos. (6)

2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo principal desenvolver uma metodologia para avaliar processos de reciclagem de compósitos poliméricos sob o ponto de vista ambiental.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Materiais compósitos

Materiais compósitos podem ser classificados como qualquer material com dois ou mais componentes com propriedades físico-químicas distintas e não miscíveis. Em sua maioria, os compósitos são produzidos a partir de dois elementos: a matriz (fase contínua) e o reforço (fase dispersa), como ilustrado na Figura 1. Comumente, o objetivo da matriz é proteger o reforço do ambiente externo, evitando que o material disperso entre em contato com meios ácidos ou corrosivos. Além de garantir que o reforço se mantenha bem distribuído, a fase contínua é capaz de passar a tensão para a fase dispersa. O reforço por sua vez fornece a rigidez e resistência do compósito; logo, quanto maior a quantidade de partículas de reforço mais resistente será o material final. (7)

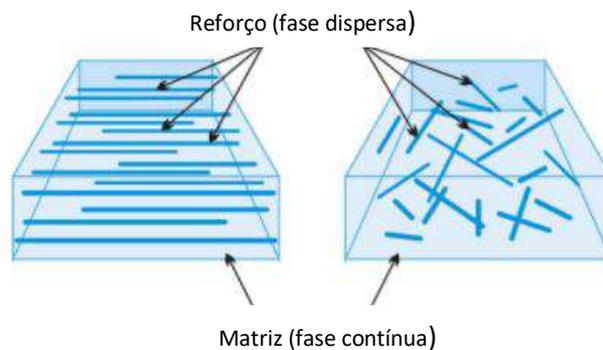


Figura 1 ilustração com as fases dos compósitos (8)

O principal atrativo dos compósitos é a uma excelente relação entre massa, estrutura, flexibilidade de projeto e resistências destes materiais. Ademais, propriedades de fadiga são geralmente melhores para compósitos do que para metais aplicados na engenharia, bem como a dureza. (9)

As propriedades dos compósitos dependem tanto da matriz, que podem ser poliméricas, metálicos ou cerâmicos, quanto da quantidade, do tamanho, da forma e da dispersão do reforço. Os reforços podem ser particulados (partículas grandes ou dispersas), fibrosos (fibras longas ou curtas) ou estruturais (laminados). (10)

O reforço, além de proporcionar certa resistência ao calor, à condução e/ou à corrosão, garante a rigidez. É o componente descontínuo do material compósito e em regra deve ser mais resistente do que a matriz que o reveste. Os principais tipos de reforço são particulados, fibrosos ou estruturais (laminares) e estão exemplificados na Figura 2. (11)

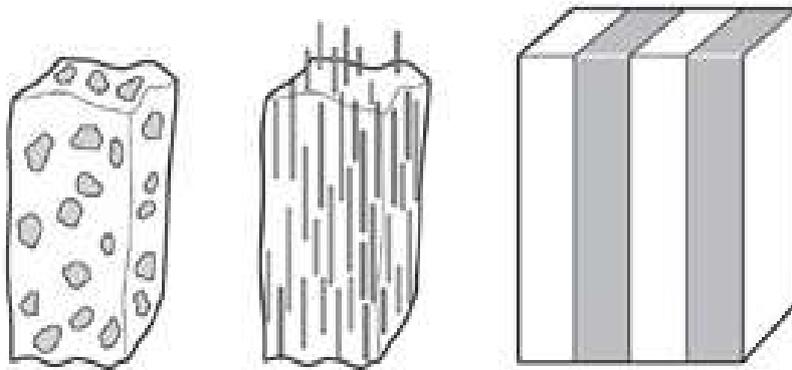


Figura 2 Tipos de reforço: 1. Particulado 2. Fibras 3. Estrutural (12)

A matriz do compósito protege o reforço do meio ambiente e danos físicos e contribui na resistência do compósito a altas temperaturas e na condução de calor e eletricidade. As matrizes podem ser classificadas em três tipos: metálica, cerâmica e polimérica. (13)

- **Metálica:** os metais mais comuns utilizados são ligas leves de alumínio, magnésio e titânio. Este tipo de matriz confere condutividade elétrica, ductilidade, alta rigidez e resistência. Estas ligas são comumente utilizadas quando na aplicação é necessário expandir a faixa de temperatura de uso, como em motores de carros e pás de turbinas. No entanto, devido a sua complexidade de produção e relativamente alta densidade, são matrizes menos empregadas.

- **Cerâmica:** os constituintes mais comuns são a alumina (Al_2O_3), sílica (SiO_2) e outras substâncias inorgânicas não metálicas presentes na natureza. Uma combinação metal/ intermediário de metal e um não metal com ligações iônicas ou covalentes representam sua formação. Este tipo de matriz é utilizado para aplicações em altas temperaturas, por ser resistente à corrosão e oxidação, duro e forte. No entanto, é quebradiço e de complexa fabricação, o que limita sua utilização.
- **Polimérica: são usados polímeros termoplásticos e termorrígidos.** Polímeros termorrígidos apresentam uma formação reticulada e ramificada, ou seja, formação de ligações entre a cadeia polimérica principal que fixa o polímero em uma cadeia tridimensional, limitando o movimento. Polímeros termoplásticos são mais simples, com cadeias lineares ou ramificadas, variando sua rigidez com a temperatura. A matriz polimérica é vastamente utilizada devido à simplicidade no processamento e baixa densidade. (13)

Os maiores direcionadores para o crescimento de demanda de compósitos poliméricos no mercado global são a busca por meios de transporte mais leves e eficientes, construções novas e manutenções de construções com materiais mais eficientes e crescente demanda por energia eólica. (14) (15)

Notavelmente, existe um enorme potencial para este crescimento de demanda de compósitos poliméricos do mercado global. Estes compósitos possuem apenas uma pequena porcentagem de quatro dos seis maiores mercados globais, comparado ao alumínio e ao ferro. No setor da marinha, de turbinas eólicas e de bens de consumo, a aplicação de compósitos poliméricos representa em torno de 68%, 38% e 14%, respectivamente. (16).

3.1.1 Compósitos poliméricos reforçados por fibras

As fibras de reforço dos materiais compósitos podem ser cerâmicas, metálicas, de carbono, dentre outras. No entanto, para o caso de compósitos poliméricos, utilizam-se as fibras de carbono e vidro.

As fibras de carbono são as mais empregadas pelos materiais compósitos de alto desempenho para as aplicações do setor aeronáutico. Podem se apresentar em distintas formas (fibras longas, curtas, entrelaçadas e etc.) e se caracterizam por uma alta resistência ao estiramento e alto módulo de elasticidade (rigidez). Estas fibras são consideradas as de maior custo encontradas no mercado atual. (17)(18)

Em contrapartida, as fibras de vidro constituem os reforços mais utilizados nos compósitos de grande difusão. São formuladas a partir de minerais de acordo com normas internacionais e com o decorrer dos anos, novas fórmulas são lançadas para atenderem a requisitos específicos de propriedades, como resistência alcalina, resistência à corrosão, módulo de elasticidade diferenciado e etc. (19)

As fibras de vidro podem ser diferenciadas pelo enredamento dos filamentos (de acordo com a proximidade dos filamentos) e o tamanho. A seguir, a Tabela 1 descreve um pouco mais os tipos de fibra de vidro, suas aplicações e propriedades.

Tabela 1 Tipos de fibra de vidro para reforço de compósitos

Tipos de Fibra	Características	Aplicação
Vidro E	Boas propriedades dielétricas e mecânicas	Fibras de reforço - convencional
Vidros S, R, HPG	Propriedades mecânicas superiores ao vidro "E"	Fibras de alto desempenho
Vidro Advantex	Maior vida útil em ambientes corrosivos e boas propriedades mecânicas	Resistência a corrosão
Vidro AR	Resistência alcalina, possibilita redução de espessura em concretos	Fibras para construção Civil

Estes vidros diferem suas formulações através da alteração de componentes e sua concentração. A Tabela 2 apresenta algumas propriedades de diferentes tipos de fibras de vidro. A fibra de vidro do tipo E, por mais que apresente menor resistência a tração e módulo de elasticidade, é um tipo de reforço que compensa este *deficit* pelo baixo custo. (17) (18)

Propriedades	Un	Vidro E	Vidro Advantex®	Vidro S
Densidade	g/cc	2,58	2,72	2,46
Ponto de Amolecimento	°C	846	882	1056
Resistência à Tração (22°C)	MPa	3445	3445	4585
Módulo de Elasticidade	GPa	81	82	89

Tabela 2: Comparativo de propriedades dos tipos de fibra de vidro. (19)

Dentro da gama de compósitos poliméricos existentes no mercado, as matrizes mais utilizadas são as resinas termoplásticas e termorrígidas. As matrizes termorrígidas são geralmente mais duras, fortes e frágeis do que as termoplásticas, e possuem melhor estabilidade dimensional. Na Figura 3, são descritas as cadeias poliméricas termoplásticas e termorrígidas para exemplificação da diferença de complexidade.

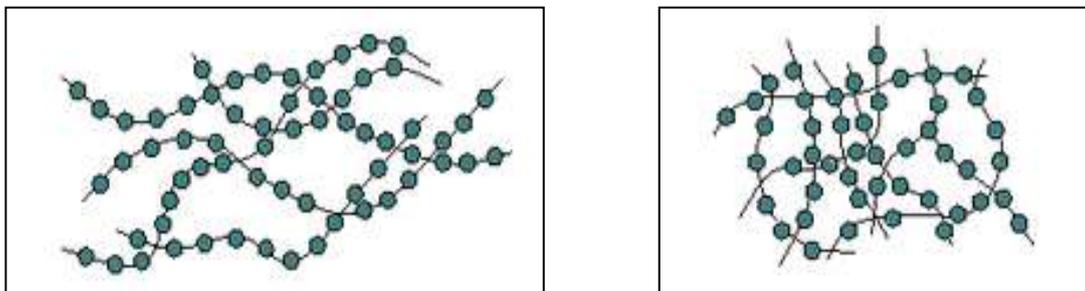


Figura 3 a) Cadeia polímero termoplástico b) Cadeia polímero termorrígido (20)

Os polímeros termoplásticos caracterizam-se por cadeias mais lineares com ramificações eventuais e flexíveis (Ex.: PE, PP, PVC, etc.) que geram características de uma cadeia relativamente dúctil e mole. Com o aumento da temperatura e pressão, o polímero amolece, assumindo a forma do molde, sendo também reciclável da mesma forma. (21)

Já os termorrígidos são compostos por cadeias poliméricas com ligações cruzadas (reticulados), que ajudam a resistir aos movimentos vibracionais e

rotacionais da própria cadeia em temperaturas elevadas. Após sua moldagem, uma alteração de temperatura e pressão não faz efeito algum, tornando-os materiais insolúveis, infusíveis e não recicláveis. Como exemplos, tem-se o epóxi, algumas resinas de poliéster, etc.(21)

Sendo assim, os compósitos a base de matriz termoplástica são reciclados mais facilmente, pois são solúveis em certos solventes permitindo que sejam remodelados ou tenham extraídos seus monômeros iniciais. Contrariamente aos termorrígidos, que devido à cadeia reticulada, são mais complexos para os processos de reciclagem.

Entretanto, ainda se faz necessário a busca por uma solução de custo e dimensionamento industrial para ambos os tipos de reciclagem de compósitos poliméricos, independentemente de sua complexidade. Esta quebra de limitantes justificaria ainda mais o crescimento industrial e o investimento em pesquisa e desenvolvimento neste domínio. (22)

3.1.2 Distribuição do Consumo de Compósitos Poliméricos

Os compósitos reforçados por fibras de vidro, que são mundialmente predominantes no mercado global, têm expectativa de atingirem 9.3 bilhões de USD até 2022, com um crescimento anual de 4,5% desde 2016. O crescimento nas indústrias de construção, desenvolvimento de infraestrutura, automóveis e o desenvolvimento de infraestruturas de águas e esgoto são norteadores do mercado de fibra de vidro. A demanda de energia limpa ajudará globalmente na demanda de compósitos com fibra de vidro.(16)

Ademais, com a expansão da capacidade de produção, um maior número de companhias desenvolve fibras de vidro mais avançadas com maior resistência à tração, temperatura e elasticidade. No mercado de energia eólica, o aumento da dimensão da pá exige um material de alto desempenho que combine baixa densidade e alta rigidez. Na Figura 4, descreve-se a distribuição na Europa em 2012 do mercado de consumo de compósitos reforçados por fibra de vidro que é majoritariamente representado pelo setor de construção e de transporte.

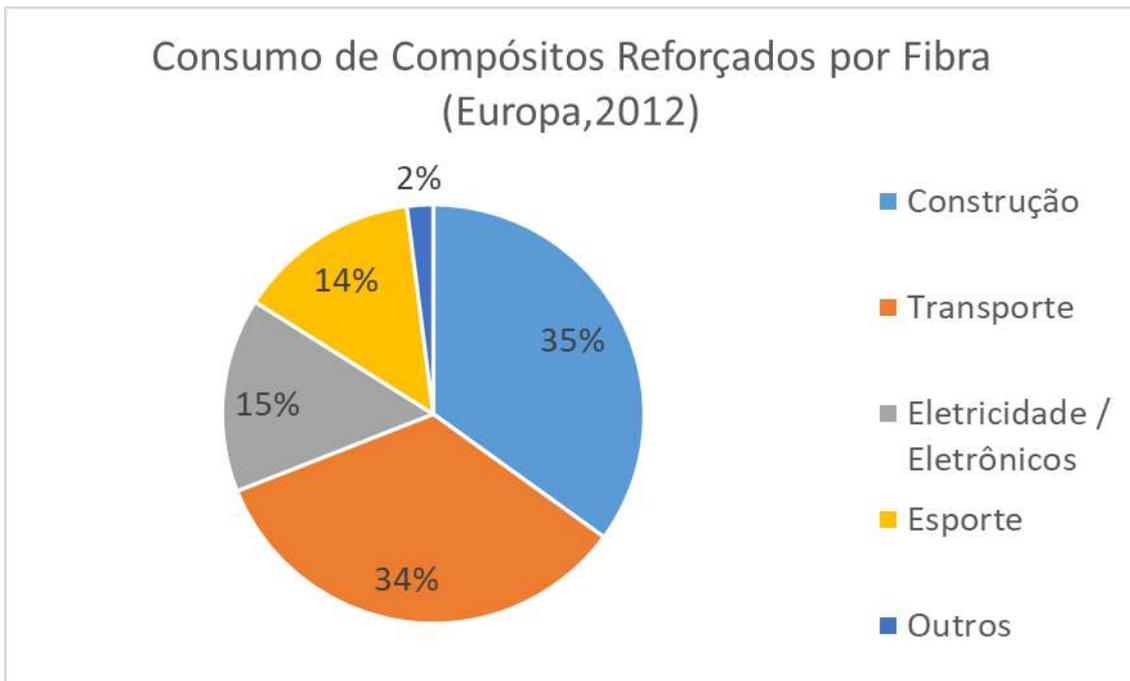


Figura 4: Mercado europeu de compósitos reforçados por fibra de vidro em 2012 (23)

Em 2016, a demanda global de compósitos reforçados por fibras de carbono (CRFC) cresceu 12%, seguindo consistentemente o perfil dos dois anos anteriores. Os mercados que conduzem este aumento de produção são as indústrias aeroespaciais, de energia eólica e de veículos. (14)

Apesar de grande parte das discussões de mercado e tecnologia de compósito se voltar para os tipos de fibras, as resinas são tão importantes quanto, quando ligadas ao desempenho do material. As resinas termorrígidas, que garantem propriedades mecânicas e de resistência química superiores, estão presentes no Brasil majoritariamente nos setores de construção civil, energia eólica e transporte, como representado nos gráficos das Figuras 5 e 6 abaixo. (14) (24)

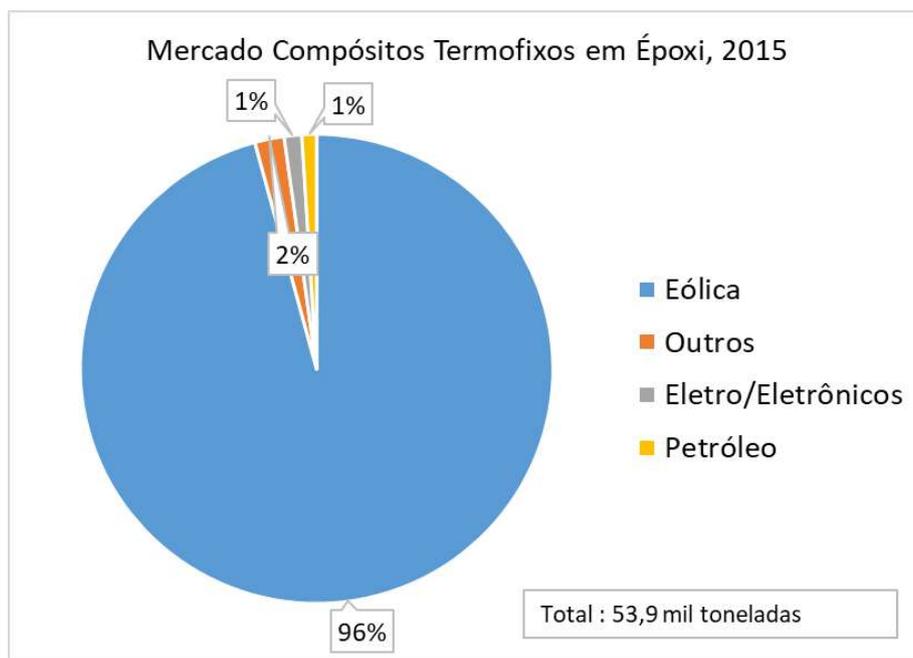


Figura 5: Análise do mercado brasileiro de compósitos termorrígidos Matriz Epóxi.

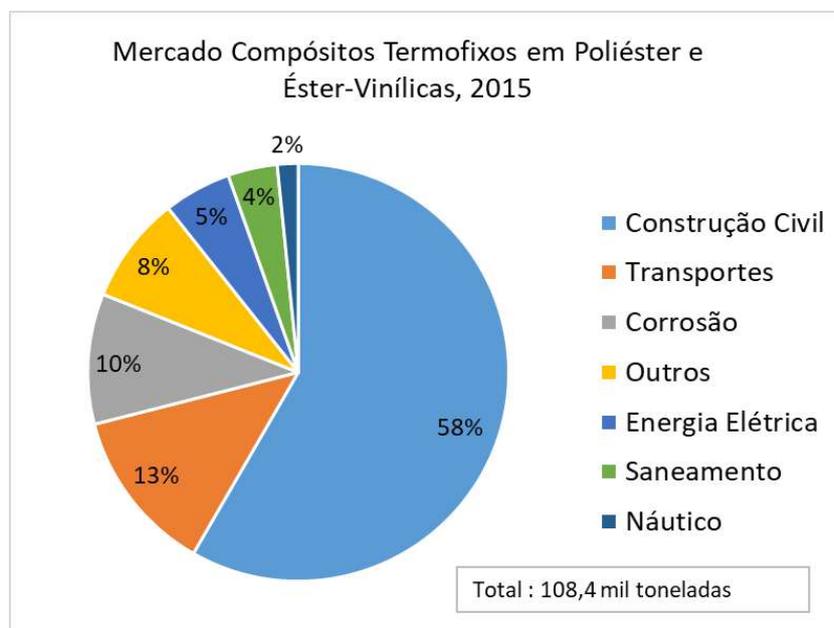


Figura 6: Análise do mercado brasileiro de compósitos termorrígidos Matriz Poliéster e Éster-vinílica.

Já a adoção de termoplásticos foi mais cautelosa devido a certo conservadorismo na qualidade do material. No entanto, por conta dos avanços tecnológicos nos processos de produção e benefícios como potencial de reciclageme custo, certos compósitos termoplásticos de alto desempenho estão competindo com os termorrígidos e ganhando território em aplicações estruturais e de interior. (20)

Entretanto, considerando o cenário de todos os tipos de compósitos poliméricos, o Brasil em 2016, apresentou uma queda de 28% em sua produção, que representa 66,5 mil toneladas de material processado. Segundo a ALMACO (Associação Latino Americana de Materiais Compósitos), como os compósitos são consumidos especialmente no setor do transporte (ônibus e tratores) e construção, que passam atualmente por uma crise (25) já era prevista esta queda. Inclusive o setor de energia, que estava imune à crise, sofreu declínio. No entanto, a perspectiva global é de grande crescimento e desenvolvimento deste setor nos próximos anos.(25)

3.2 Análise de Ciclo de Vida

A análise de ciclo de vida (ACV) é uma metodologia que permite avaliar os critérios ambientais de um produto, serviço ou sistema pelo levantamento de cada etapa de seu ciclo de vida. O ciclo de vida por sua vez é o conjunto de todas as etapas que um produto passa para cumprir sua função na cadeia produtiva. A Figura 7, resumidamente, apresenta o ciclo de vida de compósitos, desde a matéria prima até a disposição final ou reuso.(26)(27)



Figura 7 Esquema Ciclo de Vida (28)

O ciclo de vida é habitualmente segmentado em algumas etapas: extração da matéria prima, diferentes fases de transporte, utilização do produto, serviço ou processo e o fim de vida. Com a coleta de dados destas fases, é possível quantificar os impactos ambientais a partir das emissões tóxicas e poluentes equivalentes de cada etapa. Isto permite analisar e eventualmente propor melhorias para cada etapa de ciclo de vida com o objetivo de minimizar os impactos ambientais, o que seria a análise de ciclo de vida (ACV) propriamente dito. Os maiores objetivos da indústria com a aplicação do ACV são o desenvolvimento de produtos mais sustentáveis, a avaliação estratégica de produtos frente a concorrentes, a análise de alternativas para redução de impactos dentro da cadeia de valor, o maior conhecimento do processo produtivo, a gestão da cadeia produtiva, o atendimento às exigências de mercados e legislações internos e externos, a melhoria da imagem do setor frente à sociedade (Marketing verde), a elaboração de relatórios de sustentabilidade (Ex.: Global Initiative Reporting – GRI) e a criação de rótulos ambientais (E.x: Declarações Ambientais de Produto – DAP).

A norma que define o ACV é a ISO 14040, fundamentada nos conceitos e princípios do Guia do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP), que é apresentada em quatro etapas (Figura 8): a definição do objetivo e campo de estudo, o inventário de ciclo de vida, a avaliação e a análise dos impactos e a interpretação destes dados.(26)(29)

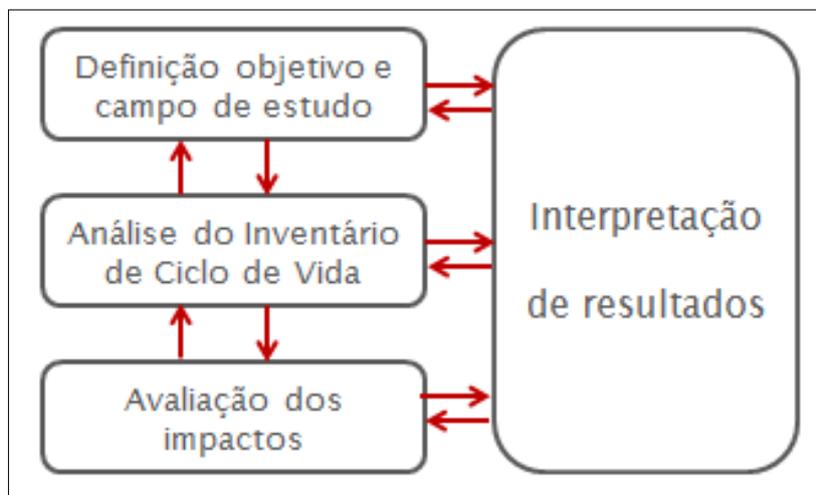


Figura 8 Marcos de referência de uma análise de ciclo de vida (ACV)

- A definição dos objetivos e do campo de estudo consiste em definir os objetivos da análise, do perímetro e os limites do sistema, da unidade operacional e as hipóteses que serão consideradas em função da disponibilidade de dados. A unidade operacional deve ser definida coerentemente com os objetivos e será utilizada como a unidade de base para os cálculos do ACV.
- O inventário de ciclo de vida é a descrição quantitativa do fluxo de material, energia e poluentes que atravessam o sistema. É obtido geralmente a partir da coleta de dados em bases bibliográficas, experimentais ou industriais. No entanto, a coleta das informações de balanços de massa e energia, quando não disponíveis, estima-se uma média dos números o que gera avaliações não tão satisfatórias. Sendo assim, é necessário um esforço para garantir o uso de dados homogêneos, ou seja, que tenham o mesmo nível de maturidade e precisão nos distintos processos avaliados.
- A avaliação dos impactos consiste na conversão dos balanços de massa e energia do sistema em emissão equivalente de poluentes ou agentes tóxicos (emissão de Co_x , SO_x , etc.) para cada impacto ambiental (acidificação aquática, eutrofização aquática, aquecimento climático, etc.). Esta transcrição pode ser feita a partir de programas computacionais como o SimaPro, que utiliza métodos de normalização como o Impact 2002, CML 2 Baseline, etc. para calcular os valores equivalentes. A lógica de cálculo dos impactos é dividida em categorias e as substâncias que entram e saem que tenham um efeito similar são reagrupadas numa categoria intermediária de impacto. Estas categorias intermediárias são atribuídas a uma ou mais categorias de dano.
- A interpretação de resultados permite a análise dos dados obtidos pela avaliação dos impactos em função dos objetivos e do campo de estudo definidos na primeira etapa. As conclusões são realizadas baseadas dos resultados da avaliação, das hipóteses formuladas, da qualidade dos dados e de um estudo de sensibilidade dos resultados. Em seguida, é possível formular melhorias para o sistema buscando solução que permitam a diminuição de poluentes e, assim, dos impactos ambientais.

No caso desta análise de ciclo de vida, foi selecionado como campo de estudo o processo de reciclagem dos compósitos reforçados com fibra, o inventário do ciclo de vida será feito a partir dos processos de reciclagem e suas emissões, a

avaliação dos impactos se concentrará nas consequências das emissões dos processos e a partir disso realizar a interpretação de dados, como resumido na Figura 9.

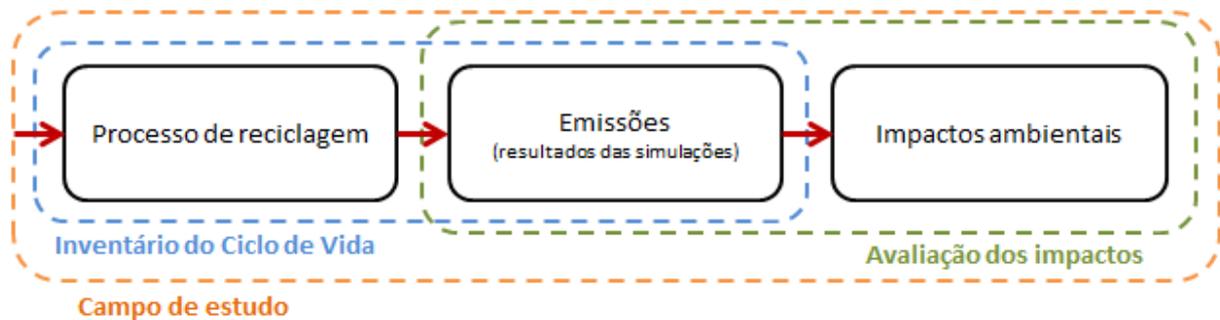


Figura 9 Resumo das etapas consideradas na análise do ciclo de vida,

3.2.1 Análise de Ciclo de Vida do Processo Reciclagem de Compósitos

Mesmo que os métodos de reciclagem de compósitos vêm sendo investigados há mais de 20 anos, apenas poucas análises de ciclo de vida foram efetivas para o fim de vida de compósitos. Estudos comparam os impactos ambientais entre a reciclagem de compósitos e metais e sua utilização pós-reciclagem. (30)

Em comparação a metais reciclados, o compósito reciclado normalmente é mais favorável ambientalmente quando reutilizado no setor de transportes. Entretanto, a fase de produção do compósito consome elevada quantidade de energia, comparado aos metais que são facilmente reciclados. Conseqüentemente, o uso de compósitos poliméricos se torna vantajoso apenas quando a economia na etapa de uso for maior do que o custo nas fases de produção e fim de vida. (30)

Uma análise entre os tipos de reciclagem já operados em escala industrial com reuso dos materiais concluiu que incineração com recuperação energética tem menor impacto ambiental em relação à disposição em aterro. Entretanto, a reciclagem mecânica é mais vantajosa que incineração, quando o composto reciclado é reutilizado em substituição de compósitos virgens. (31)

O mesmo estudo de 2013 descreve os próximos desafios para um menor impacto ambiental: desenhar de forma mais alinhada a cadeia de reciclagem de compósitos como um todo, a interpretação das respostas de aplicações dos compósitos reciclados e a otimização dos processos em escala industrial. (30)

Estudos posteriores compararam os tipos de reciclagem em nível de consumo energético, em que a reciclagem via pirolise se mostrou mais vantajosa do que a mecânica. Entretanto, a análise de ciclo de vida não foi completa por não apresentarem dados suficientes na literatura de cada processo estudado sobre compósitos. Ainda é ressaltado que para a realização da análise de ciclo de vida consistente é necessária uma base de dado de balanço de energia e massa coerente, como a do programa SimaPro, EcolInvent. No entanto, nestes programas computacionais há apenas as informações de impactos ambientais da produção de compósitos e não de sua reciclagem. Sendo assim, se faz necessário introduzir os dados de balanço de energia e de massa para a obtenção de resultados para a análise de ciclo de vida de processos de reciclagem de compósitos. (32)

3.3 Reciclagem de Compósitos Poliméricos

De acordo com a tendência de cultura, legislação e desenvolvimento sustentável, o setor industrial apresenta uma grande necessidade de encontrar novas soluções seguras e duráveis para a gestão de resíduos. Projetos na Europa como RECYCOMP, RECO, FENICS e outros foram criados pelas indústrias e instituições públicas para estimular e desenvolver soluções neste tema. Estes projetos suportam pesquisas de soluções em torno da coleta, do desmantelamento, da triagem e de processos de reciclagem de materiais compósitos em fim de vida. (33)

O fim de vida dos materiais pode ser direcionado para o reuso, o descarte ou a reciclagem. Os processos de reciclagem constituem um dos domínios mais estudados atualmente como perspectiva de valorizar os coprodutos, a energia e as fibras presentes nos compósitos e assim aproveitar a concepção de novos materiais.

A reciclagem de polímeros e compósitos poliméricos pode ser classificada em quatro categorias diferentes: primária, secundária, terciária e quaternária, resumidas na Figura 10. Os tipos de reciclagem primária e secundária consistem numa mistura de resíduo triado e selecionado com matéria prima virgem para gerar um novo material. A diferença entre reciclagem primária e secundária consiste na qualidade do produto obtido. No primeiro caso, as propriedades intrínsecas do material são equivalentes as de um material virgem. No segundo caso, uma diminuição da qualidade poderá ser observada, mas as condições de triagem e seleção dos resíduos serão amenizadas. Estes dois tipos de indústria podem ser classificados na categoria de reciclagem mecânica, em que a separação de impurezas e contaminantes é realizada após o material ser triturado. Nestes processos, as fibras sofrem uma queda

relevante de comprimento e podem ser reutilizadas como reforço de novos materiais compósitos.(34) (35).

A reciclagem terciária consiste na decomposição química da matriz orgânica polimérica, é composta de processos de reciclagem químicos e termoquímicos, como citado anteriormente. A ruptura da ligação carbono-carbono da resina e a recuperação das fibras de reforço acontecem devido à ação do solvente (solvólise) ou gaseificação (termólise). (23)

Em função das condições operacionais, os produtos obtidos poderão ser valorizados como matéria prima (base para produção de outro produto final) ou energia. As fibras serão recuperadas com possíveis perdas de propriedade mecânica e de superfície de acordo com as condições da reação e a natureza do solvente empregado. Os materiais assim reciclados poderão ser reutilizados como novo material ou adicionados ao material virgem. Este tipo de metodologia de reciclagem é o mais interessante e promissor caminho para recuperar as fibras de melhor qualidade, no entanto, é igualmente o mais complexo e custoso de implantar em escala industrial. (19) (35).

A reciclagem quaternária consiste na recuperação de energia do material compósito por incineração e depende diretamente do poder calorífico da resina e da fibra. Os processos de incineração e co-incineração de compósitos, para alguns estudos, não são mais considerados métodos de reciclagem, haja vista que as propriedades mecânicas das fibras são fortemente alteradas e os impactos das emissões dos rejeitos e resíduos do processo são altos.(19) (35).

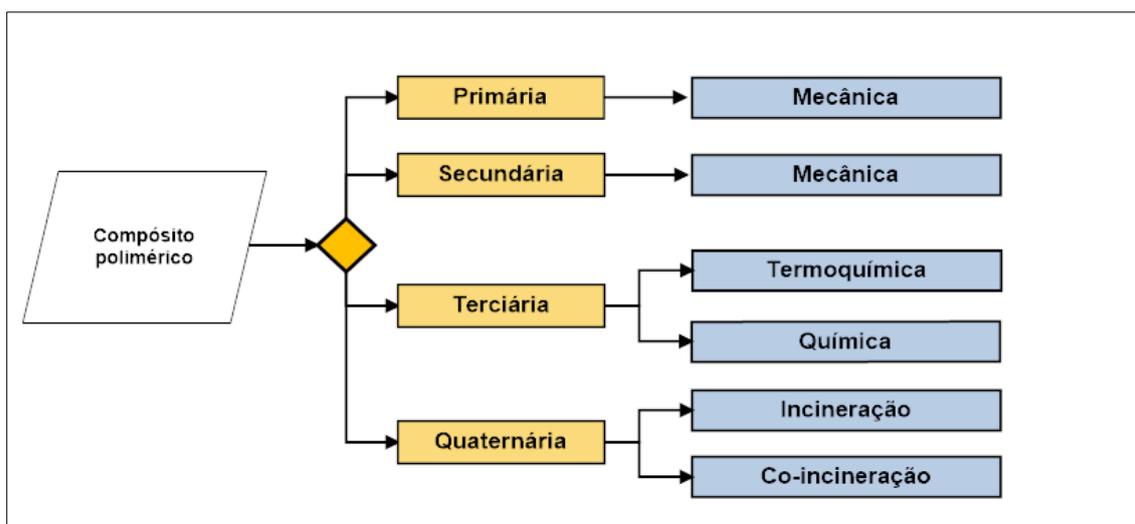


Figura 10 Fluxograma geral dos tipos de reciclagem

Sendo assim, os trabalhos de pesquisa e inovação se concentram essencialmente em torno dos processos de reciclagem terciários (químicos e termoquímicos). As principais soluções de reciclagem e valorização energética de compósitos a base de matriz orgânica estão resumidas abaixo nas Figuras 11 e 12 e discutidas a seguir. As fontes de dados para a montagem destes diagramas foram as mesmas utilizadas para a simulação dos processos propostos em seguida, no Anexo II está o resumo das mesmas. (19) (35)(32)

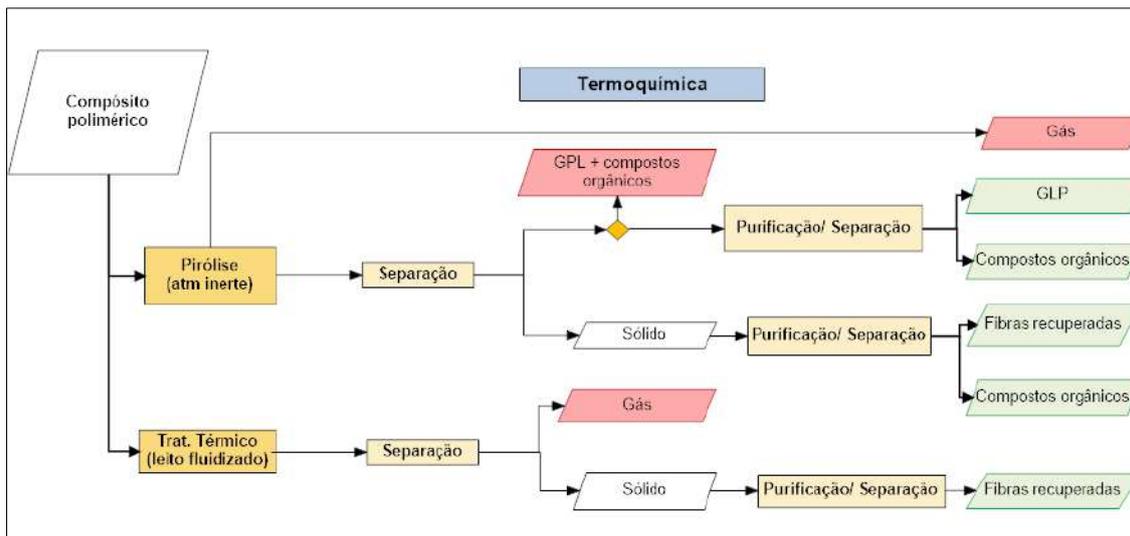


Figura 11 Fluxograma processos de reciclagem termoquímica

Dentre os processos termoquímicos (Figura 11), os mais estudados são a pirólise em atmosfera inerte, tratamento térmico em leito fluidizado e em sal fundido que consistem na decomposição térmica da matriz orgânica do compósito. A matriz orgânica, em alguns casos, pode ser valorizada a coprodutos diversos após a separação e purificação dos produtos decompostos (gás e óleos, principalmente) ou também energeticamente pela combustão da matriz. Entretanto, pela ação destes processos com a utilização do calor (temperaturas entre 300 e 700°C), as fibras recuperadas perdem de 5 a 25% de suas propriedades mecânicas.(35) (36)

A pirólise é uma decomposição térmica da matriz orgânica do compósito em alta temperatura (300-800°C) e em ausência de oxigênio fornecido do exterior. A atmosfera inerte (geralmente, N₂) e o tempo de residência no reator permitem o controle da despolimerização com o objetivo de eliminar totalmente a resina das fibras. No caso de resina poliéster do tipo PET, as condições operacionais são relativamente

suaves (600°C) e os produtos obtidos são essencialmente gases e óleos. As fibras podem também ser recuperadas com uma perda mecânica de 10 a 20%. Um reator contínuo ou em batelada pode ser utilizado para o processo. Há a possibilidade inserir no processo de pirólise do compósito, plásticos de resina similar para aumentar a recuperação energética.

A gaseificação em reator de leito fluidizado é um processo de despolimerização térmica, que consiste em decompor a matriz orgânica por simples ação do calor (entre 500 a 600°C). A presença de silício no reator possibilita a fluidização do meio reacional e favorece as trocas de calor, o que permite uma taxa de quase 100% de conversão. Os produtos na saída neste tipo de processo são, sobretudo, hidrocarbonetos leves, como o gás, e o calor. Similarmente ao caso da pirólise, as fibras recuperadas sofrem uma perda significativa de suas propriedades mecânicas, em torno de 25 a 30%.

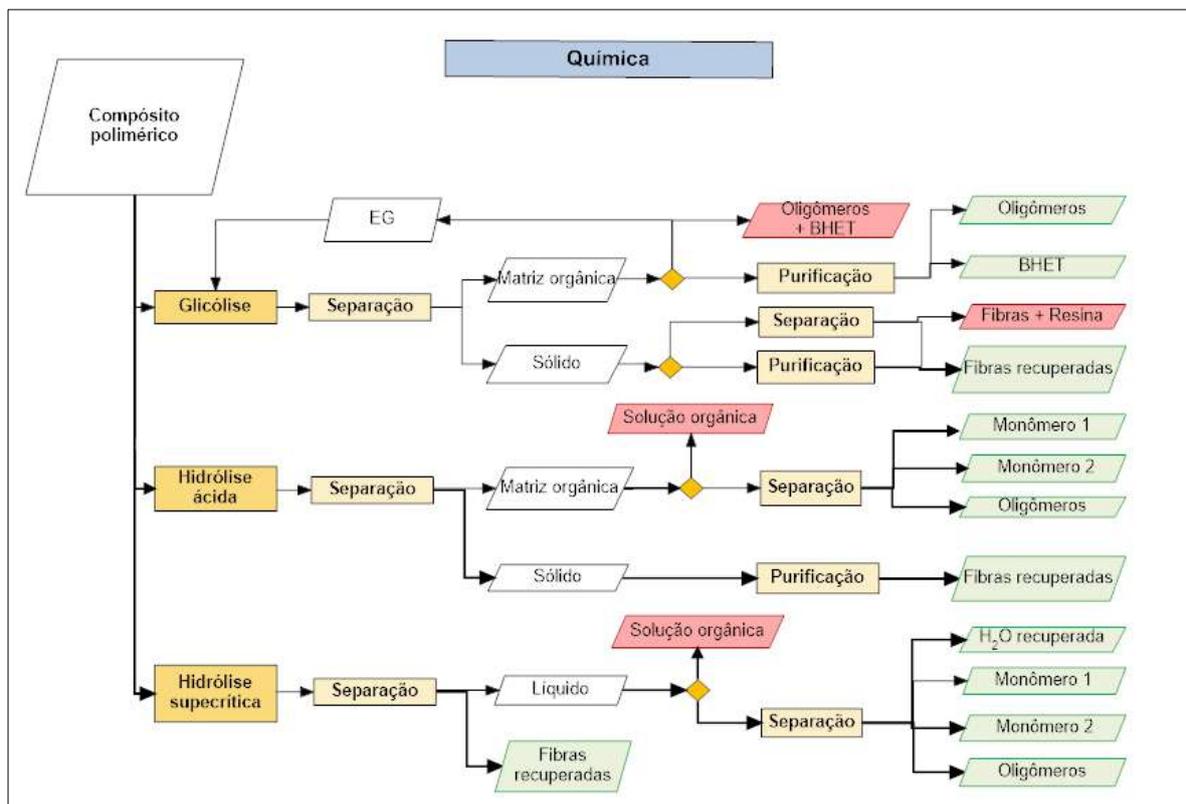


Figura 12 Fluxograma de reciclagem química

A recuperação por soluções químicas (Figura 12) se concentra em torno de processos de solvólise como a glicólise, que se dá pela ação de dióis, ou a hidrólise, que decompõe em presença de água com aditivos (HNO₃, C₂H₅OH, etc.) ou em condições sub ou supercríticas. As possíveis valorizações são a recuperação de compostos, seja de monômeros iniciais como o ácido tereftálico e o etileno glicol de

uma resina de poliéster do tipo polietileno tereftálico (PET) como de oligômeros intermediários (BHET, DMT e etc.). Nos casos de processos químicos, as fibras recuperadas apresentam uma perda de propriedade mecânica mais sutil (entre 1 e 5%) do que com os processos termoquímicos em razão das condições operacionais mais suaves.(35) (36)

A glicólise consiste em decompor uma matriz orgânica de um compósito pela ação de polióis. No caso de uma resina poliéster do tipo PET, os produtos gerados são majoritariamente o BHET (tereftalato de bis-hidroxietila, subproduto da decomposição) e oligômeros (um finito número de unidades de monômeros). A reação ocorre a 230°C a pressão atmosférica em reator contínuo ou em batelada com uma taxa de conversão de 50 a 80% em função das condições operacionais aplicadas e do catalisador utilizado. A reação estando incompleta, permitirá que traços de matriz orgânica fiquem sobre a fibra de reforço. Assim, um pós-tratamento térmico, que consiste em queimar os resíduos orgânicos, é recomendado. Como a quantidade do material restante é pequena, as propriedades mecânicas das fibras não serão muito alteradas visto que a liberação de calor será reduzida.

A hidrólise, em condições sub ou supercríticas, garante a decomposição da matriz orgânica de maneira rápida e seletiva. É um método que não utiliza reagentes contaminantes e a eficácia de recuperação das fibras é quase absoluta. No caso de resina poliéster do tipo PET, os produtos recuperáveis são os monômeros (etilenoglicol, e TPA, ácido tereftálico) de maneira quase integral. Este processo consiste em utilizar água em condições de fluidos supercríticos (300°C e 400 bares).

A hidrólise à baixa temperatura e em solvente ácido (HNO_3) segue o mesmo princípio que a hidrólise em fluido supercrítico. O ácido hidrolisará quase completamente a resina e os materiais valorizados serão similares (em geral para uma resina termoplástica, os monômeros de origem da matriz orgânica). Normalmente, o solvente é concentrado entre 10 a 20 % em peso em água a 80°C e pressão atmosférica. As fibras recuperadas perdem no máximo 5% de suas propriedades mecânicas em razão da baixa condição de temperatura do processo.

Globalmente, grande parte dos processos de reciclagem estão em fase de desenvolvimento com o objetivo de atender desempenho econômico e ambiental satisfatório em escala industrial. Hoje, somente a pirólise e a gaseificação são conhecidas em aplicações e em escala industrial. (36)

Assim, os processos não apresentam o mesmo nível de maturidade tecnológico para serem projetados hoje em escala industrial. Por consequência, os

métodos devem ser estudados em paralelo para haver comparações entre eles de maneira objetiva e não necessariamente por uma coleta de informações sem o mesmo nível homogeneidade ou maturidade.

3.3.1 Distribuição da Reciclagem de Compósitos Poliméricos no Mundo

Atualmente a disposição final de materiais compósitos reforçados com fibras é feita em aterros sanitários, o que não segue as novas diretrizes econômicas, ambientais e legais de hoje. Com o aumento do mercado da produção de compósitos, claramente haverá um aumento de resíduos em fim de vida a serem reciclados ou reutilizados.

A reciclagem de compósitos poliméricos de fibras de vidro ainda não é desenvolvida como os compósitos com fibra de carbono devido ao baixo valor agregado da fibra de vidro. Assim, mesmo que seja possível recuperar a resina, para que o processo seja sustentável economicamente, as empresas optam por desenvolver a reciclagem de polímeros reforçados por fibra de carbono.(4)

A reciclagem de fibra de carbono feita por processo de pirólise foi inicialmente estabelecida pela empresa Milled Carbon, na Inglaterra. Atualmente, já existem certas empresas que globalmente reciclam compósitos reforçados com fibra de carbono e resíduos com fibras de carbono que utilizam a pirólise como solução tecnológica. Estão incluídas na listagem atual de empresas que desenvolvem algum tipo de reciclagem de compósitos reforçados com fibras de carbono: ELG CarbonFibre, na Inglaterra; CFK Valley Stade Recycling, na Alemanha; CarbonConversions (inicialmente MIT-RCF), nos Estados Unidos; Karborek, na Itália; CarbonFiberRecycleIndustryCoLtd, no Japão.(4)

A Neocomp, na Alemanha, recebe resíduo de compósitos com fibra de vidro para ser coprocessado com derivados de óleos em produção de cimento. É esperado que algumas empresas na Inglaterra enviem o resíduo de polímeros com fibra de vidro para plantas que recuperam energia de resíduos. Globalmente o número de organizações que trabalham alternativas de uso de compósito polimérico mais sustentável ainda é pequeno. Assim, se faz extremamente necessário que iniciativas de estudos e pesquisas sobre reciclagem de compósitos poliméricos sejam realizadas.
(4)

3.4 Incentivo para desenvolvimento sustentável do fim de vida de compósitos

O surgimento de indústrias de compósitos e o crescimento da cultura sustentável incitaram organismos públicos a criar leis a fim de encorajar a reciclagem destes produtos. Desta forma, as peças que contém materiais compósitos (estruturas de avião, carros, peças de construção e etc.), os produtos não conformes e as perdas de produção (usinagem, cortes e etc.) devem seguir um processo de gestão de fim de vida respondendo às exigências técnicas e regulamentares.

Na Europa, a criação de regulamentação para o fim de vida de materiais compósitos é dirigida pelo “European Union Waste Framework”. As legislações obrigam, sobretudo, que uma fração importante da massa dos produtos seja reciclável e/ou valorizável (lei sobre os veículos avariados 2000/53/EC e lei sobre os resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos 2002/96/EC). Eles tendem a encorajar igualmente uma diminuição de processos de eliminação de resíduos como a incineração sem valorização energética ou de material tal como a co-incineração (diretiva 2000/76/EC) e o descarte em aterros (lei nº 92-646 de 13 Julho 1992 e a diretiva 1999/31/EC) como solução de fim de vida destes materiais. (36)

Em 2017 na China, o Conselho Estadual Geral (GOSC) implantou um plano de responsabilidade do produtor extensivo, em que exige o uso de materiais reciclados em setores-chaves da indústria, o que inclui o automotivo. Assim, direcionados por requisições legislativas, motivações econômicas e avanços tecnológicos a utilização de compósitos reciclados se tornou uma prática promissora na China e impulsionará a indústria de reciclagem destes materiais. (27)

No Brasil, a reciclagem tem ganhado maiores proporções depois da Lei 12.305 de 2010 (Plano Nacional de Resíduos Sólidos) ter sido aprovada já que a reciclagem se tem mostrado preferida quanto ao gerenciamento de resíduos sólidos. (37). Não foram localizados dados concretos indicando a destinação atual de materiais compósitos estruturais no Brasil, mas em face da inexistência de uma logística reversa mais ampla, acredita-se que em sua maior parte os materiais sejam descartados em aterros industriais e/ou sanitários. (38)

Já existem algumas iniciativas para a implantação de sistemas de logística reversa no Brasil para materiais compósitos. Infelizmente estas iniciativas ainda abrangem apenas alguns tipos de materiais compósitos (somente com fibra de vidro, por exemplo), e condicionados a acordos e parcerias com fabricantes para a definição dos custos envolvidos. (38) (39)

Em parceria com a ALMACO (Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos), o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (ITP) criou em 2010 um projeto para desenvolver soluções de custo e investimento baixos a fim de reintegrar descartes industriais de compósitos no próprio processo produtivo ou em outras aplicações. Esta iniciativa contou com o suporte de 23 empresas brasileiras do setor para o levantamento de informação mercadológicas da rotina de operação do setor, incluindo fabricantes de produtos, resinas, reforços e equipamentos, além de distribuidores e usuários. O resultado deste projeto contemplou de fórmulas para inertização de catalisadores até possibilidade da utilização de resíduos em aplicações como painéis e isolantes térmicos. Já existem empresas brasileiras desta parceria que utilizam o resíduo para a fabricação de seus produtos. (40) (41)

Em contrapartida, projetos como RECYCOMP, RECO, FENICS e empresas já especializadas em soluções de reciclagem para compósitos na Europa estão em posições mais avançadas para encontrar soluções viáveis. (36). Globalmente, estes projetos visam encontrar saídas para a coleta, reciclagem ou fim de vida de materiais compósitos de maneira sustentável em parceria com centros de pesquisa e empresas do ramo. Hoje, já são oferecidos programas de consultoria de soluções para casos de reciclagem, bem como operações de usinas térmicas de reciclagem de compósitos. Mesmo assim, estas iniciativas são dificultadas pela questão de coleta deste tipo de material, bem como no Brasil. (40)(42)(43)(44)

4 METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho seguirá a lógica do método de Análise do Ciclo de Vida, que é frequentemente empregada para avaliações ambientais, descrita em quatro etapas: definição dos objetivos e do campo de estudo, levantamento do inventário do ciclo de vida, avaliação dos impactos e interpretação dos resultados. (6)

Para realizar a análise ambiental, serão levantados dados a partir de ferramentas de simulações dos processos de reciclagem. Estes dados serão inseridos numa metodologia de análise de ciclo de vida e, então, os resultados ambientais analisados.

O campo de estudo foi delimitado ao nível do fim de vida dos materiais compósitos e mais precisamente, no nível de processos de reciclagem de compósitos a matriz de poliéster saturado reforçado por fibra de vidro (60% polímero, 40% fibra) (20). Existem processos que podem ocorrer em paralelo à reciclagem como a disposição em aterros sanitários e a valorização energética através da incineração dos materiais pós pré-

tratamento. No entanto, o estudo se concentrará puramente na reciclagem, como delimitado na Figura 13.

Os processos escolhidos para as simulações, com auxílio de uma ferramenta de simulação de processos termodinâmicos, foram a pirólise, a gaseificação, a hidrólise em fluido supercrítico, a hidrólise ácida e a glicólise por apresentarem maior quantidade e qualidade de informações nas bases de pesquisa. O perímetro de estudo considerou também as etapas de separação e purificação com o objetivo de contemplar produtos similares ao do mercado (pureza, qualidade e etc.). O perímetro do estudo é representado abaixo na Figura 13 pela linha pontilhada em cinza.

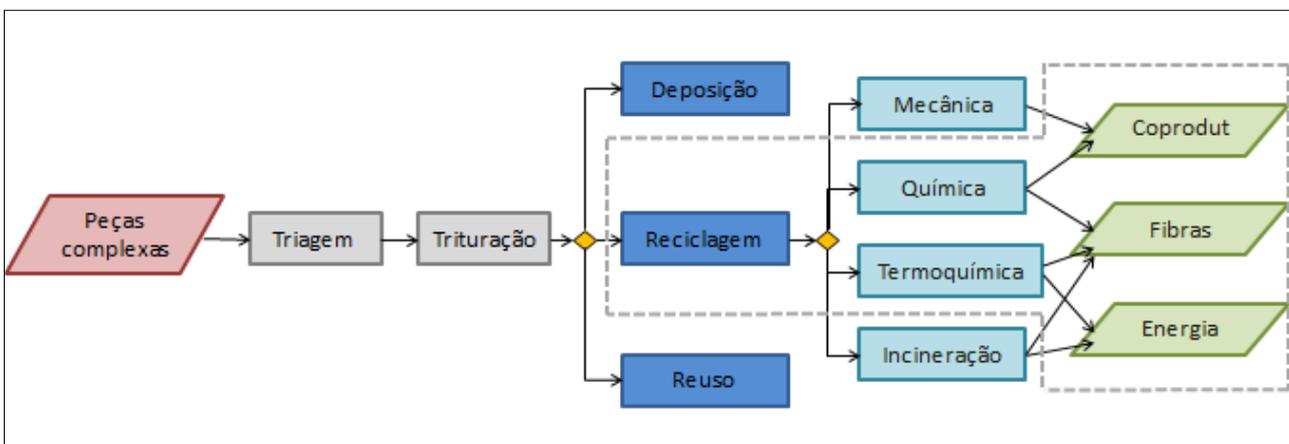


Figura 13 Fluxograma do campo de estudo

A delimitação do estudo excluiu as fases de produção (extração da matéria prima, síntese dos monômeros e dos polímeros, formatação do produto final), a fase de utilização e as etapas logísticas (transporte, coleta e triagem).

A unidade funcional escolhida foi uma tonelada de fibra de vidro recuperada, pois o objetivo primário da reciclagem dos compósitos orgânicos é a recuperação da fibra que apresentam alto valor agregado.

Em seguida, no próximo subtópico, é feita a descrição da metodologia utilizada para a segunda e a terceira fase do ACV, levantamento do inventário do ciclo de vida e a análise dos impactos ambientais, respectivamente. A etapa de interpretação de dados foi realizada ao longo do capítulo 5.

4.1 Obtenção de dados do Inventário de Ciclo de Vida

A realização de uma avaliação ambiental necessita de dados confiáveis para que o resultado da análise seja pertinente e precisa sobre o sistema. Assim, para a obtenção de dados para o inventário de ciclo de vida, foram realizadas simulações dos processos de reciclagem estudados a partir de condições operacionais retiradas da literatura.

4.1.1 Metodologia de levantamento das condições operacionais dos processos

A pesquisa de dados das condições operacionais, parâmetros e desempenho dos processos foram baseados na coleta de informações disponíveis nas bases de patentes europeias (EspacenetPatentResearch, 45) e americanas (US PatentDatabase, 46). A escolha da base de dados de patentes foi feita para garantir dados mais homogêneos ao nível de maturidade tecnológica e desempenho. Os dados coletados nestas fontes correspondem geralmente à escala piloto, que antecede o desenvolvimento do processo em escala industrial.

Os dados para serem referências das simulações são geralmente obtidos a partir de exemplos que contenham mais ensaios e testes. Outros critérios de escolha são igualmente levados em consideração como os índices de desempenho da tecnologia apresentada (alta taxa de conversão, seletividade do produto desejado e etc.) ou também, a pesquisa de testes em maiores escalas (preferíveis dados de experiências em escala de piloto a escalas laboratoriais).

As buscas de patente foram realizadas entre 24 de março de 2014 a 08 de agosto de 2014 e a lógica de palavras-chaves para encontrar as referências era utilizar os termos “reciclagem”, “compósito polimérico”, o nome do tipo de processo que gostaria de investigar e as condições gerais do processo (como condições supercríticas e reagidas com ácido nítrico). As pesquisas foram majoritariamente realizadas em francês e inglês, sendo assim os termos eram traduzidos para o idioma da base de patentes em que a pesquisa era realizada, em inglês para o “US Patent” e em inglês ou francês para o “EspacenetPatentResearch”.

Os exemplos pesquisados que não apresentavam todos os dados necessários para realizar a simulação, foram completados com informações de outras patentes (por analogia) ou por meio de publicações científicas (principalmente para os valores de taxa de conversão e seletividade dos produtos). A metodologia de busca seguiu a mesma lógica da realizada anteriormente para as patentes bases de cada processo.

Desta forma, foi possível construir o inventário de dados operacionais e de desempenho de processos, assim como desenhar os esquemas dos principais processos a serem simulados.

4.1.2 Metodologia das simulações

A partir dos dados coletados pela metodologia anterior, foi possível analisar os processos de reciclagem de materiais compósitos. As simulações dos processos estudados foram geradas a partir do programa AspenHysys v.7.3 editado pela sociedade Aspen Technology.

Um esquema inicial do processo foi desenhado com o auxílio do programa. Parâmetros como fluxos de entrada, parâmetros da reação (equação de equilíbrio, conversão, seletividade e etc.), condições operacionais (temperatura, pressão, velocidade e etc.) e protocolo de separação e purificação são introduzidos. Pela aplicação de um ou mais modelos termodinâmicos, o conjunto de fluxo de massa e de energia puderam ser calculados. Assim, o balanço de massa e energia foram realizados e em seguida traduzidos em impactos ambientais e econômicos.

Os processos de reciclagem estudados foram subdivididos em duas fases essenciais:

- A fase reacional, em que decorre a decomposição da resina e a extração das fibras que serão valorizadas constituindo o objetivo real da reciclagem dos compósitos.
- A fase de separação e purificação, em que é possível recuperar e valorizar os coprodutos e energia emitidos no processo.

Para efeito de simplificação e afim de realizar a simulação dos processos de reciclagem, as seguintes hipóteses são levadas em consideração:

- A valorização energética se tornou possível devido ao caráter exotérmico de algumas reações e o excesso de energia fornecida ao sistema. Sua recuperação foi realizada com o auxílio de trocadores de calor, em que a eficácia foi fixada sistemática e arbitrariamente em 65%.
- A valorização de componentes foi obtida com as etapas de separação e purificação, que corresponderam às especificações que caracterizam um produto recuperável. As operações unitárias envolvidas nesta etapa (coluna de destilação, separador Flash, coluna de absorção e etc.) foram consideradas adiabáticas.

- Os reatores escolhidos para as simulações são reatores de conversão. As taxas de conversão são fixadas e dependem dos parâmetros da reação de cada processo de reciclagem. A simulação, então, foi realizada em estado estacionário sem intervenção de lei de velocidade (equações cinéticas) ou mecânica dos fluidos. O modelo termodinâmico empregado para as simulações é o NRTL (Non-Random-Two-Liquid), por ser o mais adaptado às reações de decomposição de polímeros.
- O compósito considerado tem como resina o PET desenhado no sistema e as fibras de vidro simuladas como SiO₂, já que não existia o compósito polimérico reforçado com fibra na base de dados do programa utilizado.

A ferramenta utilizada, AspenHysys, é um instrumento de simulação de engenharia que permite criar processos, respeitando a arquitetura, a interface, as capacidades e operações de uma unidade da indústria química. Este programa é utilizado para as simulações de processos de produção de óleos e gás, de refinarias e outros processos químicos. A ferramenta permite, entre outras coisas, aperfeiçoar o *design* de um processo e simular unidades com aplicação de modelos termodinâmicos, de mecânica dos fluidos e leis cinéticas. Ademais, o programa possui uma biblioteca de dados que possibilita construir um processo em que se desenvolverão reações químicas, mudanças de estado dos componentes, separações de compostos e etc. que permite realizar cálculos de dimensionamento, fluxo, condições operacionais e etc. (47)

4.2 Avaliação dos impactos ambientais dos processos de reciclagem

O ICV utiliza dados fornecidos pelas simulações dos processos correspondentes ao balanço de massa e energia do sistema de reciclagem. Assim, a partir destes resultados, é possível transcrever em emissões equivalentes para realizar a avaliação dos impactos, seria a terceira etapa do ACV. Estas emissões são calculadas a partir de método predefinido, Impact 2002, disponível no programa SimaPro7. O método escolhido responde a todas as necessidades e é de simples aplicação.

Para cada indicador, a unidade equivalente é mencionada e existe um fator de normalização para cada emissão do sistema, o que permite quantificar os impactos. A Figura 14 esquematiza um exemplo da metodologia de quantificação dos impactos. A partir da emissão de um componente do processo, é possível converter em um ou mais impactos ambientais.

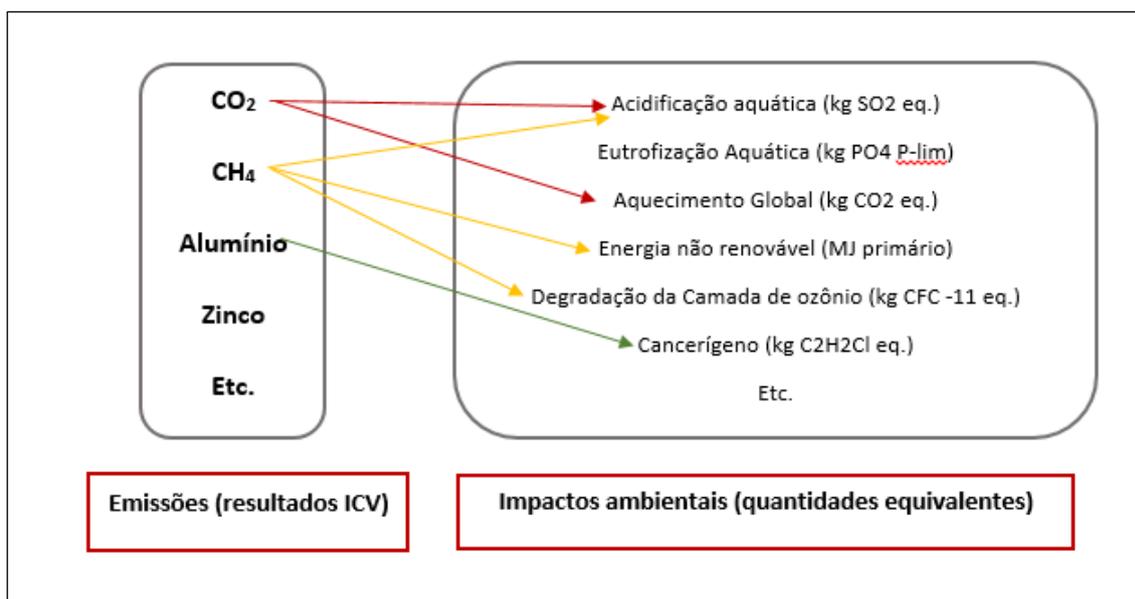


Figura 14 Metodologia de cálculo das quantidades de emissões equivalentes

A partir dos 13 impactos presentes no método, foram escolhidos 3: acidificação aquática, eutrofização aquática e aquecimento climático. Estes impactos ambientais foram selecionados devido a sua baixa sensibilidade a certas substâncias (metais radioativos, substâncias cancerígenas e etc.), que não puderam ser levadas em conta nos resultados das simulações, e ao interesse que provocam de um ponto de vista ambiental.

- A acidificação aquática é definida pelo aumento das concentrações de substâncias ácidas no meio aquático impactando na fauna e flora.
- A eutrofização aquática é definida por um desequilíbrio devido a um fornecimento excessivo de nutrientes (fosfatos, nitratos e etc.). Este impacto se traduz por uma superpopulação de organismos no meio que conduzem à diminuição da quantidade de oxigênio presente.
- O aquecimento climático representa o aumento da temperatura média na superfície da Terra em razão do aumento do efeito estufa, em que as emissões de origem humana contribuem fortemente (dióxido de carbono, metano, óxidos de azoto, fluorocarbonos e etc.)

A interpretação dos resultados permite avaliar estes impactos gerados por cada processo. Para todos os processos estudados, duas análises de ciclo de vida foram levadas em conta:

- A primeira considerando o conjunto de vias de valorização dos componentes, da energia e das fibras extraídas (cenário com valorização; cenário I).
- A segunda considerando apenas as fibras extraídas como produto valorizável (cenário sem valorização; cenário II). (48)(49)

As valorizações consideradas dos produtos e coprodutos para o **cenário I** de cada um dos cinco processos estudados para ACV estão descritas na Tabela 3. As escolhas destes tipos de valorização também foram retiradas de patentes e artigos como os dados de entrada para as simulações citados anteriormente.

Tabela 3 Tipos de valorização ou reaproveitamento de cada processo de reciclagem

Processo	Valorização energética	Valorização de componentes*
Glicólise	Incineração da resina residual	EG (99%), fibras
Hidrólise (condições supercríticas)	Energia recuperada pelos trocadores de calor	TPA (99%) e EG (99%), fibras
Hidrólise (HNO₃)	Energia recuperada pelos trocadores de calor	TPA (99%) e EG (98%), fibras
Pirólise	Energia recuperada pelos trocadores de calor	Coprodutos purificados**, fibras
Gaseificação	Energia recuperada pelos trocadores de calor	Gás combustível, fibras

*EG: Etileno Glicol / TPA: Ácido Tereftálico

**Acetona, ácido benzoico, dióis, gás combustível e acetaldeído.

O programa utilizado para realizar a tradução das emissões em impactos foi o SimaPro. Esta ferramenta possibilita a análise de ciclo de vida de um processo, serviço ou produto a partir da disponibilidade de dados de entrada e saída do sistema estudado. Modela um sistema que será tratado por algum método de ACV e desempenho ambiental segundo a norma ISO 14040. (48) (49) (50)

Além disso, as fichas dos processos realizados a partir de balanços de massa e energia para o cálculo dos impactos ambientais são consultáveis nos anexos deste documento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Levantamento de dados para o ICV

Para realizar as simulações dos processos e a construção do inventário de ciclo de vida, inúmeros dados foram encontrados em patentes. No entanto, as informações relativas a condições operacionais e desempenho dos processos não foram completas, como esperado. Assim, foi necessário completar o banco de dados a partir de informações retiradas de publicações que tratavam de tecnologias similares. Na Tabela 4, o inventário de dados levantados é descrito, bem como a fonte utilizada para cada processo, a data de pesquisa e palavras chaves utilizadas. A escolha de 5 processos foi realizada de acordo com a quantidade e qualidade de informação que foi possível levantar sobre os inúmeros processos de reciclagem de compósitos poliméricos. Os que viabilizaram o levantamento completo de informação foram: glicólise, hidrólise em condições supercríticas, hidrólise com ácido nítrico, pirólise e gaseificação.

Tabela 4 Resultado da pesquisa em patentes e artigos dos dados dos processos de reciclagem

Processo de reciclagem	Palavras-chave	Fonte
Glicólise	Glicólise, reciclagem, compósitopolimérico	(60) (61)
Hidrólise (supercrítica)	Hidrólise, condições supercríticas, reciclagem, compósito polimérico	(53) (54)
Hidrólise (HNO ₃)	Hidrólise, ácido nítrico, reciclagem, compósito polimérico	(55) (56)
Pirólise	Pirólise, reciclagem, compósitopolimérico	(49) (57)
Gaseificação	Gaseificação, leito fluidizado, reciclagem, compósito polimérico	(50)(58)(59)

No anexo I deste trabalho, encontram-se as variáveis traduzidas em francês e inglês que foram utilizadas para a busca de patentes e artigos. Como já ressaltado anteriormente, as pesquisas e acessos aos arquivos de patentes e artigos foram realizados entre 24 de março de 2014 e 08 de agosto de 2014.

A partir deste levantamento de dados, tornou-se viável consolidar as premissas e condições operacionais dos processos de reciclagem. Assim, as informações de balanço de massa e energia para um segundo passo de análise de ciclo de vida podem ser calculadas de maneira mais uniforme entre os processos o que garante a qualidade da comparação dos resultados.

Nas Figuras 15 e 16, são descritas as variantes de entrada no programa Hysys para o processo de reciclagem via glicólise o fluxograma criado para o processo a partir das informações coletadas.

	GLICÓLISE
Condições Operacionais	T = 230°C P = 1atm $\chi_{PET} = 80\%$
Reação Principal	1 Compósito+ 2 EG → 1 BHET + oligômeros
Matérias-prima e Fluxo de Entrada	Compósito (14,5kg/h); EG (29kg/h)
Separação	Separador Líquido-sólido ;2 colunas de destilação
Valorização / Recuperação	Incineração do PET residual / purificação do EG / fibras
Patente / Publicação	(61) ; (62)

Figura 15 Tabela resumida das condições simuladas na Glicólise

Inicialmente o material a ser reciclado (corrente 1) e o etileno glicol puro (corrente 2) são inseridos em um reator de conversão (CRV-100). As condições operacionais para a glicólise ocorrer seguem a lógica descrita inicialmente, de manter uma temperatura mais amena e a decomposição da resina ser feita através da reação com um polioliol, que neste caso é o etileno glicol, com o polímero matriz. Todo o processo é mantido a pressão ambiente e taxa de conversão da reação não passará de 80%.

Em seguida, as separações das fases, resina residual, produtos da reação e reforço, ocorrem através de um separador líquido-sólido (X-100). A fase sólida (corrente 9) é encaminhada para uma segunda etapa do processo para incinerar a resina residual que segue ligada ao reforço. Pela corrente 20, é introduzido ar ao misturador (MIX-103) que encaminhará o processo para um forno (FH-100) para

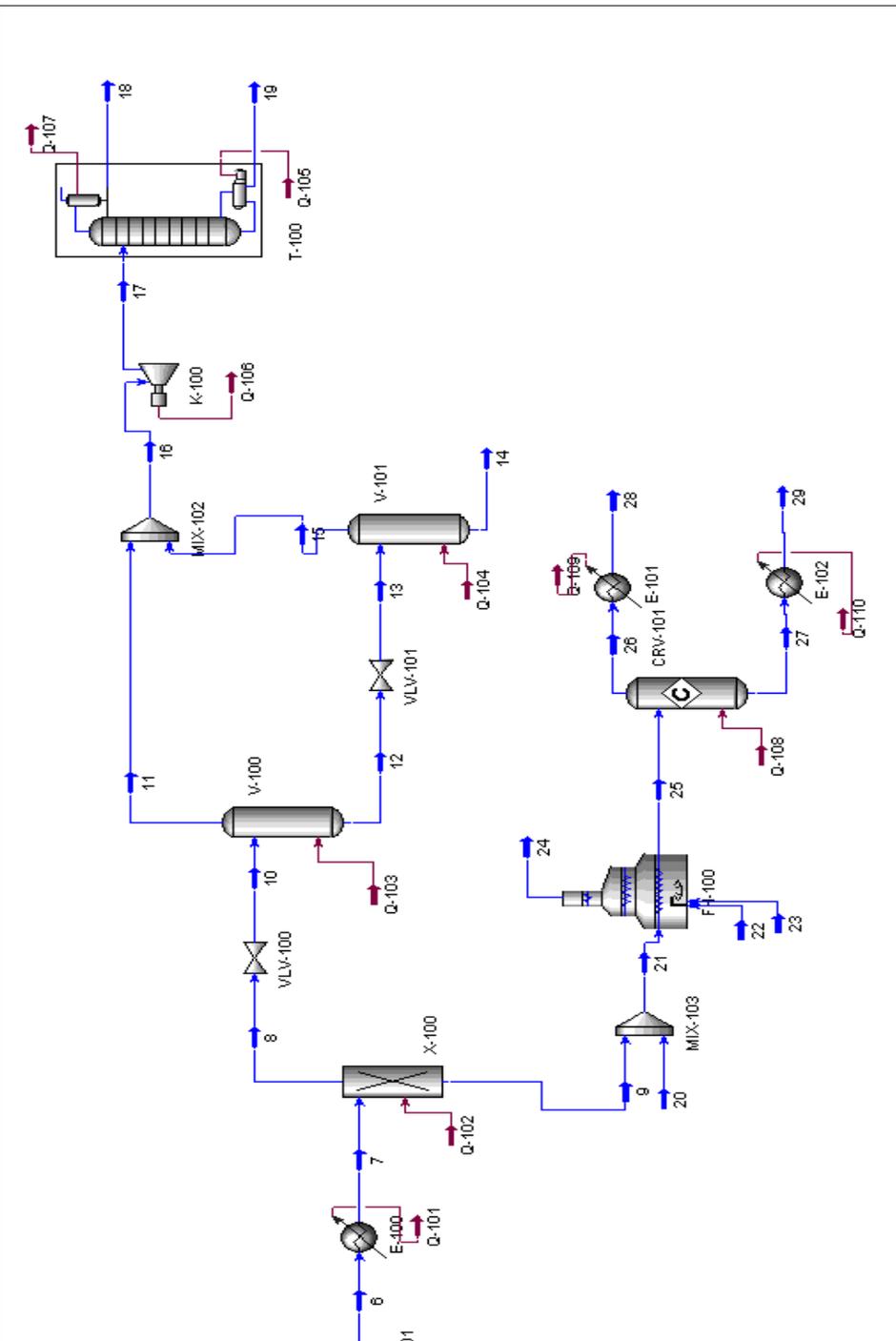
aquecer a corrente e a conversão da resina acontecerá no reator (CRV-101). As correntes de saída terão a fibra pura (corrente 27) e gases (CO₂ e H₂O, corrente 26), que serão resfriadas por trocadores de calor (E-102 e E-101, respectivamente) antes de saírem do sistema.

Em paralelo, a fase líquida que sai do separador passa por duas colunas Flash (V-100 e V-101) e uma coluna de destilação (T-100) para purificar e separar o BHET e o EG não reagido. A primeira coluna Flash (V-100) separará o etileno glicol (corrente 11) dos oligômeros e do BHET (corrente 12). A segunda coluna Flash (V-101) separará o BHET (98%) e oligômeros (corrente 14) do etileno glicol (corrente 15) que ainda estava na mistura. O etileno glicol (corrente 15) será misturado (MIX-102) com a corrente 11 de saída da primeira torre Flash para serem purificados e através da coluna de destilação obter EG (99%, corrente 19).

Tanto o c
reaproveitados no
desperdício, tendo
produtos valorizados
recuperada) e o et

Figura 16 Flu

Nas Figuras 1
programa AspenH



corrente 1 de entrada na pirólise é pré-aquecida em um forno e em seguida entra no reator de conversão para a decomposição total da resina a uma temperatura de 550°C. Como corrente de entrada também existe o nitrogênio (corrente 13, N₂) para garantir que o meio seja inerte e evite qualquer tipo de oxidação, contrariamente ao que ocorre na gaseificação.

Em seguida, como em quase todos os processos, a corrente que sai do reator é resfriada por um trocador de calor (Q-101) e passa por um separador líquido-sólido e as fibras são coletadas (corrente 7). Com o calor do processo as fibras sofrem alguns danos em suas propriedades físicas, que fazem com que caia 30% o desempenho da fibra.

O seguinte passo de separação será purificar a fase líquida (corrente 6) por uma coluna Flash que removerá o CO e CO₂ presente (corrente 8). Já a fase líquida resultante (corrente 9) será tratada e purificada para recuperação dos coprodutos (acetona 95%, ácido benzoico 75%, gás e diacetona álcool 91%) através de 6 colunas de destilação, que apresentam suas correntes detalhadamente descritas no Anexo II. Os rejeitos que saírem das colunas de destilação deveriam ser tratados e descartados apropriadamente, bem como os gases CO e CO₂ antes de emitidos à atmosfera.

Neste caso, o poder calorífico da resina é responsável pela energia que será recuperada no forno (7,2GJ/ ton de fibra recuperada) e poderá ser reaplicada no sistema para aquecer as correntes de entrada das colunas de destilação, por exemplo.

	PIRÓLISE
Condições Operacionais	T = 550°C P = 1,01bar; N ₂ (inerte) $\chi_{PET} = 100\%$
Reação Principal	1 Compósito → produtos da decomposição
Matérias-primas e Fluxo de Entrada	Compósito (454kg/h)
Separação	Separador Líquido-sólido ; 1 coluna Flash ; 6 colunas de desilação
Valorização / Recuperação	Energia do aquecimento ; purificação dos coprodutos
Patente / Publicação	(49); (57)

Figura 17 Condições de entrada da simulação da pirólise

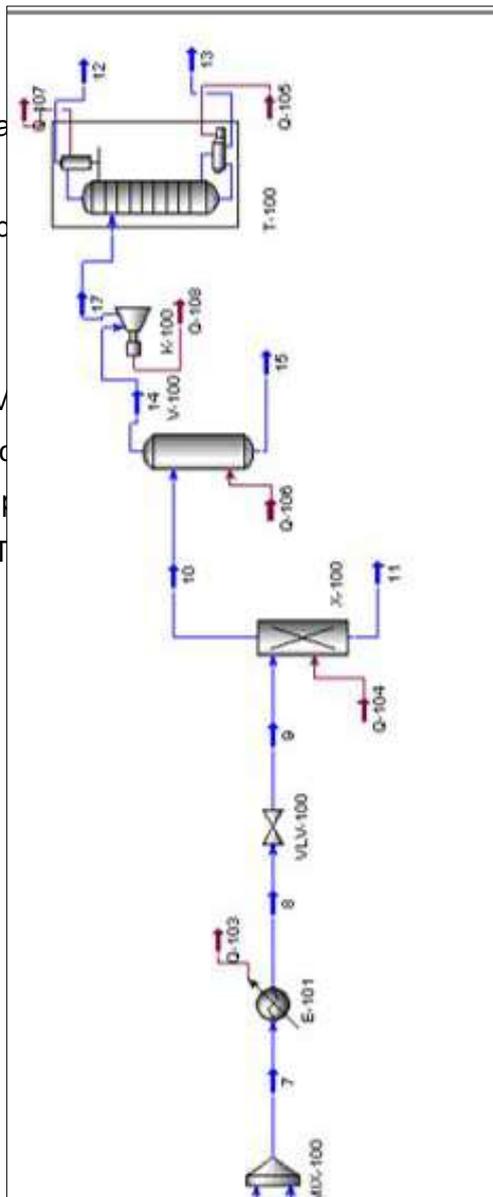
A fim de aperfeiçoar o processo, a água recuperada poderia retornar ao início do fluxo e os dois componentes recuperados da resina, comercializados.

	HIDRÓLISE (SUPERCRÍTICA)
Condições Operacionais	$T = 300^{\circ}\text{C}$ $P = 400\text{bar}$ $\chi_{\text{PET}} = 100\%$
Reação Principal	$1 \text{ Compósito} + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 1 \text{ EG} + 1 \text{ TPA}$
Matérias-primas e Fluxo de Entrada	Compósito (15kg/h) ; H_2O (70kg/h)
Separação	Separador Líquido-sólido ; 1 coluna Flash ; 1 coluna de destilação
Valorização / Recuperação	Purificação EG e TPA
Patente / Publicação	(53); (54)

Figura 19 Condições de entrada da simulação da Hidrólise (condições supercríticas)

Nas Figuras 21 e 22, hidrólise em meio ácido e a destilação desta metodologia segue a mesma metodologia e apresentam o mesmo tipo de condições operacionais.

Inicialmente, a corrente (corrente 9) são misturadas (Mistura) (corrente 2) no reator de destilação atmosférica. Similarmente ao processo, resulta em recuperação de TPA



a reciclagem por sistema. A lógica supercrítica, já que onde diferença é o

de ácido nítrico presente de compósito a 85°C e pressão a sálvolise ácida a passar por um

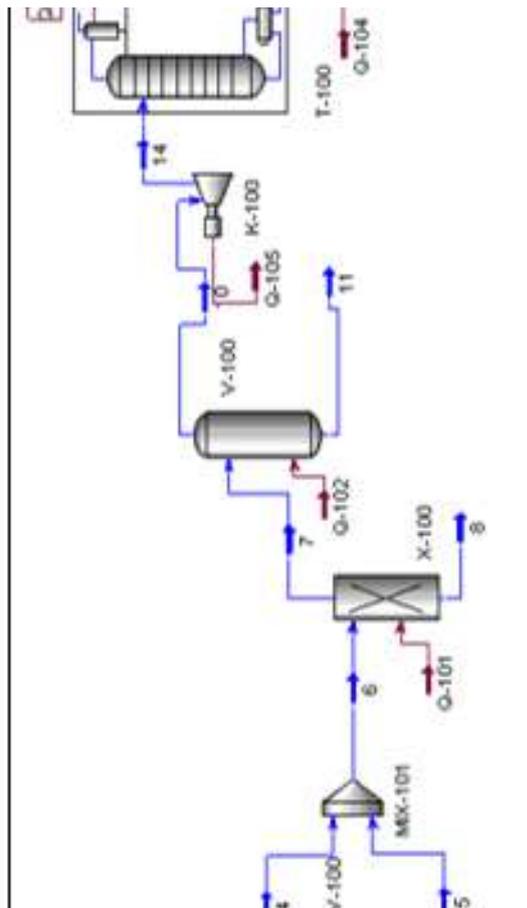
separador sólido líquido, uma coluna Flash e uma coluna de destilação. No entanto a pureza dos produtos recuperáveis é menor: EG (97%; corrente 13), TPA (98%, corrente 11).

A água (95%; corrente 12) teria resíduos de ácido nítrico que para ser utilizada, deveria passar por outro tratamento de purificação. É possível a reutilização no sistema de reciclagem, no entanto, seria necessário um estudo de sensibilidade da variação das concentrações dos reagentes na entrada para equilibrar as frações molares.

HIDRÓLISE (ÁCIDA)	
Condições Operacionais	T = 85°C P = 1,01bar $\chi_{PET} = 100\%$
Reação Principal	1 Compósito + 2 H ₂ O → 1 EG + 1 TPA
Matérias-primas e Fluxo de Entrada	Compósito (10kg/h) ; H ₂ O + HNO ₃ (40kg/h)
Separação	Separador Líquido-sólido ; 1 coluna Flash ; 1 coluna de destilação
Valorização / Recupera	
Patente / Publicaçã	



Figura 21 Condições de entrada da simulação da Hidrólise (ácida)



Nas Figuras 23 e 24, encontram-se o esquema desenhado para a gaseificação no programa AspenHysys e a tabela com o consolidado de informações do processo. O modelo simulado para o processo foi um caso adaptado sem considerar todas as variantes de um reator de leito fluidizado. Neste caso as correntes de entrada são ar (corrente 2) e o compósito (correte 1). No reator de conversão (CRV-100) ocorre a oxidação total da resina PET a 650°C.

O passo seguinte é a separação através de um ciclone (X-100), que na corrente inferior existe a recuperação da fibra comprometida pelo calor (corrente 7) e na corrente superior a mistura gasosa composta de hidrocarbonetos leves e óxidos de carbono (corrente 6).

	GASEIFICAÇÃO
Condições Operacionais	T = 650°C P = 1,01bar $\chi_{PET} = 100\%$
Reação Principal	Compósito + Ar \rightarrow Gás
Matérias-primas e Fluxo de Entrada	Compósito (454kg/h); Air (720 kg/h)
Separação	Ciclone
Valorização / Recuperação	Energia e Gás combustível
Patente / Publicação	(50)(58)(59)

Figura 23 Condições de entrada da simulação da Gaseificação

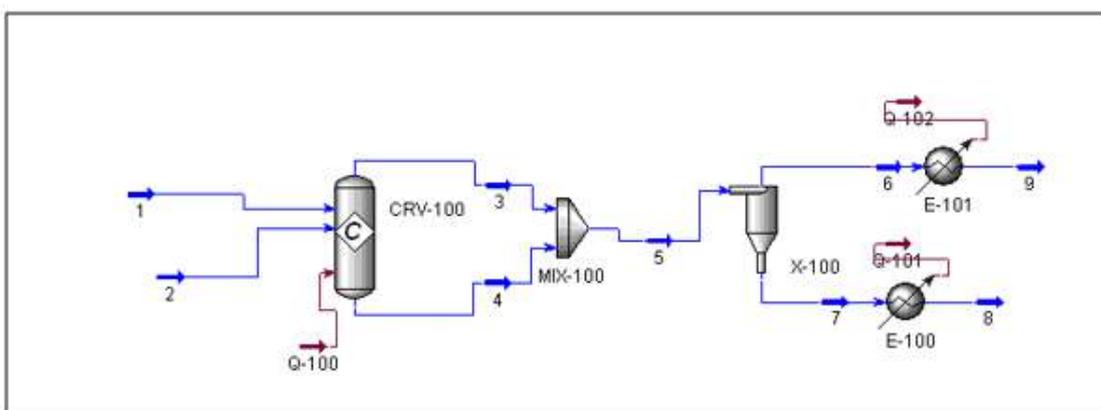


Figura 24 Fluxograma do processo de reciclagem via Gaseificação (Hysys);

As quantidades de calor emitidas e consumidas são calculadas através do modelo NRTL para todos os processos. Os balanços de massa e energia dos processos estudados estão descritos no Anexo II deste trabalho com os detalhes de todas as correntes do sistema.

A partir das simulações e desenhos de processo descritos, foi possível consolidar o inventário de ciclo de vida. Os cenários descritos com valorização e sem valorização de energia e componentes na Tabela 2 foram como premissa. As fibras são sempre consideradas nos cenários, já que é o um dos principais objetivos dos processos de reciclagem de compósitos. No Anexo III deste trabalho estão os dados detalhados que foram inseridos no programa SimaPro para serem traduzidos em impactos ambientais.

Os cálculos realizados para resultar nas informações de entrada e saída consolidado do processo de reciclagem como um todo foi basicamente um balanço de massa e energia sendo o volume de controle o processo de reciclagem, apenas considerando as correntes de entrada e saída do processo como um todo.

5.2 Avaliação dos impactos ambientais

5.2.1 Individual

A análise de ciclo de vida foi realizada para os cinco processos como descrito na metodologia. A partir dos dados de balanço de massa e energia encontrados nas simulações em Hysys, foi possível calcular os impactos ambientais em valores equivalentes pelo programa SimaPro.

Nos resultados deste tópico, quanto menor o valor de emissão, melhor o desempenho ambiental, ou seja, o impacto será positivo para o meio ambiente. O inverso são maiores valores de emissão, impacto ambiental negativo e pior o desempenho ambiental.

As informações detalhadas de dados de entrada da análise ambiental estão no Anexo II deste trabalho. Em seguida serão descritos individualmente as análises e resultados de cada processo de reciclagem.

Glicólise

Os impactos gerados pela glicólise são comparados nas Figuras 25 e 26. Primeiramente, foi realizado uma comparação entre os cenários simulados, como explicado anteriormente. O cenário I, em azul, considera todos os tipos de valorização,

seja energética ou de material, e o cenário II, em laranja, considera apenas a recuperação das fibras de vidro.

Nos gráficos da Figura 25, pode-se destacar, de forma já prevista, que o cenário I é o menos impactante ambientalmente. A acidificação e o aquecimento global são menos influenciados no cenário I do que no cenário II, visto que a energia recuperada pelas hipóteses do cenário I permite limitar o aporte de energia externa ao processo. Esta energia externa, normalmente é proveniente de origens fósseis e é responsável pela emissão de CO e CO₂, que apresentam uma influência forte nestes indicadores. A reação destes óxidos com a umidade pode gerar ácidos, além de serem potenciais para o aumento do efeito estufa, fatos que aumentam os valores destes indicadores.

A recuperação de todos os produtos do processo permite que o Cenário I da glicólise contribua também positivamente no indicador de eutrofização. O etileno glicol recuperado conduz a diminuição da demanda química de oxigênio (DQO) global, já que evita esta demanda nas unidades de produção de novos dióis, que é significativa.
(51)

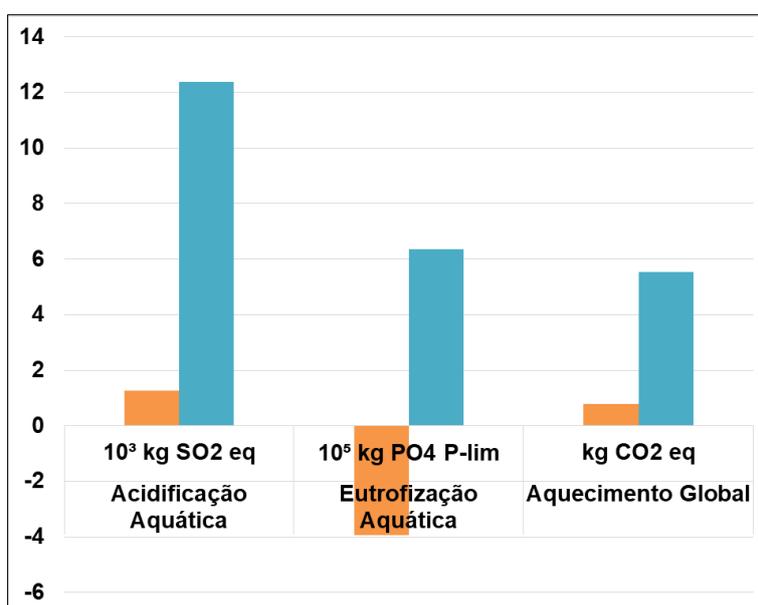


Figura 25 Comparativo dos impactos ambientais equivalentes entre cenário I (com valorização) e cenário II (sem valorização) para a Glicólise

Quando analisado de forma detalhada na Figura 26, o cenário I apresenta como principal impacto nos três indicadores ambientais o consumo do Etileno glicol. Nos três gráficos de análise o maior impacto negativo é este consumo, que demanda

fabricação do etileno glicol que por sua vez tem influências negativas no meio ambiente.No entanto, a recuperação do Etileno Glicol no final do processo de reciclagem compensa este consumo do mesmo componente, que evita a fabricação de mais dióis.

Considerando a categoria“aquecimento global”, a recuperação de calor ao longo do processo ajuda nesta compensação de emissões de CO e CO₂ que são fortes influentes neste indicador, diminuindo o impacto ambiental da glicólise. Já a eutrofização e a acidificação aquática têm suas emissões compensadas também, pela recuperação das fibras de vidro, que evita o aumento da demanda química de oxigênio e a emissão de componentes ácidos gerada pela fabricação deste material.

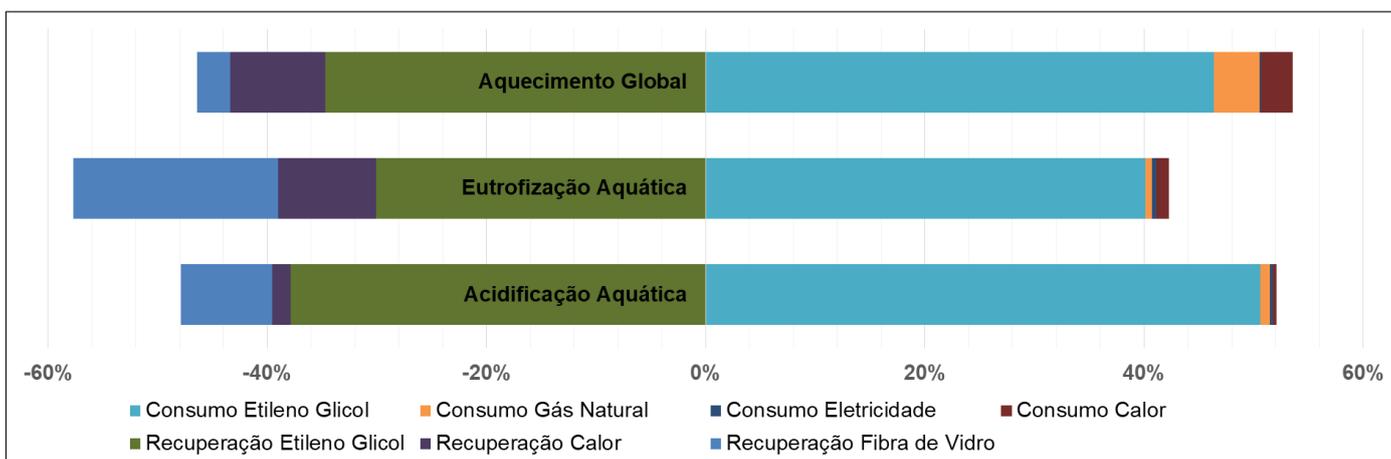


Figura 26 Representatividade dos parâmetros da glicólise nos impactos ambientais (Cenário I)

A glicólise, modelada segundo o fluxograma proposto, é um processo que pode ter impactos ambientais negativos se não houver recuperação de energia e coprodutos. Além disso, dependendo da quantidade de resina residual nas fibras que saem do reator, a incineração realizada para a purificação das fibras aumentará as emissões de gases do efeito estufa e componentes ácidos, o que irá aumentar diretamente os indicadores ambientais aqui estudados.

Pirólise

A reciclagem via pirólise, por sua vez, apresenta efeitos positivos ao meio ambiente, ajudando na compensação de processos paralelos, independentemente da

recuperação ou não de energia e coprodutos. No entanto, o cenário I ainda assim se faz mais vantajoso que o cenário II em números globais, como comparado nos gráficos da Figura 27.

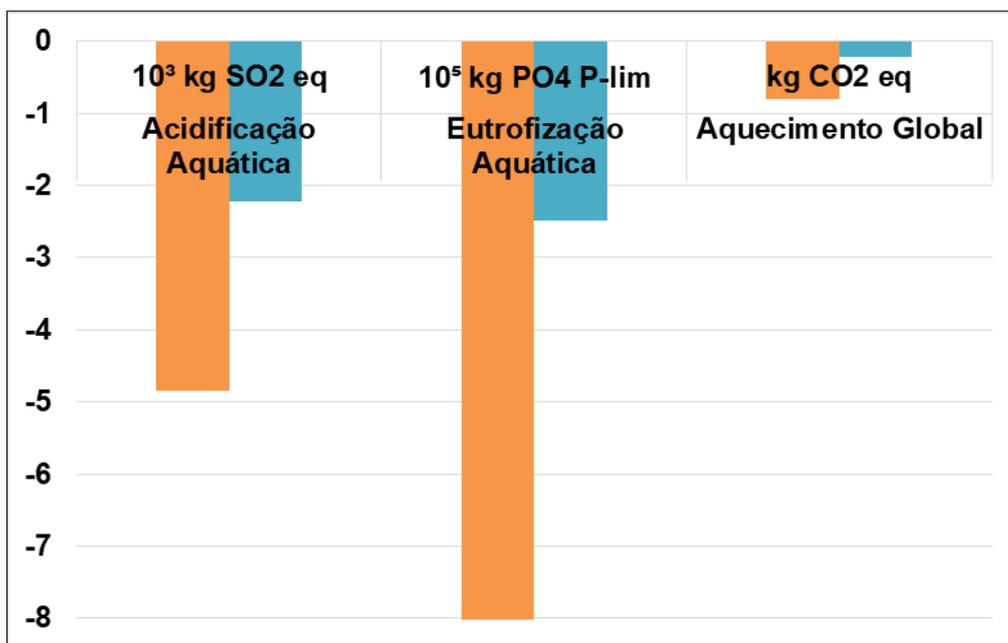


Figura 27 Comparativo dos impactos ambientais equivalentes entre cenário I (com valorização) e cenário II (sem valorização) para a pirólise

Quando o cenário I é analisado mais detalhadamente em relação aos três indicadores estudados na Figura 28, pode-se concluir que a recuperação dos coprodutos e produtos purificados é o maior peso para a compensação dos impactos negativos que o consumo dos reagentes do processo apresentam. Ou seja, o consumo de calor, eletricidade e propano para o forno são completamente equilibrados com a recuperação de acetona, fibra de vidro, ácido benzoico e entre outros.

Especificamente no caso da eutrofização aquática, a recuperação e purificação do ácido benzoico proveniente da pirólise é a valorização com maior efeito positivo para o meio ambiente dentre os coprodutos recuperados. Esta grande diferença acontece, pois, a produção deste ácido foi evitada e demanda grande quantidade de DQO, um dos causadores da eutrofização aquática.

Em contrapartida, os indicadores de aquecimento global e acidificação aquática apresentam seu impacto ambiental amenizado igualmente pela valorização da fibra de vidro, acetona, acetaldeído e gás natural.

A pirólise já é um processo realizado em escala industrial e segundo este estudo compensa a reciclagem do compósito por não ter algum impacto negativo ao meio ambiente. Entretanto, como em todos os processos estudados, a valorização e recuperação das saídas do processo podem ser uma solução para minimizar ainda mais os impactos ambientais gerados pela cadeia de compósitos poliméricos que não são considerados neste trabalho, como transporte, coleta, utilização e etc.

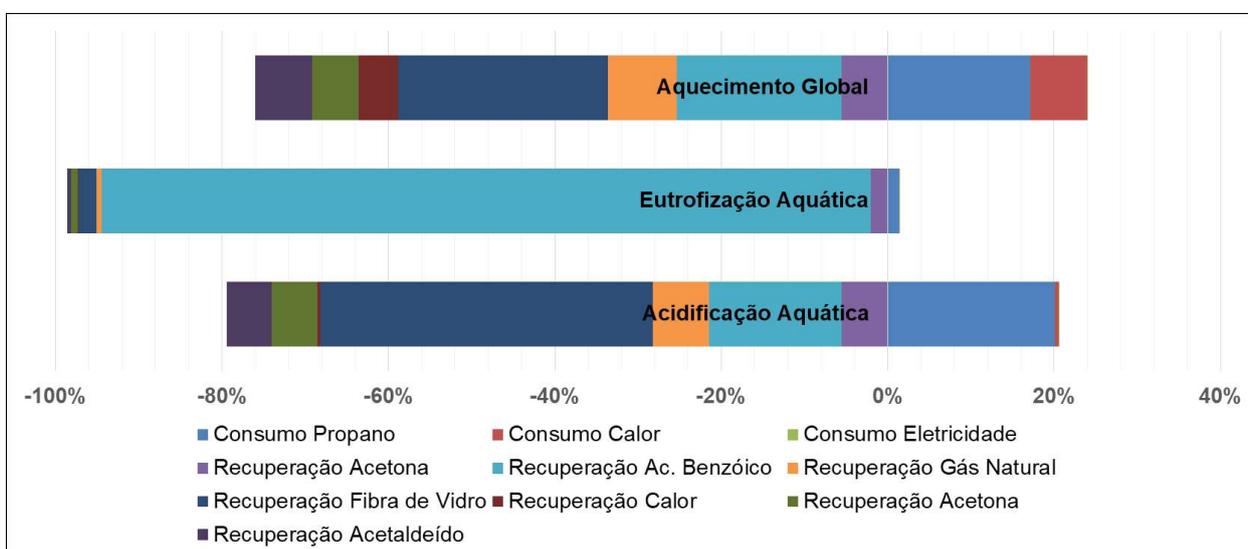


Figura 28 Representatividade dos parâmetros da pirólise nos impactos ambientais (**Cenário I**)

Hidrólise em condições supercríticas

Em seguida, os impactos ambientais da hidrólise supercrítica são discutidos e analisados a partir das Figuras 29 e 30. Similarmente à solvólise anteriormente descrita, a hidrólise em condições supercríticas nos três indicadores estudados apresentam impacto negativo ao meio ambiente. Ou seja, ajudam na redução de emissões poluentes de processos da cadeia do compósito polimérico.

O indicador de aquecimento global é o único que pode ser afetado negativamente pela hidrólise em condições supercríticas no caso do cenário II, em que não há

valorização dos coprodutos. Este impacto se deve provavelmente pelo consumo de energia elétrica e calor para garantir a temperatura e a pressão elevadas.



Figura 29 Comparativo dos impactos ambientais equivalentes entre cenário I (com valorização) e cenário II (sem valorização) para a hidrólise supercrítica

A análise mais detalhada de cada indicador demonstra que o maior impacto negativo é o consumo de calor necessário para a operação do processo. Entretanto, para compensar este efeito, a recuperação dos produtos da decomposição da resina polimérica, o ácido tereftálico e o EG, é suficiente.

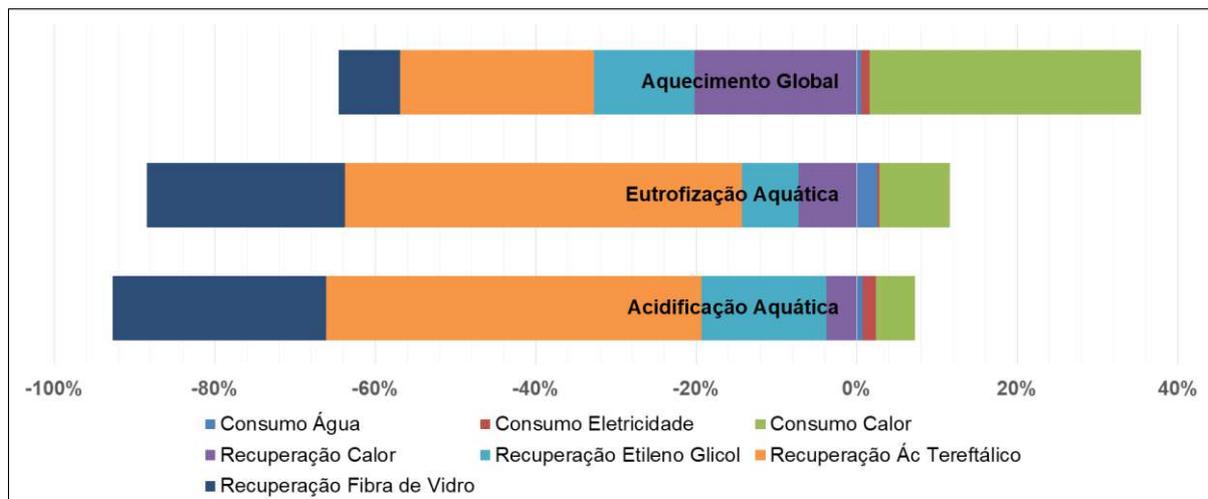


Figura 30 Representatividade dos parâmetros da hidrólise supercrítica nos impactos ambientais (Cenário I)

A hidrólise em condições ácidas e a gaseificação apresentaram desempenho ambiental similar às solvólises e ao tratamento térmico, respectivamente, analisados anteriormente. Os detalhes de cada um desses processos podem ser consultados no Anexo IV deste trabalho.

Como previsto e de maneira lógica, a hipótese considerando a valorização dos produtos e energias dos processos de reciclagem de compósitos descritos anteriormente (glicólise, pirólise, hidrólise em condição supercrítica, em meio ácido e gaseificação), cenário I, diminui significativamente os impactos ambientais que podem ser gerados. Assim, isto implica que os processos de reciclagem apresentarem um bom desempenho ambiental, devem necessariamente valorizar e recuperar o máximo de produtos e coprodutos, consumindo o mínimo de recursos externos.

5.2.2 Comparativa

A comparação dos impactos ambientais gerado pelos processos de reciclagem foi realizada considerando o **cenário I**, com valorizações de todos os produtos. As valorizações de coprodutos e energia permitem contribuir para os indicadores de maneira positiva em função dos processos planejados.

A acidificação aquática, que corresponde ao aumento do nível de ácido no meio aquático é quantificada em emissão de SO₂ equivalentes. As principais substâncias que contribuem para a acidificação são os óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio e amônia, que em presença de umidade se transformam em ácido. (52)

A comparação da emissão da quantidade de SO₂ equivalente dos cinco processos estudados de reciclagem pode ser observado na Figura 31. Dentre os cinco processos a glicólise é o único método que possui impacto negativo ao ambiente em emissão de SO₂, sendo os valores de emissão representados no gráfico positivos. O impacto associado à glicólise se explica pela emissão de gases ácidos na incineração realizada para remoção da resina residual na etapa de recuperação das fibras.

Contrariamente à glicólise, os outros quatro processos possuem contribuições positivas para o meio ambiente. As metodologias de hidrólise (sob condições supercríticas e a ácida) não emitem substâncias acidificantes visto que os produtos das correntes de saída são recuperados e reciclados. Em contrapartida, as emissões de substâncias ácidas ligadas aos processos termoquímicos são compensadas pela grande valorização de coprodutos, fazendo com que sejam processos que ajudam a reduzir o impacto da acidificação aquática.

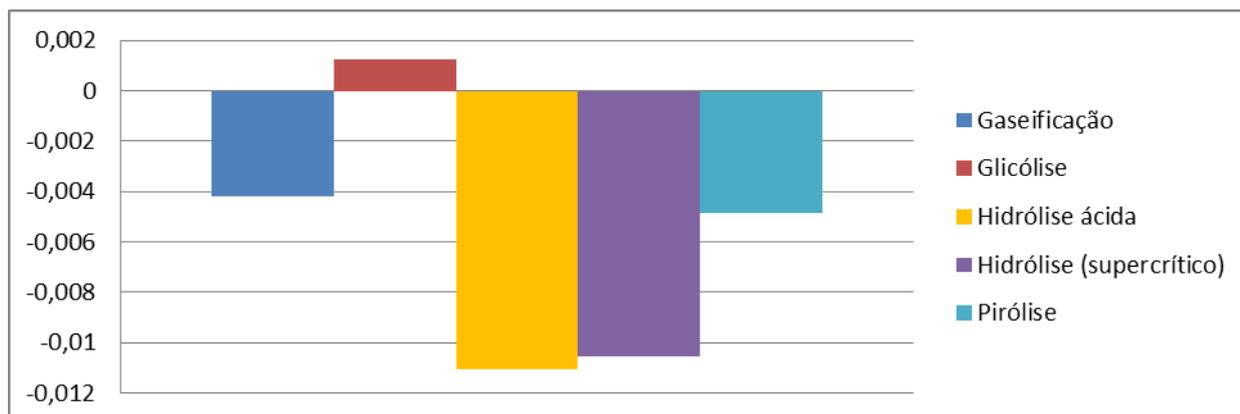


Figura 31 Comparativo dos resultados de acidificação aquática (kg SOeq)

O indicador da eutrofização aquática é quantificado em quilograma de PO_4 equivalente por ser uma substância que contribui para o mesmo (23). Esta unidade de impacto caracteriza a demanda de oxigênio químico em meio aquático (DQO).

A Figura 32 consolida as quantidades equivalentes que os cinco processos emitem de PO_4 . Os processos de solvólise, após a valorização dos coprodutos, evitam a emissão de certas substâncias orgânicas (EG, TPA) que apresentam demanda de oxigênio químico na água. Estes produtos são o EG e o TPA recuperados em quantidades diferentes nos dois processos de hidrólise, impactando no indicador de maneira proporcional a quantidade de monômeros extraídos.

Seguindo a mesma lógica, a pirólise, como os processos de solvólise, recuperam coprodutos como a acetona e o acetaldeído que apresentam uma demanda química de oxigênio considerável durante sua fabricação. Assim, é possível observar que a gaseificação é, dentre os processos estudados, o único que impacta negativamente na eutrofização das águas. A valorização do conjunto de produtos deste processo não compensa os impactos gerados para a produção do material compósito, o que pode

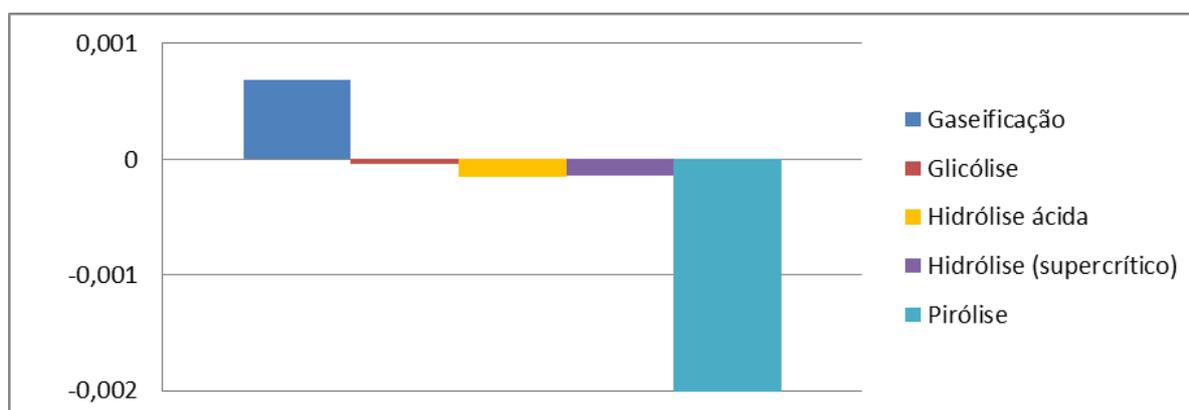


Figura 32 Comparativo dos resultados de eutrofização aquática (kg PO_4P -lim)

explicar o resultado do indicador.

O último impacto estudado, o aquecimento global, é representado em kg de CO₂ equivalente e tem o indicador dos processos avaliados na Figura 33. Os processos de gaseificação e de glicólise são os únicos que apresentam impacto negativo no indicador de aquecimento global. Este resultado pode ser explicado pelo balanço negativo entre a produção de energia destes dois processos e as emissões de gases do efeito estufa gerados pela fabricação do material compósito.

A glicólise apresenta um impacto particularmente marcante devido à combustão da matéria orgânica residual nas fibras, responsável pela emissão de gases pelo efeito estufa e a recuperação de energia acaba não compensando. Os processos de hidrólise em contrapartida são positivamente impactantes em consequência da valorização os hidrocarbonetos gerados da recuperação de energia ainda disponível no sistema. Por fim, a pirólise afeta positivamente este indicador pelo bom desempenho de evitar gases do efeito estufa derivados da produção de energia.

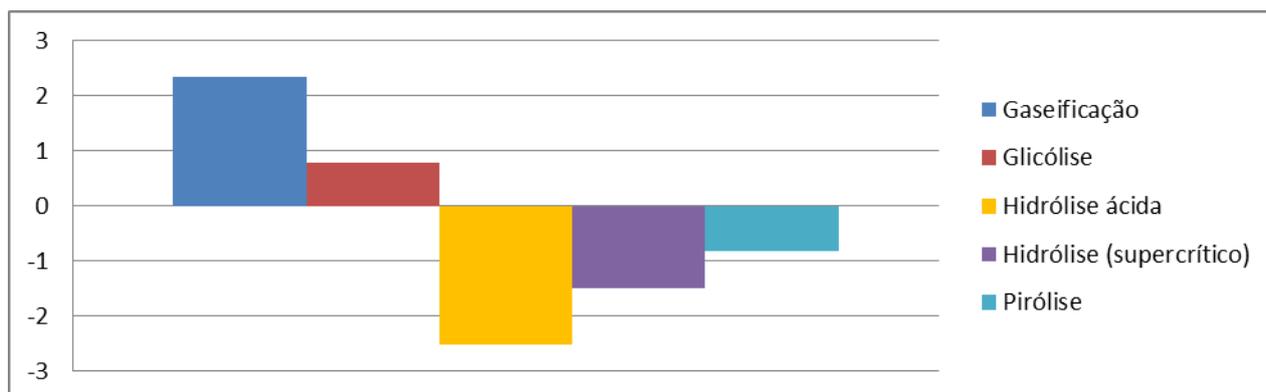


Figura 33 Comparativo dos resultados de aquecimento global (kg CO₂eq)

Globalmente, para cada indicador ambiental existe um processo de reciclagem mais impactante e um mais favorável. Para a acidificação aquática, a glicólise é o único processo impactante devido à incineração da resina residual das fibras. Em contrapartida a hidrólise ácida é o processo mais favorável graças à valorização de substâncias de caráter ácido.

Para a eutrofização, a gaseificação é o único processo impactante, visto que os produtos valorizados não são suficientes para compensar os impactos associados a concepção do material compósito. No entanto, a pirólise é o processo mais favorável

já que recupera substâncias que quando são produzidas demandam uma grande quantidade de DQO.

Finalmente, para o aquecimento global, a pirólise é o processo mais impactante devido à emissão de CO e CO₂ maior. Contrariamente ao processo termoquímico tratado, a hidrólise que valoriza produtos como o EG e o TPA, evitando a emissão de gases do efeito estufa para produzi-los.

6 CONCLUSÃO

Após o estudo de impactos ambientais dos processos de reciclagem dos materiais compósitos, é possível concluir que a metodologia permite analisar eficaz e pertinentemente indicadores do desenvolvimento durável. Neste momento, foi possível identificar os pontos positivos e negativos de cada processo para reciclar este tipo de material.

Em seguida a aplicação da metodologia, é concluído que:

- A utilização da ferramenta de simulação de processos para estabelecer o inventário de ciclo de vida é relativamente simples de ser aplicado, já que necessita de poucos parâmetros para realizar as simulações.
- A coleta de informações a partir de patentes permitiu minimizar as diferenças de maturidades de processos de uma metodologia em relação a outra, o que garante maior coerência nas análises comparativas realizadas.

Além do levantamento de uma metodologia, na etapa de análise do ciclo de vida dos processos reconfirma-se que os métodos de reciclagem são favorecidos ambientalmente com a valorização dos produtos gerados (reutilização de energia e coprodutos). A decisão por qual etapa reaproveitar de energia e produtos dependerá de ponderações e critérios comparativos com os custos dos processos de reciclagem, que não foram levados em conta neste estudo.

Finalmente, ainda se faz necessário a melhoria de performance dos cinco processos de reciclagem de compósitos poliméricos estudados, a fim de reduzir os impactos ambientais e financeiros com o objetivo de tornarem-se viáveis e sustentáveis.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As sugestões para seguimento do projeto seriam de desenvolver uma metodologia de análise econômica para comparar em duas perspectivas distintas e relevantes os processos de reciclagem. Incluir, também, no campo de estudo todo o processo de coleta ou logística reversa e uso dos materiais a serem reciclados.

Além disso, ampliar o campo de estudo para outros tipos de compósitos, como os com resina termorrígida, que são de difícil previsibilidade de reciclagem.

Finalmente, para tornar mais próximo à realidade, as simulações que geram os inventários de ciclo de vida poderiam incluir as leis cinéticas do comportamento da decomposição da resina e análises de sensibilidade dos processos (pureza da corrente de entrada, variações de temperatura e pressão...).

8 BIBLIOGRAFIA

1. Ventura, A. M. (2009). Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, pp. Vol. 21, 4.
2. BEDIN, M. G. (Fevereiro de 2014). COMPÓSITO COM POLIETILENO DE BAIXA DENSIDADE E FIBRA DE. Campos dos Goytacazes , Brasil.
3. Wiebeck, D. F., & Esper, F. J. (2016). ESTUDO SOBRE O TRATAMENTO DE RESÍDUOS DE COMPÓSITOS. *Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, 4243-4250
4. Job, S., Leeke, D. G., Mativenga, P. P., Oliveux, D. G., Pickering, P. S., & Shuaib, N. A. (2016). *COMPOSITES RECYCLING: where are we now?* Composites UK.
5. Kersting, D. d., Marinucci, G., & Wiebeck, H. (2012). RECICLAGEM DE COMPÓSITOS CARBONO/EPÓXI:USO DE RECICLAGEM QUÍMICA ASSOCIADA A OUTROS MÉTODOS . *Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, 11907-11914.
6. Jacquemin, L. (2013). *Analyse du Cycle de Vie*. Toulouse: Altran Research.
7. Rio, P. . (s.d.). *Capítulo 2 : Materiais Compósitos*. Acesso em Janeiro de 2018, disponível em Maxwell PUC -Rio: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/15391/15391_3.PDF
8. Centre for Industry Education Collaboration, U. (Janeiro de 2018). *The Essencial Chemical Industry Online*. Fonte: The Essencial Chemical Industry Online: <http://www.essentialchemicalindustry.org/materials-and-applications/composites.html>
9. Kulkarni, S. G. (Março de 2012). *Svnit Composite Materials*. Acesso em 2018 de Janeiro, disponível em Slideshare: <https://www.slideshare.net/neerajparmar68/svnit-composite-materials>
10. Moreira, A. M. (2008/2009). *Materiais de Construção 1. Materiais Compósitos*. Instituto Politécnico de Tomar.
11. NPTEL. (s.d.). *Composite Materials*. Acesso em Janeiro de 2018, disponível em NPTEL e-learning courses: http://nptel.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIScBANG/Composite%20Materials/pdf/Lecture_Notes/LNm1.pdf
12. Chawla, K. K. (2008). *Composite Materials*. In: M. A. Meyers, & K. K. Chawla, *Mechanical Behavior of Materials, Second Edition*. Cambridge.
13. International, A. (s.d.). *Scientific Principles of Composite*. Acesso em Janeiro de 2018, disponível em Composite/ The Designer Material: <https://www.asminternational.org/documents/10192/1942084/composite.pdf/0eb5cca8-4613-482c-811c-993c58b42e92>

14. Dr. Sanjay Mazumdar, D. K. (2017). *State of the Composites Industry Report for 2017*. Composite Manufacturing Magazine, The American Composites Manufacturing Association .
15. Moderno, P. (Fevereiro de 2013). *Compósitos: Balanço e perspectivas*. Acesso em Janeiro de 2018, disponível em Plástico.com.br: <https://www.plastico.com.br/compositos-balanco-e-perspectivas/>
16. STAFF, C. W. (Janeiro de 2014). *Composites 2014: A multitude of markets*. Acesso em Janeiro de 2018, disponível em Composite World: <https://www.compositesworld.com/articles/composites-2012-a-multitude-of-markets>
17. Centre d'Animation Regional en Materiaux Avances. Glossaire des Materiaux Composites. 2004.
18. David Cripps, Gurit. (2014). *Netcomposites*. Fonte: <http://www.netcomposites.com/guide/glass-fibrefiber/32>.
19. Araújo, D. G. (2012). *DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO DE POLICLORETO DE VINILA (PVC) REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO*. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos.
20. KMG, D. (s.d.). *Plastics*. Acesso em Janeiro de 2018, disponível em Design Technology: <http://designkmg.weebly.com/plastics.html>
21. GOMES, M. D. (2015). *PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS (PALF)*. CAMPOS DOS GOYTACAZES: UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO (UENF).
22. ONERA. (s.d.). *Introduction Composites*.
23. Sirris. (s.d.). *Composites: materials of the future, Part 2: Market and market developments*. Acesso em Janeiro de 2018, disponível em Plus Composite: http://www.pluscomposites.eu/sites/default/files/Technical%20series%20-%20Part%202%20-%20Market%20and%20market%20developments_0.pdf
24. ZUÑEDA, J. L., & PIEROZAN, M. D. (2016). *COMPÓSITOS TERMOFIXOS: Uma análise do mercado brasileiro*. MAXIQUIM.
25. *Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos* . (s.d.). Acesso em 2018 de Janeiro, disponível em ALMACO: <http://almaco.org.br/>
26. Rebitzer, G. E.-P. (2004). Life cycle assessment part 1 : framework, goal and scope definition, inventory analysis, and application. *Environ. Int.* 30, 701-702.
27. Fu Gua, J. G. (2017). From waste plastics to industrial raw materials: A life cycle assessment of mechanical plastic recycling practice based on a real-world case study. *Science of The Total Environment*, 1192-1207.

28. Verdejo-Andrés, E. (Julho de 2011). *El ecodiseño en los envases de plástico*. Acesso em Janeiro de 2018, disponível em Interempresas Net: <http://www.interempresas.net/Envase/Articulos/54425-El-ecodiseno-en-los-envases-de-plastico.html>
29. ISO, 2006a. ISO14040. Environmental Management - Life Cycle Assessment – Principles and Framework. British Standards Institution, London, UK.
30. Soraia Pimenta, S. T. (2014). Chapter 19 – Recycling of Carbon Fibers. In: M. R. Ernst Worrell, *Handbook of Recycling* (pp. 269-283). Elsevier.
31. S.M. Sapuan, M. M. (2014). Concurrent engineering approach in the development of composite products: A review. *Materials & Design*, 161-167.
32. Norshah Aizat Shuaib, P. T. (2016). Energy demand in mechanical recycling of glass fibre reinforced thermoset plastic composites. *Journal of Cleaner Production*, 198-206.
33. Krawczak, P. (2012). *Recyclage des composites*. Paris: Techniques de l'Ingénieur.
34. Leian Bartolome, M. I.-M. (2012). *Recent Developments in Chemical Recycling of PET*. InTech.
35. Yang, Y., Boom, R., Irion, B., Heerden, D.-J. v., Kuiper, P., & Wit, H. d. (2012). Recycling of composite materials. *51*(53-68).
36. Christelle Morin, A. L.-S. (2012). Near Sub- and Supercritical solvolysis of Carbon Fibre Reinforced Polymers (CFRPs) for Recycling Carbon Fibres as a Valuable Resource: State of the Art. *66*(232-240).
37. Governo Federal. Lei nº12.305 – Brasil. 02AGO2010
38. D. F. Kersting, H. W. (2016). ESTUDO SOBRE O TRATAMENTO DE RESÍDUOS DE COMPÓSITOS ESTRUTURAIS PRODUZIDOS COM FIBRA DE VIDRO E FIBRA DE CARBONO - UMA REVISÃO. *Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, 4243-4250.
39. (Agosto de 2016). Acesso em Janeiro de 2018, disponível em Sistema Devolva: <http://www.devolva.com.br/> Consulta 14AGO2016;
40. Hasenack, A. (Julho de 2013). *Empresas criam tecnologias que viabilizam a reciclagem de compósitos*. Acesso em Janeiro de 2018, disponível em Global Polymers: <http://www.globalpolymers.com.br/not%C3%ADcias/empresas-criam-tecnologias-que-viabilizam-a-reciclagem-de-comp%C3%B3sitos>
41. IPT. (s.d.). *Projeto da Almaco com dois laboratórios do IPT propõe soluções para reaproveitamento de materiais*. Acesso em Janeiro de 2018, disponível em Instituto de Pesquisas Tecnológicas: http://www.ipt.br/centros_tecnologicos/BIONANO/cases/5-reciclagem_de_compositos.htm

42. *Les kiosques Réco*. (s.d.). Acesso em Janeiro de 2018, disponível em Reco France: <http://www.reco-france.com/>
43. GUYARD, C. (Setembro de 2005). *Recyclage matière et/ou énergie, les procédés de récupération des composites se développent. Le problème comme toujours reste la collecte*. Acesso em Janeiro de 2018, disponível em Industrie et Technologies: <https://www.industrie-techno.com/le-recyclage-des-composites-trouve-sa-voie.15802>
44. (2012). Acesso em Janeiro de 2018, disponível em European Composite Recycling Technology: <http://ecrtechnology.com/>
45. Research, E. P. (s.d.). *Espacenet Patent Research*. Acesso em Janeiro de 2018, disponível em European Patent Office: <https://worldwide.espacenet.com/>
46. USPTO. (s.d.). *Patent*. Acesso em Janeiro de 2018, disponível em United States Patent and Trademark Office: <https://www.uspto.gov/patent>
47. AspenTech. (2014). *AspenTech Hysys*. Fonte: <http://www.aspentech.com/products/aspen-hysys.aspx>.
48. Anaële Lefeuvre Xavier, Y. A.-M.-P. (2017). Modelling pyrolysis process for CFRP recycling in a closed-loop supply chain approach. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2029-2034.
49. Operating Conditions for the Pyrolysis of Poly-(ethylene terephthalate) in a Conical Spouted-Bed Reactor. (2010). *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2064-2069.
50. Jlang, G. (14 de June de 2012). *Patente N° WO2012/172357A1*. Angleterre.
51. Dossier Scientifique du CNRS. (s.d.). *Ecosystèmes aquatiques continentaux: Eutrophisation*. CNRS.
52. ADEME. (s.d.). *Pluies acides et acidification*. Fonte: <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=17233>.
53. Goto, M. (2009). Chemical recycling of plastics using sub- and supercritical fluids. 47(500-507).
54. Sato, O., Osada, M., Shirai, M., & Arai, K. (s.d.). *Depolymerization of polyesters in sub- and supercritical water*. Sendai.
55. Ltd., C. S. (17 de Janvier de 2013). *Patente N° WO2013/007128A1*.
56. Fakirov, S. (s.d.). *Handbook of Thermoplastic Polyesters: Homopolymers, Copolymers, Blends, and Composites*.
57. Grispin, C. W. (09 de Mai de 1985). *Patente N° EP0162802A2*. Allemagne.
58. M.E. Otheguya, A. G. (s.d.). *RECYCLING OF END-OF-LIFE THERMOPLASTIC COMPOSITE BOATS*.

59. Gourdon, R. (2013). Thermochemical treatment of biomass.
60. Michael P Ekart, W. M. (04 de Setembro de 2022). *Patente N° EP1153070B1*.
61. Gerar Duran, G. T. (10 de Janvier de 2002). *Patente N° WO02/02680A1*. France.
62. Recycling issues: some latest developments. (2004). *Plastics, Additives and Compounding*, 40-41.
63. *L'Analyse du Cycle de Vie (ACV), outil préférentiel de quantification des impacts environnementaux*. (Setembro de 2010). Acesso em Janeiro de 2018, disponível em L'encyclopédie du développement durable : <http://encyclopedie-dd.org/encyclopedie/neige-neige-economie-neige-neige/l-analyse-du-cycle-de-vie-acv.html>
64. Altran Technologies. (2014). *Altran*. Fonte: <http://www.altran.fr/>.
65. Association, L. A. (2017). 30% decrease in Brazilian composites sales. *Reinforced Plastics*, 16.
66. Bain, R. (2007). *Worldwide Biomass Potential: Technology Characterizations*. National Renewable Energy Laboratory.
67. Botton, A. (2013). *Simulation des procédés de recyclage et de valorisation du polyéthylène terephthalate et couplage avec les outils et méthodes en analyse du cycle de vie*.
68. Callister, W. D. (2006). Composites. In: W. D. Callister, *Materials Science and Engineering: An Introduction* (pp. 577-617). John Wiley & Sons.
69. Castan, A. (2012). *Simulation de procédés pour l'analyse de cycle de vie de matériaux biosourcé*.
70. Centre d'Animation Regional en Materiaux Avances. (2004). Glossaire des Materiaux Composites.
71. David Cripps, G. (s.d.). *NetComposites*. Acesso em Janeiro de 2018, disponível em Glass Fibre/Fiber: <https://netcomposites.com/guide-tools/guide/reinforcements/glass-fibrefiber>
72. J.R. Duflou, J. M. (2009). Environmental impact analysis of composite use in car manufacturing. *CIRP Annals*, 9-12.
73. Natalia Crespo Mendesa, C. B. (2015). Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. *Production*, 1.
74. Pachione, R. (Janeiro de 2014). *Plástico.com.br*. Acesso em Janeiro de 2018, disponível em Compósito: Em ano adverso, mercado de compósito cresce: <https://www.plastico.com.br/noticia-compositos-em-ano-adverso-mercado-de-compositos-cresce/>

75. PINTO, K. N. (2002). RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA: POLIÉSTER INSATURADO REFORÇADO COM FIBRAS DE VIDRO . São Paulo, Brasil: IPEN - AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO.
76. Planetoscope. (s.d.). Le marché des matériaux composites.
77. Santos, R. P. (2012). Compósitos baseados em PET reciclado, fibras de sisal e plasticizantes oriundos de fontes renováveis: estudo do processamento e propriedades destes materiais. *Dissertação de Mestrado*. São Carlos, São Paulo, Brasil.
78. SimaPro. (2014). *SimaPro The world's most widely used LCA software*. Fonte: <http://www.simapro.co.uk/>.
79. Sirris. (s.d.). *Les composites: des matériaux d'avenir*. Brussel.
80. Sujit Das, J. W. (2016). *Global Carbon Fiber Composites Supply Chain Competitiveness Analysis*. OAK RIDGE NATIONAL LIBORATORY.
81. Tarverdi, K. (2009). *Improving the mechanical recycling and reuse of mixed plastics and polymer composites*. Kingston Lane.
82. Tecnológicas, I. d. (s.d.). *Reciclagem de Compósitos*. Acesso em Janeiro de 2018, disponível em IPT: http://www.ipt.br/centros_tecnologicos/BIONANO/cases/5-reciclagem_de_compositos.htm
83. TourbeHorticole. (2012). *Environmental Life Cycle Analysis*.
84. Ventura, A. M. (2009). Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, 3-4.
85. Williams, P. (2003). Recycling of Automotive Composites - The Pyrolysis Process and its Advantages. *Materials World*, 7(24-26).
86. Zangiacomi, M. H., & Bittencourt, E. (2006). COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE PANox E FIBRAS DE ARAMIDA . *RECIE*, 55-61

ANEXO I – PREMISSAS PARA BUSCA DE PUBLICAÇÕES

Processo de reciclagem	Palavras-chave	Francês	Inglês
Glicólise	Glicólise, reciclagem, compósito polimérico	<i>Glycolyse, recyclage, compositepolymerique</i>	<i>Glycolysis, recycling, polymercomposite</i>
Hidrólise (supercrítica)	Hidrólise, condições supercríticas, reciclagem, compósito polimérico	<i>Hydrolyse, condition supercritique, recyclage, composite polymerique</i>	<i>Hydrolysis, supercritical conditions, recycling, polymer composite</i>
Hidrólise (HNO₃)	Hidrólise, ácido nítrico, reciclagem, compósito polimérico	<i>Hydrolyse,acide nitrique recyclage, composite polymerique</i>	<i>Hydrolysis, nitric acid, recycling, polymer composite</i>
Pirólise	Pirólise, reciclagem, compósito polimérico	<i>Pyrolyse, recyclage, compositepolymerique</i>	<i>Pyrolysis, recycling, polymercomposite</i>
Gaseificação (leito fluidizado)	Gaseificação, leito fluidizado, reciclagem, compósito polimérico	<i>Craquage thermique, lit fluidisé, recyclage, composite polymerique</i>	<i>Gasification, fluidized bed, recycling, polymer composite</i>

ANEXO II – CONDIÇÕES OPERACIONAIS E ESCOPO DAS SIMULAÇÕES DOS PROCESSOS DE RECICLAGEM

- GLICÓLISE

Material	Reação Glicólise (CRV-100)						Separação Sól-Liq (X-100)		
Nome	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fração Vapor	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,61	0,00	0,00	0,00
Temperatura (°C)	25,00	25,00	25,00	230,00	230,00	230,00	199,00	86,00	199,60
Pressão (kPa)	101,32	101,32	101,32	101,32	101,32	101,32	101,32	101,32	101,32
Fluxo Molar (kgmole/h)	0,10	0,47	0,57	0,30	0,19	0,49	0,49	0,43	0,05
Fluxo Mássico (kg/h)	14,50	29,00	43,50	18,93	24,57	43,50	43,50	38,60	4,90
Fluxo Volume Líquido (m3/h)	0,01	0,03	0,04	0,02	0,02	0,04	0,04	0,03	0,00
Fluxo Calor (kJ/h)	-14358,49	-214316,22	-228674,71	-111021	-107772	-218793	-236931,61	-233704,66	-13637,85
Composição	Reação Glicólise (CRV-100)						Separação Sól-Liq (X-100)		
Nome	1	2	4	5	3	6	7	8	9
PET	0,60	0,00	0,00	0,06	0,11	0,03	0,03	0,00	0,23
DMT	0,00	0,00	0,02	0,06	0,00	0,03	0,03	0,04	0,00
BHET	0,00	0,00	0,00	0,26	0,00	0,10	0,10	0,12	0,00
EG	0,00	1,00	0,98	0,40	0,82	0,75	0,75	0,85	0,00
SiO2	0,40	0,00	0,00	0,22	0,07	0,09	0,09	0,00	0,77
N2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
O2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CH4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propane	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CO2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nome	Q-100	Q-101	Q-102						
Fluxo Calor (kJ/h)	9880,76	18137,65	-10410,90						
Tipo	Vapor	Água refrig.	Água refrig						
Fluxo Mássico (kg/h)	4,50	867,20	497,80						

Material	Coluna Flash 1 (V-100)			Coluna Flash 2 (V-101)			Coluna de destilação (T-100)			
Nome	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Fração Vapor	0,00	1,00	0,00	0,20	0,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00
Temperatura (°C)	86,00	105,00	105,00	62,55	129,85	129,85	108,40	277,72	164,15	170,06
Pressão (kPa)	1,01	1,01	1,01	0,05	0,05	0,05	0,05	24,32	34,45	24,32
Fluxo Molar (kgmole/h)	0,43	0,34	0,09	0,09	0,05	0,04	0,38	0,38	0,35	0,03
Fluxo Mássico (kg/h)	38,60	22,03	16,57	16,57	12,85	3,72	25,75	25,75	21,74	4,01
Fluxo Volume Líquido (m3/h)	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,00
Fluxo Calor (kJ/h)	-233704	-132730	78661,16	-78661,16	-57422,32	-18004,71	-150735	-143551	-152575	-17461,11
Tipo da corrente	Entrada	Produtos	Produtos	Entrada	Produtos	Produtos	Entrada	Entrada	Produtos	Produtos

Composição	Coluna Flash 1 (V-100)			Coluna Flash 2 (V-101)			Coluna de destilação (T-100)			
Nome	10	11	12	13	15	14	16	17	18	19
PET	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DMT	0,04	0,02	0,10	0,10	0,20	0,01	0,04	0,04	0,00	0,47
BHET	0,12	0,00	0,54	0,54	0,00	0,98	0,00	0,00	0,00	0,00
EG	0,85	0,98	0,37	0,37	0,80	0,00	0,96	0,96	1,00	0,53
SiO2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
O2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CH4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propane	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CO2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nome	Q-103	Q-104	Q-105	Q-106	Q-107					
Fluxo Calor (kJ/h)	22312,98	3234,14	16695,39	-7184	43182					
Tipo	Vapor	Vapor	Vapor	Electricity	Cooling water					

Material	Forno (FH-100)						Reator de conversão (CRV-101)			
Nome	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Fração Vapor	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	0,00
Temperatura (°C)	25,00	26,08	25,00	300,00	330,90	349,62	650,00	650,00	25,00	25,00
Pressão (kPa)	100,00	100,00	101,32	101,32	101,32	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Fluxo Molar (kgmole/h)	11,60	11,65	2,16	0,15	2,31	11,65	11,65	0,04	11,65	0,04
Fluxo Mássico (kg/h)	361,94	366,84	62,23	2,41	64,64	366,84	364,34	2,50	364,34	2,50
Fluxo Volume Líquido (m3/h)	0,62	0,62	0,12	0,01	0,11	0,62	0,62	0,00	0,62	0,00
Fluxo Calor (kJ/h)	0,00	-13637,85	0,00	-9409,27	-109587	101476	170970,13	-12462,72	-61219,42	-13921,46

Composição	Forno (FH-100)						Reator de conversão (CRV-101)			
Nome	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
PET	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DMT	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BHET	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
EG	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SiO2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	1,00
N2	0,20	0,20	0,80	0,00	0,75	0,20	0,20	0,00	0,20	0,00
O2	0,80	0,80	0,20	0,00	0,06	0,80	0,79	0,00	0,79	0,00
CH4	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propane	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CO2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
H2O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nome	Q-108	Q-109	Q-110							
Fluxo Calor (kJ/h)	71966	232189	1458							
Tipo	Vapor	Recup de energia	Recup de energia							

- **Solvólise (condições supercrítica)**

Material	Solvólise						
Nome	1	2	4	3	16	5	6
Fração Vapor	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
Temperatura (°C)	25,00	28,82	25,00	31,79	37,07	400,00	400,00
Pressão (kPa)	101,32	40000,00	101,32	200,00	200,00	200,00	200,00
Fluxo Molar (kgmole/h)	3,89	3,89	0,11	0,11	3,99	3,82	0,11
Fluxo Mássico (kg/h)	70,00	70,00	15,00	15,00	85,00	71,71	13,29
Fluxo Volume Líquido (m ³ /h)	0,07	0,07	1,12	1,12	1,19	0,07	1,12
Fluxo Calor (kJ/h)	-1107027,12	-1103330,37	-28778,51	-28631,18	-1131961,55	-877220,25	-42243,86
Composição	Solvólise						
Nome	1	2	4	3	16	5	6
PET	0,00	0,00	0,60	0,60	0,02	0,00	0,00
H ₂ O	1,00	1,00	0,00	0,00	0,97	0,98	0,00
TPA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60
EG	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00
SiO ₂	0,00	0,00	0,40	0,40	0,01	0,00	0,40
Nome	Q-100	Q-101	Q-102				
Fluxo Calor (kJ/h)	3696,76	147,33	212497,44				

Material	Diminuição de T e P			Separação Sol-liq	
Nome	7,00	8,00	9,00	10,00	11,00
Fração Vapor	0,97	0,97	0,97	0,98	0,00
Temperatura (°C)	400,00	180,00	176,96	180,00	180,00
Pressão (kPa)	200,00	200,00	101,32	101,32	101,32
Fluxo Molar (kgmole/h)	3,93	3,93	3,93	3,89	0,04
Fluxo Mássico (kg/h)	85,00	85,00	85,00	82,41	2,59
Fluxo Volume Líquido (m ³ /h)	1,19	1,19	1,19	0,08	1,11
Fluxo Calor (kJ/h)	-919464,22	-958469,93	-958469,93	-959621,35	1676,96
Composição	Produit reac	refroid	depress	matrice+ H ₂ O	fibre
Nome	7,00	8,00	9,00	10,00	11,00
PET	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H ₂ O	0,96	0,96	0,96	0,97	0,00
TPA	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00
EG	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00
SiO ₂	0,01	0,01	0,01	0,00	1,00
Nome	Q-102	Q-104			
Fluxo Calor (kJ/h)	212497,44	525,55			

Material	Separação 2			Purificação	
Nome	14	15	17	12	13
Fração Vapor	1,00	0,00	1,00	1,00	0,00
Temperatura (°C)	275,00	275,00	151,17	60,44	133,55
Pressão (kPa)	101,32	101,32	20,26	20,26	20,26
Fluxo Molar (kgmole/h)	3,82	0,07	3,82	3,76	0,06
Fluxo Mássico (kg/h)	71,67	10,74	71,67	67,89	3,77
Fluxo Volume Líquido (m3/h)	0,07	0,01	0,07	0,07	0,00
Fluxo Calor (kJ/h)	-895615,06	-48758,85	-912959,61	-901658,19	-26576,05
Composição	Separação 2			Purificação	
Nome	14	15	17	12	13
PET	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2O	0,98	0,01	0,98	1,00	0,01
TPA	0,00	0,99	0,00	0,00	0,00
EG	0,02	0,00	0,02	0,00	0,99
SiO2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nome	Q-106	Q-105	Q-107	Q-108	
Fluxo Calor (kJ/h)	15247,44	209410,73	224679,97	17344,55	

- **Hidrólise (HNO3)**

Materials	Hidrólise						
Nome	2	1	9	3	4	5	6
Fração Vapor	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
Temperatura (°C)	25,00	25,00	25,00	25,00	85,00	85,00	85,00
Pressão (kPa)	101,32	101,32	101,32	101,32	101,32	101,32	101,32
Fluxo Molar (kgmole/h)	0,07	1,89	0,10	1,98	0,00	2,01	2,01
Fluxo Mássico (kg/h)	10,00	34,00	6,00	40,00	0,00	50,00	50,00
Fluxo Volume Líquido (m3/h)	0,01	0,03	0,00	0,04	0,00	0,05	0,05
Fluxo Calor (kJ/h)	-21023,01	-537698,89	-17366,96	-555065,85	0,00	-574411,26	-574411,43
Composição	Hidrólise						
Nome	2	1	9	3	4	5	6
HNO3	0,00	0,00	1,00	0,05	0,07	0,05	0,05
SiO2	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
TPA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02
EG	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02
PET	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2O	0,00	1,00	0,00	0,95	0,93	0,90	0,90

Nome	Q-100
Fluxo Calor (kJ/h)	1677,57

Material	Separação sol-liq		Coluna Flash		Purificação		
Nome	7	8	10	11	12	13	14
Fração Vapor	0,84	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00
Temperatura (°C)	105,00	25,00	275,00	275,00	59,13	112,27	157,37
Pressão (kPa)	101,32	101,32	101,32	101,32	20,26	20,26	20,26
Fluxo Molar (kgmole/h)	1,98	0,03	1,94	0,04	1,89	0,04	1,94
Fluxo Mássico (kg/h)	48,28	1,72	41,10	7,18	38,41	2,69	41,10
Fluxo Volume Líquido (m3/h)	0,05	0,00	0,04	0,01	0,04	0,00	0,04
Fluxo Calor (kJ/h)	-504156,39	0,00	-444871,17	-32640,26	-524747,28	-19286,90	-453774,38
Composição	Separação sol-liq		Coluna Flash		Purificação		
Nome	7	8	10	11	12	13	14
HNO3	0,05	0,00	0,05	0,00	0,05	0,00	0,05
SiO2	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TPA	0,02	0,00	0,00	0,98	0,00	0,00	0,00
EG	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	0,97	0,02
PET	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2O	0,91	0,00	0,93	0,02	0,95	0,03	0,93

Nome	Q-101	Q-102	Q-103	Q-104	Q-105
Fluxo Calor (kJ/h)	70255,04	26644,96	177951,03	87679,76	8903,21

- **Pirólise**

Materials	Pirólise								
Nome	1	2	3	4	5	6	7	9	
Fração Vapor	0,00	1,00	0,00	0,85	0,58	0,93	0,00	0,00	
Temperatura (°C)	25,00	550,00	550,00	550,00	-20,00	174,00	20,00	-20,00	
Pressão (kPa)	101,32	101,32	101,32	101,32	101,32	101,32	101,32	101,32	
Fluxo Molar (kgmole/h)	3,26	7,62	1,30	8,93	8,93	6,68	2,25	1,70	
Fluxo Mássico (kg/h)	454,00	375,64	78,36	454,00	454,00	334,09	119,91	159,96	
Fluxo Volume Líquido (m3/h)	0,30	0,44	0,03	0,47	0,47	0,39	0,08	0,16	
Fluxo Calor (kJ/h)	-1023880,55	-1359799,54	172031,71	-1187767,83	-1786701,25	-1460831,09	-181222,24	-535370,75	
Nome	12	13	14	15	8	10	11	22	
Fração Vapor	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	
Temperatura (°C)	305,66	500,00	500,00	589,82	-20,00	127,37	237,25	89,81	
Pressão (kPa)	101,32	101,32	101,32	101,32	101,32	101,32	101,32	20,26	
Fluxo Molar (kgmole/h)	3,26	5,21	3,86	9,81	4,98	0,85	0,85	0,85	
Fluxo Mássico (kg/h)	454,00	150,00	170,00	320,00	174,13	51,41	108,55	51,41	
Fluxo Volume Líquido (m3/h)	0,30	0,17	0,34	0,51	0,23	0,06	0,09	0,06	
Fluxo Calor (kJ/h)	-748548,47	75616,17	-188176,10	-397132,47	-1059420,98	-162966,90	-286236,39	-166052,18	
Nome	17	16	18	19	23	24	25	26	
Fração Vapor	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	
Temperatura (°C)	33,92	15,74	14,84	15,99	20,51	120,03	12,36	14,16	
Pressão (kPa)	20,26	20,26	20,26	20,26	20,26	20,26	20,26	20,26	
Fluxo Molar (kgmole/h)	0,05	0,80	0,46	0,33	0,03	0,02	0,11	0,35	
Fluxo Mássico (kg/h)	4,86	46,55	26,62	19,94	2,02	2,83	6,26	20,35	
Fluxo Volume Líquido (m3/h)	0,01	0,06	0,03	0,02	0,00	0,00	0,01	0,03	
Fluxo Calor (kJ/h)	-12966,24	-160338,27	-96861,95	-73974,51	-3928,77	-8567,97	-23368,04	-84455,24	
Nome	27	28	20	21					
Fração Vapor	1,00	0,00	1,00	0,00					
Temperatura (°C)	115,56	150,72	25,00	25,00					
Pressão (kPa)	20,26	20,26	101,32	101,32					
Fluxo Molar (kgmole/h)	0,01	0,01	0,94	1,30					
Fluxo Mássico (kg/h)	1,49	1,34	41,54	78,36					
Fluxo Volume Líquido (m3/h)	0,00	0,00	0,05	0,03					
Fluxo Calor (kJ/h)	-5006,31	-2785,08	-155020,98	0,00					

Composição	Pirólise							
Nome	1	2	3	4	5	6	7	9
PET*	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SiO2*	0,40	0,00	1,00	0,15	0,15	0,00	0,58	0,00
CO	0,00	0,32	0,00	0,27	0,27	0,36	0,00	0,00
Ethylene	0,00	0,06	0,00	0,05	0,05	0,07	0,00	0,00
Cyclobutene	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
AcetAldehyde	0,00	0,12	0,00	0,11	0,11	0,00	0,42	0,00
Acetone	0,00	0,11	0,00	0,09	0,09	0,12	0,00	0,44
Acrolein	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
Benzene	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02
Toluene	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Naphthalene	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BZaicAcid	0,00	0,09	0,00	0,08	0,08	0,10	0,00	0,40
CO2	0,00	0,27	0,00	0,23	0,23	0,30	0,00	0,01
diAcetone-ol	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
BiPhenyl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2-FormBZAcid	0,00	0,02	0,00	0,02	0,02	0,03	0,00	0,10
Nitrogen	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Oxygen	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propane	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Nome	12	13	14	15	8	10	11	22
PET*	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SiO2*	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CO	0,00	0,00	0,00	0,09	0,48	0,00	0,00	0,00
Ethylene	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00
Cyclobutene	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
AcetAldehyde	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Acetone	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,87	0,01	0,87
Acrolein	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,03
Benzene	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,04
Toluene	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
Naphthalene	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BZaicAcid	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,78	0,01
CO2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,41	0,01	0,00	0,01
diAcetone-ol	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02
BiPhenyl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2-FormBZAcid	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,00
Nitrogen	0,00	0,80	0,00	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00
Oxygen	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2O	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00
Propane	0,00	0,00	1,00	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00

Nome	17	16	18	19	23	24	25	26
PET*	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SiO2*	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ethylene	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
Cyclobutene	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00
AcetAldehyde	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Acetone	0,32	0,91	0,92	0,89	0,58	0,00	0,81	0,95
Acrolein	0,01	0,04	0,04	0,03	0,02	0,00	0,04	0,04
Benzene	0,16	0,04	0,00	0,08	0,29	0,00	0,00	0,01
Toluene	0,08	0,00	0,00	0,00	0,11	0,05	0,00	0,00
Naphthalene	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00
BZoicAcid	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24	0,00	0,00
CO2	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00
diAcetone-ol	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	0,00	0,00
BiPhenyl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2-FormBZAcid	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nitrogen	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Oxygen	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H2O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Propane	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Nome	27	28	20	21
PET*	0,00	0,00	0,00	0,00
SiO2*	0,00	0,00	0,00	1,00
CO	0,00	0,00	0,00	0,00
Ethylene	0,00	0,00	0,00	0,00
Cyclobutene	0,00	0,00	0,00	0,00
AcetAldehyde	0,00	0,00	1,00	0,00
Acetone	0,00	0,00	0,00	0,00
Acrolein	0,00	0,00	0,00	0,00
Benzene	0,00	0,00	0,00	0,00
Toluene	0,08	0,00	0,00	0,00
Naphthalene	0,00	0,24	0,00	0,00
BZoicAcid	0,00	0,53	0,00	0,00
CO2	0,00	0,00	0,00	0,00
diAcetone-ol	0,92	0,22	0,00	0,00
BiPhenyl	0,00	0,00	0,00	0,00
2-FormBZAcid	0,00	0,00	0,00	0,00
Nitrogen	0,00	0,00	0,00	0,00
Oxygen	0,00	0,00	0,00	0,00
H2O	0,00	0,00	0,00	0,00
Propane	0,00	0,00	0,00	0,00

Nome	Q-100	Q-101	Q-102	Q-103	Q-106	Q-104	Q-112	Q-107
Fluxo Calor (kJ/h)	-439219,36	598933,417	144647,91	-133960,641	164124,346	77956,8536	3085,27585	22700,09343
Nome	Q-105	Q-109	Q-110	Q-108	Q-114	Q-115	Q-116	Q-117
Fluxo Calor (kJ/h)	29951,4306	20180,1708	9681,1113	2184,735159	2653,40788	4195,1436	-6766,18	885,317948
Nome	Q-118	Q-111						
Fluxo Calor (kJ/h)	1663,79884	26201,2614						

- **Gaseificação**

Material	Gaseificação			
Nome	1	2	3	4
Fração Vapor	0	1	1	0
Temperatura (°C)	25	25	650	650
Pressão (kPa)	101,324997	101,324997	101,324997	101,324997
Fluxo Molar (kgmole/h)	3,259106	25	41,879499	1,303642
Fluxo Mássico (kg/h)	454	720,26001	1096,041466	78,218547
Fluxo Volume Líquido (m3/h)	0,301822	0,835426	1,634741	0,029516
Fluxo Calor (kJ/h)	-954663,8449	0	-2001807,971	204424,1736
Composição	Gaseificação			
Nome	1	2	3	4
Hydrogen	0	0	0,140078	0
PET	0,6	0	0	0
SiO2	0,4	0	0	1
CO2	0	0	0,116732	0
CO	0	0	0,163424	0
Ethane	0	0	0,052855	0
Methane	0	0	0,023346	0
Nitrogen	0	0,8	0,477561	0
Oxygen	0	0,2	0,026005	0
Nome	Q-100			
Fluxo Calor (kJ/h)	-842722,6297			

Material	Separação (Ciclone)				
Nome	5	6	7	8	9
Fração Vapor	0,969811	0,9969	0	0	0,9969
Temperatura (°C)	649,999982	649,999982	649,999982	25	25
Pressão (kPa)	101,324997	101,324994	101,324994	101,324997	101,324997
Fluxo Molar (kgmole/h)	43,183141	42,009711	1,17343	1,17343	42,009711
Fluxo Mássico (kg/h)	1174,260013	1103,854231	70,405782	70,405782	1103,854231
Fluxo Volume Líquido (m3/h)	1,664258	1,63769	0,026568	0,026568	1,63769
Fluxo Calor (kJ/h)	-1797383,833	-1981389,339	184005,5057	0	-2942798,126
Composição	Separação				
Nome	5	6	7	8	9
Hydrogen	0,135849	0,139644	0	0	0,139644
PET	0	0	0	0	0
SiO2	0,030189	0,0031	1	1	0,0031
CO2	0,113208	0,11637	0	0	0,11637
CO	0,158491	0,162918	0	0	0,162918
Ethane	0,051259	0,052691	0	0	0,052691
Methane	0,022642	0,023274	0	0	0,023274
Nitrogen	0,463144	0,47608	0	0	0,47608
Oxygen	0,02522	0,025924	0	0	0,025924
Nome	Q-101		Q-102		
Fluxo Calor (kJ/h)	184005,5057	961408,7875			

- **HIDROLISE (HNO3)**

Hidrólise (HNO ₃) com valorizações					
Energia (MJ/1 ton SiO ₂)		Entrada (ton/1 ton SiO ₂)		Produtos evitados (ton/1 ton SiO ₂)	
Electricidade	Calor	Composto	HNO ₃	H ₂ O	TPA (99%)
5161,95	72418,39	5,80	3,48	19,71	4,16
					EG (98,5%)
					1,56
					Energia (MJ/ ton SiO ₂)
					143906,26
					1,00
					SAÍDA
					Saída superior separador
					22,27

- **Hidrólise (HNO₃) sem valorizações**

Hidrólise (HNO ₃) sem valorizações					
Energia (MJ/1 ton SiO ₂)		Entrada (ton/1 ton SiO ₂)		Produtos evitados (ton/1 ton SiO ₂)	
Electricidade	Calor	Composto	HNO ₃	H ₂ O	TPA (99%)
0,00	972,63	5,80	3,48	19,71	0,00
					EG (98,5%)
					0,00
					Energia (MJ/ ton SiO ₂)
					40732,85
					1,00
					SAÍDA
					Saída superior separador
					27,99

- **GASEIFICAÇÃO**

Gaseificação					
Energia (MJ/1 ton SiO ₂)		Entrada (ton/1 ton SiO ₂)		Produtos evitados (ton/1 ton SiO ₂)	
Electricidade	Calor	Composto	Ar	GAZ	SAÍDA
0,00	-11969,51	6,45	10,23	15,68	1,00
					Energia (MJ/ ton SiO ₂)
					16268,75
					0,00
					SAÍDA
					Saída superior separador

- **PIROLISE**

Pirólise com valorizações																
Energia (MJ/1 ton SiO ₂)		Entrada (ton/1 ton SiO ₂)		Produtos evitados (ton/1 ton SiO ₂)						Tratamento Descarte (ton/ ton SiO ₂)						
Electricidade	Calor	Composto	Propane	Ar	Acetone (95%)	BZoiAcid(75 %)	diAcetone-ol (91%)	Acetone (89%)	GAZ	AcetAldehy de	Energia (MJ/ ton SiO ₂)	SiO	Propane	CO	H ₂ O	Rejeito
39,371983	10434,333	2,1694128	1,9141878	0,25973346	0,019012135	0,25442538	2,2221598	0,53014385	73	2	7201,953232	1	2,002000	0,319041	0,2735	0,122912464
44	26	83	38	8	1,530143847	0,019012135	0,25442538	2,2221598	73	2	7201,953232	1	55	45	87	0,122912464

- **Pirólise sem valorizações**

Pirólise sem valorizações																
Energia (MJ/1 ton SiO ₂)		Entrada (ton/1 ton SiO ₂)		Produtos evitados (ton/1 ton SiO ₂)						Tratamento Descarte (ton/ ton SiO ₂)						
Electricidade	Calor	Composto	Propane	Ar	Acetone (95%)	BZoiAcid(75 %)	diAcetone-ol (91%)	Acetone (89%)	GAZ	AcetAldehy de	Energia (MJ/ ton SiO ₂)	SiO	Propane	CO	H ₂ O	Rejeito
0	7806,4706	2,1694128	1,9141878	0	0	0	0	0	0	0	4968,041272	1	2,002000	0,319041	0,2735	4,408387173
2	22	83	38	0	0	0	0	0	0	2	4968,041272	1	55	45	87	4,408387173

**ANEXO IV – GRAFICOS DOS RESULTADOS DO ACV DO PROCESSO DE
HIDROLISE ACIDA E DE GASEIFICACAO**

