



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



Comparativo de métricas de sustentabilidade

Autor: Marcos Eberhardt Azambuja

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Farenzena

Porto Alegre, janeiro de 13

Sumário

1	Introdução	1
2	Revisão Bibliográfica	3
2.1	Desenvolvimento Sustentável	3
2.2	Indicadores de Sustentabilidade	3
2.3	Indicadores Ambientais	4
2.3.1	Indiana Relative Chemical Hazard Score (IRCHS)	5
2.3.2	Waste Reduction Algorithm (WAR)	6
2.3.3	Life Cycle Assessment - LCA	8
2.4	Indicadores de Segurança	10
2.5	Indicadores Econômicos	11
3	Materiais e Métodos	13
4	Estudo de Caso	15
4.1	Mistura binária de metanol e acetona	15
4.2	Separação metanol acetona por <i>Pressure Swing</i>	15
4.3	Separação metanol acetona pelo método extrativo	16
5	Resultados e discussões	19
5.1	Separação por Destilação Extrativa	19
5.2	Separação através de troca de pressão	20
5.3	Resultados da aplicação do WAR	22
5.4	Outros resultados	25
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	27
7	Referências	28

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus que por dias e noites me deu forças para jamais desistir de meus sonhos.

Aos professores do curso de Engenharia Química da UFRGS, pelos ensinamentos e experiências passadas ao longo do curso.

Aos meus amigos Lucas De Conto, Lucas Horta e Roberto Bolek por todo o apoio e amizade.

Ao Prof. Dr. Marcelo Farenzena pelas conversas e ensinamentos ao longo da elaboração deste trabalho.

Agradeço aos meus pais, Marcos Azambuja e Rosângela Azambuja pelo apoio e por me proverem condições de chegar até aqui.

E especialmente à minha noiva, Camila Teófilo, por todo o carinho, apoio e por acreditar na minha capacidade.

Resumo

Índices de sustentabilidade são ferramentas relativamente recentes para avaliar o desenvolvimento sustentável. A necessidade de realizar essas medições surgiu no momento em que foi percebido o impacto que o desenvolvimento vem causando no ambiente. Existem diversos tipos de índices de sustentabilidade e este trabalho é voltado aos índices aplicáveis na indústria petroquímica. Foram selecionados índices compostos e simples para avaliar diferenças entre dois processos de destilação, extrativa e por troca de pressão, para a separação de uma mistura azeotrópica de metanol e acetona. Construíram-se os modelos das plantas utilizando o software de simulação Aspen Plus, em seguida se obteve dados para especificações e cargas distintas. Esses dados foram comparados e avaliados utilizando os índices escolhidos. Essa avaliação foi capaz de demonstrar as vantagens e desvantagens dos métodos principalmente em relação ao uso de energia. Não foi possível utilizar completamente determinados índices ambientais, pois os mesmos não contemplavam certas características do caso de estudo. A importância deste trabalho se dá pela demonstração do uso de métricas de sustentabilidade juntamente com uma breve avaliação do resultado dos mesmos.

Lista de Figuras

Figura 1: Diagrama de fases metanol-acetona em 1 e 10 atm (modificado de Luyben, 2008).....	15
Figura 2: Fluxograma para destilação por troca de pressão (modificado de Luyben, 2008).	16
Figura 3: curva de resíduo ternária para acetona, metanol e água (modificado de Luyben, 2008).....	17
Figura 4: Fluxograma para o sistema de destilação extrativa (modificado de Luyben 2008).	18
Figura 5: Gráfico da relação entre a energia consumida pela alimentação para os produtos com 99,5% de pureza.	21
Figura 6: Gráfico da energia consumida por alimentação para diferentes especificações de produto.	22
Figura 7: Gráfico da relação entre consumo de energia por alimentação para o caso de maior pureza.....	22
Figura 8: Gráfico exportado de WAR GUI com análise de potencial de impacto ambiental.	23
Figura 9: Análise substituindo o combustível por carvão.	24
Figura 10: Comparação entre diferentes cargas para o mesmo método.	25
Figura 11: Comparação entre diferentes especificações para o mesmo método.	25
Figura 12: Resultados do indicador IRCHS para mesma carga.....	26

Lista de Tabelas

Tabela 1: Dados obtidos para o método de separação extrativo. 19

Tabela 2: Dados obtidos para o método de destilação por troca de pressão. 20

1 Introdução

O desenvolvimento sustentável tem sido o foco de trabalho de várias empresas e de organizações no mundo tendo em vista que o crescimento acelerado e desenfreado do progresso humano está esgotando os recursos naturais. Embora a pujante demanda por mais produção, urge a necessidade de se tomar um caminho mais racional, reduzindo o consumo de recursos e, ao mesmo tempo, de minimizar a quantidade de resíduos gerados.

A fim de verificar a eficiência de novas tecnologias e garantir que os novos processos sejam direcionados a essa mentalidade, foram adaptadas avaliações já usadas na área econômica e criados novos sistemas para quantificar melhorias na redução da geração de resíduos e no uso de recursos. Esses sistemas são conhecidos como métricas de sustentabilidade.

Métricas de sustentabilidade atualmente são usadas por indústrias, empresas e instituições governamentais para garantirem um desenvolvimento adequado sem comprometer ainda mais o nosso ambiente. Indústrias podem utilizá-las para avaliarem o desempenho de suas plantas e escolherem projetos mais promissores; bancos podem indicar um conjunto de indicadores de sustentabilidade para condicionarem um financiamento e órgãos ambientais para aprovarem ou rejeitarem um projeto. Em cada, portanto, são utilizados pesos diferentes para cada aspecto. Indicadores de sustentabilidade também podem ser empregados em conjunto, contemplando diversas áreas e usadas como objetivo de implementações para otimização de sistemas.

Índices de sustentabilidade - apesar de o termo estar fortemente atrelado ao meio ambiente - também servem a outros propósitos, como reduzir custos de energia, aumentar o lucro modificando especificações, produzir de forma mais eficiente, ou avaliar viabilidade econômica de um processo. Essas ações, no entanto, não necessariamente denotam um resultado ambientalmente mais correto.

Existe uma grande quantidade de tipos desses indicadores. Entre os principais estão os sociais, que podem servir para medir desenvolvimento de comunidades, os econômicos, já normalmente utilizados em avaliações e os ambientais, utilizados de forma geral para avaliar danos ao ambiente. Indicadores compostos podem abranger todas essas áreas, permitindo agrupar informações de natureza variada no mesmo resultado.

Em indústrias, os indicadores ambientais ainda são pouco utilizados como uma ferramenta para auxiliar no momento das decisões ou para proporem melhorias no sistema. São mais utilizados nas plantas os indicadores simples, para garantir a produção dentro dos parâmetros estabelecidos pelos órgãos ambientais.

O objetivo deste trabalho é avaliar duas tecnologias diferentes de destilação para a separação de uma mistura, contendo acetona e metanol: uma a partir de destilação extrativa, utilizando água como solvente; outra através de *Pressure Swing*. Os índices serão utilizados de forma a comparar as duas tecnologias e verificar em que situação cada uma delas se apresenta melhor. Por intermédio do cotejamento dos dois métodos, foram

observadas em que áreas cada uma dessas formas de destilação é a mais sustentável de acordo com os índices utilizados.

O presente trabalho de conclusão é dividido como segue: o Capítulo 2 traz uma revisão bibliográfica em que se descreve o conceito de sustentabilidade, como surgiu, o que são as métricas de sustentabilidade, os diferentes tipos de índices de sustentabilidade e como se apresentam alguns deles. Em seguida, são descritos os softwares utilizados para as análises desta pesquisa, o Aspen Plus, produzido pela Aspentech e o WAR GUI produzido pela Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA). No Capítulo 4 são descritos os dois sistemas de separação utilizados, quais dos índices mencionados no Capítulo 2 foram utilizados e quais foram as análises feitas. O Capítulo 5 trás os resultados obtidos nas análises e os valores obtidos para os índices e o Capítulo 6 apresenta as conclusões baseadas nos resultados encontrados, conforme detalhado no capítulo anterior.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Desenvolvimento Sustentável

O conceito de desenvolvimento sustentável, de acordo com a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, criada pelas Nações Unidas é “o desenvolvimento que procura satisfazer as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades, significa possibilitar que as pessoas, agora e no futuro, atinjam um nível satisfatório de desenvolvimento social e económico e de realização humana e cultural, fazendo, ao mesmo tempo, um uso razoável dos recursos da terra e preservando as espécies e os habitats naturais” (Brundtland, 1987).

Durante a evolução das tecnologias empregadas principalmente nas indústrias no século passado e no anterior, houve pouca ou nenhuma preocupação com danos ao meio ambiente.

Apenas quando os danos ao meio ambiente e a saúde se tornaram expressivos que se começou a existir uma preocupação maior com os impactos da poluição e consumo inadequado de recursos. A partir daí que se começou a pensar na importância de reduzir esses danos sem comprometer o desenvolvimento.

Ao longo das décadas essa primeira ideia foi melhorada de forma a ser capaz de estabelecer metas e limites para o desenvolvimento, de forma a não prejudicar o ambiente e os recursos naturais, garantindo que as próximas gerações tenham os recursos necessários para se desenvolver sem precisar abrir mão das suas atividades correntes.

2.2 Indicadores de Sustentabilidade

A partir do momento que se instituiu o conceito de desenvolvimento sustentável, não era possível ponderar o quanto uma ação dita sustentável, realmente trazia benefícios sociais ou ambientais. Qualquer modificação em algum processo ou novo projeto, poderia se intitular “verde” mesmo sem trazer nenhum benefício real. Com a necessidade de se obter informações relevantes sobre o desenvolvimento sustentável, se criou uma ferramenta capaz de quantificar o progresso nessa direção, os índices de sustentabilidade.

Os índices de sustentabilidade são ferramentas que trazem a capacidade de resumir e focar uma grande quantidade de informações de um ambiente dinâmico em uma quantidade palpável de informações úteis, que servem para tomar decisões como rotas tecnológicas mais adequadas ou comprovar benefícios de práticas sustentáveis já utilizadas (Godfrey, 2001).

Existem indicadores de sustentabilidade para diversos setores da indústria, agricultura, planejamento de desenvolvimento de cidades e países. Cada um tem seu foco específico e, apesar de seguirem algum conceito ou heurística, todos os seus componentes, pesos e aspectos a serem considerados são subjetivos. Além disso, de acordo com Lanker e Nijkamp (2000), um indicador não diz nada sobre sustentabilidade a menos que exista um valor de referência ou limites para ele, é necessário que se compare pelo menos duas alternativas ou se compare com um modelo.

Os principais aspectos que os indicadores de sustentabilidade consideram são os sociais, econômicos, ambientais e de segurança. Grande parte dos indicadores é considerada simples, pois leva em consideração apenas um desses aspectos. Além disso, existem os que consideram um par desses pontos e existem também indicadores chamados de compostos, que agregam indicadores de diversas áreas para dar uma visão melhor e mais robusta de um problema.

Para a instalação de uma nova planta, podem-se utilizar indicadores sociais para verificar o impacto da instalação na comunidade próxima, indicadores econômicos para verificar a viabilidade financeira do projeto, juntamente com ambientais para melhorar eficiência do projeto ou garantir adequação às normas ambientais da região.

A seguir serão descritos os principais tipos de indicadores aplicáveis em indústrias, apresentando também exemplos desses indicadores em cada área.

2.3 Indicadores Ambientais

Os indicadores ambientais cobrem aspectos relacionados ao aquecimento global, destruição do ozônio atmosférico, potencial de oxidação fotoquímica, potencial de eutrofização, potencial de toxicidade humana por inalação, ingestão e contato com a pele e também potenciais de toxicidade aquática e terrestre.

De acordo com Kohlhasse (1994), no ramo da indústria petroquímica, o suporte para o conceito de desenvolvimento ambientalmente sustentável baseia-se em proteger e melhorar a qualidade do ambiente, realizar uma gestão prudente dos recursos disponíveis, incluindo desenvolvimento de novas tecnologias para geração de energia de forma mais limpa e eficiente e a transição para um consumo de energia de fontes variadas que sejam mais sustentáveis, ou substituindo combustíveis fósseis pesados por combustíveis mais leves.

Dentre os índices mais simples que podem ser utilizados dentro da área ambiental estão à emissão de CO₂, energia total consumida e relação entre peso de resíduo e produto produzido. Informações sobre toxicidade estão disponíveis para a maioria dos compostos químicos conhecidos e também podem ser considerados como indicadores ambientais. As informações de toxicidade mais utilizadas na indústria são o LC₅₀, o LD₅₀ e TLV que representam respectivamente a concentração letal no ar que num determinado período de tempo causa a morte de metade das cobaias, a dose letal por outros métodos de exposição que cause morte de metade das cobaias e a concentração limite de uma substância no ambiente em que os trabalhadores possam estar expostos sem sofrerem reações adversas (Al-Sharrah, 2010).

Dentre as informações sobre toxicidade o TLV é um dos valores mais utilizados, pois ele pode ser utilizado dentro de uma função cujo objetivo seja minimizar os danos à saúde dos trabalhadores. Fathi-Afshar e Yang (1985) selecionaram o TLV como indicador que consistia basicamente em comparar os valores para duas substâncias e a que correspondesse ao menor TLV era considerada a mais prejudicial.

Índices simples, que apenas ordenavam a periculosidade dos compostos foram utilizados em alguns trabalhos quando o planejamento envolvia identificar os riscos de um grande número de plantas. A National Fire Protection Association (NFPA) desenvolveu e divulgou em 1994 uma forma de indicar, atribuindo valores de 0 a 4 para quesitos como inflamabilidade, toxicidade e reatividade.

Outro indicador ambiental por ordenamento é o Indiana Relative Chemical Hazard Score (IRCHS), que indica como uma substância se compara a outra, em termos de capacidade de causar impactos à saúde humana, danos ambientais e ao ecossistema. Já existem valores de periculosidade para mais de mil substâncias para serem utilizados com este indicador.

Outros exemplos de indicadores ambientais são o Waste Reduction Algorithm (WAR) e o Life Cycle Assessment que serão comentados a seguir.

2.3.1 *Indiana Relative Chemical Hazard Score (IRCHS)*

O IRCHS, originalmente chamado de *Pollution Prevention Progress Measurement Method (3P2M)* foi financiado pela Agência de Proteção Ambiental americana (EPA) e tinha como objetivo o desenvolvimento de um método de medição confiável capaz de ser aplicado aos produtores do estado de Indiana. O grupo de trabalho do IRCHS era formado por representantes das indústrias e pesquisadores acadêmicos.

A equipe do IRCHS revisou os métodos de medição disponíveis na época e optaram por expandir um sistema de classificação de substâncias químicas desenvolvido pela Universidade do Tennessee (UTN), também desenvolvido com fundos da EPA. O método da UTN avaliava cada composto separadamente e designava a ele um valor de risco de acordo com o potencial de impacto ao ambiente, dando ênfase ao ecossistema aquático. A equipe então expandiu o algoritmo da UTN para levar em consideração os impactos em relação à qualidade do ar, potenciais de contaminação do solo e água subterrânea e da destruição do ozônio na estratosfera. O algoritmo expandido atribui às substâncias químicas valores de risco ambiental. Essa mesma equipe também desenvolveu um algoritmo para atribuir valores de risco baseado no impacto da substância sobre os trabalhadores em seu ambiente de trabalho. Os valores de risco são combinados gerando um valor médio de risco para o químico.

O valor combinado de risco permite comparar a periculosidade de substâncias, mas não é capaz de medir o progresso em direção à prevenção de poluição. Para resolver este problema a equipe multiplicou as vazões mássicas pelos valores de risco, normalizando por unidades de produção. Isto permitiu comparações entre escalas de produção durante o tempo, proporcionando um método adaptável a todas as fases do ciclo de vida do produto e todos os tamanhos de instalações e setores.

Já existem catalogados valores de risco atribuídos a mais de mil substâncias químicas que podem ser acessados através da página na internet do Clean Manufacturing Technology Institute (CMTI), ordenados pela numeração CAS ou de forma alfabética, juntamente com as instruções para aplicar o IRCHS.

O IRCHS já foi revisado por diversas universidades, agências governamentais e instalações de defesa nos Estados Unidos. Como um exemplo de sua funcionalidade, o método foi utilizado pelo Massachusetts Institute of Technology (MIT) para avaliar o Inventário de Emissões Tóxicas Locais e determinar se os produtores do estado estavam realmente liberando menos agentes tóxicos ao ambiente.

2.3.2 Waste Reduction Algorithm (WAR)

O WAR foi uma metodologia apresentada por dois agentes da EPA, Hilaly e Sidkar (1994) e foca em um balanço à poluição gerada no processo, que permite identificar e rastrear as substâncias poluidoras durante o processo de transformação. A ideia surgiu da combinação de conceitos já existentes sobre redes de transferência de calor e de massa, que visavam reduzir o consumo e os resíduos de forma quantitativa, mas não consideravam os resíduos qualitativamente. Uma modificação no processo que causasse redução na geração de resíduos poderia passar como uma melhoria, mesmo substituindo componentes por outros extremamente nocivos, pois o índice original não considerava a toxicidade dos componentes.

Em 1997 foi proposta uma melhoria do algoritmo para incluir considerações de impacto ambiental. Cabezas, et al. (1997) introduziram ao algoritmo um potencial de impacto ambiental (PEI). Foi construída uma teoria para quantificar o impacto ambiental potencial com algo que possa ser quantificado.

A solução foi utilizar algo semelhante aos balanços de energia e massa comumente utilizados. O balanço de poluição através do PEI é um indicador quantitativo do impacto desses agentes poluidores no processo e quão ambientalmente correto é determinado processo de produção. Considera-se que o PEI pode entrar ou sair do sistema conforme equação (1) abaixo.

$$\frac{\partial \text{PEI}_{\text{sistema}}}{\partial t} = \dot{I}_{in}^{(cp)} + \dot{I}_{in}^{(ep)} - \dot{I}_{out}^{(cp)} - \dot{I}_{out}^{(ep)} - \dot{I}_{we}^{(cp)} - \dot{I}_{we}^{(ep)} + \dot{I}_{gen}^{(sistema)} \quad (1)$$

Onde os índices são:

in – entrada

out – saída

gen - geração

cp – processo químico

ep – processo de geração de energia

we – resíduo energético

sistema – resíduo de PEI acumulado

I é a quantidade de PEI

Para o estado estacionário a variação de PEI é constante igual à zero, a partir disso se geram uma série de índices para caracterizar a eficiência ambiental do sistema, tanto internamente quanto externamente.

Cabezas e Mallick (1997) relacionaram o PEI com quantidades como vazões, composições e impactos ambientais específicos através de uma teoria linear, para um processo químico tem-se:

$$\dot{j}_i^{(\varphi)} = \sum_i^{\varphi} \dot{j}_i^{(in)} = \sum_i^{\varphi} \dot{M}_i^{(in)} \sum_k x_{ki} \Psi_k + \dots \quad (2)$$

$$\dot{j}_{out}^{(\varphi)} = \sum_i^{\varphi} \dot{j}_i^{(out)} = \sum_i^{\varphi} \dot{M}_i^{(out)} \sum_k x_{ki} \Psi_k + \dots \quad (3)$$

$$\dot{j}_{we}^{(\varphi)} = \sum_i^{\varphi} \dot{E}_i^{(\varphi)} \Psi_{we} \approx 0 \quad (4)$$

Onde:

$\dot{j}_i^{(\varphi)}$ é a vazão de PEI que sai ou entra no processo químico.

$\dot{j}_i^{(j)}$ é a vazão de PEI na corrente j que pode ser de entrada ou saída.

$\dot{M}_i^{(j)}$ é a vazão mássica da corrente j, que pode ser de entrada ou saída.

x_{ki} é a fração mássica do componente k na corrente j.

Ψ_k é o PEI da substância k.

$\dot{j}_{we}^{(\varphi)}$ é a vazão de PEI devido à emissão de resíduos energéticos.

$\dot{E}_i^{(\varphi)}$ é a vazão de energia residual emitida pelo processo químico.

Ψ_{we} é o PEI da emissão de energia.

Sendo que (2) e (3) consideram apenas PEI para substâncias puras, ignorando possíveis efeitos da mistura de componentes. Como geralmente o Ψ_{we} é muito menor que o Ψ_k ele é negligenciável.

As equações para processos em relação a geração de energia são:

$$\dot{j}_m^{(ep)} = \sum_i^{ep} \dot{j}_i^{(in)} = \sum_i^{ep} \dot{M}_i^{(in)} \sum_k x_{ki} \Psi_k + \dots \approx 0 \quad (5)$$

$$\dot{j}_{out}^{(ep)} = \sum_i^{ep} \dot{j}_i^{(out)} = \sum_i^{ep-g} \dot{M}_i^{(out)} \sum_k x_{ki} \Psi_k + \sum_i^{ep-s} \dot{M}_i^{(out)} \sum_k x_{ki} \Psi_k + \dots \approx \sum_i^{ep-g} \dot{M}_i^{(out)} \sum_k x_{ki} \Psi_k + \dots \quad (6)$$

$$\dot{j}_{we}^{(ep)} = \sum_i^{ep} \dot{E}_i^{(ep)} \Psi_k \approx 0 \quad (7)$$

Onde:

$j_i^{(ep)}$ é a vazão de PEI que sai ou entra no processo energético.

$j_{we}^{(ep)}$ é a vazão de PEI liberado na emissão de energia residual.

$\dot{E}_f^{(ep)}$ é a vazão de resíduos energéticos emitidos para fora do processo energético.

Ψ_{we} é o PEI da emissão de energia residual.

No processo de geração de energia, as correntes de saída com maior impacto ambiental são as em fase gasosa.

Assim como a equação (1), a (7) igualada à zero pode servir para produzir índices para visualizar a eficiência ambiental relativa do processo que podem ser de dois tipos, associados com saída de PEI e com geração de PEI.

Quanto mais eficiente for o processo ambientalmente, menores serão os índices e menores serão os impactos potenciais que o processo traria para o ambiente. Os índices também não podem ser zerados, pois significaria não ter processo.

O PEI total de uma substância k , Ψ_k , é determinado somando PEI de categoria considerada Ψ_{ki}^s expresso em unidades de impacto ambiental de k por massa de k , multiplicado pela ponderação da categoria α_i , geralmente um valor entre zero e dez, conforme equação a seguir:

$$\Psi_k = \sum_i \alpha_i \Psi_{ki}^s \quad (8)$$

As categorias de impacto são baseadas em outro trabalho, de Heijungset al. (1992), nele há duas áreas principais a serem consideradas, a atmosférica e a toxicológica. A atmosférica contém potencial de aquecimento global, potencial de destruição do ozônio, potencial de acidificação e chuva ácida e oxidação fotoquímica. A toxicológica trás potenciais de toxicidade por ingestão, inalação ou contato com a pele, toxicidade aquática e terrestre.

2.3.3 *Life Cycle Assessment - LCA*

No que diz respeito a índices ambientais o LCA é um dos conceitos mais difundido, aceito e referenciado por meios científicos. Surgiu nos anos 70 quando foram realizadas auditorias energéticas nos EUA (Saraiva, 2003).

O LCA ou análise do ciclo de vida é uma técnica para avaliar os aspectos ambientais e impactos potenciais associados a um produto, processo ou serviço, através de inventários materiais e de energia associados desde a obtenção da matéria-prima até o destino final, avaliando os impactos associados a cada etapa identificando as entradas e saídas.

A análise é feita através de uma abordagem "berço ao túmulo" para avaliar sistemas industriais. Esta abordagem começa com a coleta de matérias-primas necessárias para a produção e termina no momento em que todos os materiais retornam

ao ambiente. São avaliadas no LCA todas as fases da vida de um produto, assumindo que elas são interdependentes, isto é, uma operação conduz a seguinte. O LCA permite que seja possível estimar os impactos ambientais resultantes de todas as fases do ciclo de vida do produto, incluindo também impactos desconsiderados em análises mais tradicionais como a extração de matérias-primas, transporte e descarte.

Ao incluir os impactos ambientais causados ao longo de todo o ciclo de vida do produto, o LCA oferece uma visão abrangente dos aspectos ambientais e uma visão mais exata das trocas que ocorrem durante os processos envolvidos.

A partir dos esforços da Society for Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) e da International Standards Organization (ISO), foi criada uma forma padronizada para a aplicação do LCA. A avaliação foi dividida em quatro fases distintas: estabelecimento de objetivos do estudo e identificação de fronteiras; quantificação do uso e liberação de massa e energia no sistema; interpretação das consequências ambientais; avaliação de oportunidades de melhoria.

Toda padronização do LCA pode ser encontrada nas normas ISO 14000, nela o LCA é descrito como a compilação e avaliação das entradas e saídas além dos impactos ambientais potenciais de um sistema produtivo através de seu ciclo de vida.

O LCA é, tanto quanto for possível, uma informação quantitativa. Quando não houver essa possibilidade deve-se sempre que possível utilizar aspectos qualitativos, de forma a representar o processo avaliado da forma mais completa possível dos impactos ambientais envolvidos.

Um fator importante da análise "berço ao túmulo" é que envolve uma aproximação holística, trazendo todos os impactos ambientais, independente de onde e quando venham a acontecer ou não. Uma razão fundamental para escolher este tipo de abordagem é relacionada ao fato de que o consumo dos produtos é a força motriz da economia.

Outra razão fundamental desta análise é evitar um simples deslocamento do problema. É importante para produtos projetados para serem "verdes" não apenas resolverem os problemas em uma única fase da vida do produto, mas em todo o processo até a disposição final. Por exemplo, produzir um veículo utilizando alumínio em lugar de aço pode reduzir o consumo final de combustível do veículo, mas isso não é suficiente para medir o quão sustentável ambientalmente é essa alteração sem comparar o aumento da energia consumida na produção do veículo causada pela substituição.

As maiores aplicações do LCA são em:

- * analisar as origens dos problemas relacionados à um determinado produto;
- * comparar diferentes implementos em um dado produto;
- * projetar novos produtos;
- * fazer uma escolha entre diversos produtos comparáveis.

Aplicações similares também podem ser usadas à nível estratégico, trabalhando com políticas governamentais ou estratégias de negócios. A forma de implementar o projeto do LCA depende do uso pretendido pelos resultados do mesmo.

2.4 Indicadores de Segurança

De acordo com Al-Sharrah (2010), embora os componentes mais bem conhecidos do desenvolvimento sustentável serem ambientais, econômicos e sociais, a segurança pode ser incluída nesse grupo. Como parte de fatores ambientais, esse tipo de indicador pode ser incluído quando há uma preocupação como toxicidade, como parte dos econômicos quando são considerados os investimentos em saúde e segurança.

Conseqüentemente ela deve ser considerada um aspecto importante para a sustentabilidade, especialmente durante o estágio de planejamento industrial. O risco de acidentes causando danos grandes aos funcionários ou à planta é incluído nas considerações de segurança.

Essas estratégias devem proteger as pessoas e ao ambiente o tanto quanto for possível dos perigos que podem surgir na planta industrial. Ao mesmo tempo, as aplicações dos conceitos de segurança não devem inviabilizar o sistema, evitando restringir a produção ou aumentar o custo da planta mais do que o necessário (Al-Sharrah, 2010).

A restrição da produção pode ocorrer quando para melhorar a confiabilidade da planta é necessário reduzir tanto a quantidade de materiais perigosos que circulam pelos equipamentos quanto à energia contida no sistema. O aumento do custo da planta pode se dar pelo alto custo da manutenção das instalações e sistemas de segurança necessários.

Muitas empresas investem uma quantia substancial de recursos para garantir um ambiente de trabalho seguro e saudável. Elas registram seus esforços regularmente e geralmente utilizam indicadores como número de acidentes ou fatalidades e também o número de dias de trabalho perdido devido a acidentes.

Nas indústrias químicas a principal fonte de risco são os materiais envolvidos, normalmente mesmo os insumos contém certo grau de periculosidade e precisam ser armazenados de forma adequada para reduzir o risco de acidentes. Mesmo sem ocorrer nenhuma etapa de processamento ou outras atividades, como ocorre com substâncias que se apresentam como inflamáveis, tóxicas ou corrosivas em qualquer estado físico. De acordo com Ward (2002) as matérias primas, os intermediários e os produtos finais apresentam um elemento primário de periculosidade independente. A segurança ao produzir componentes químicos perigosos é tão importante quanto os aspectos econômicos de compra e venda desses produtos.

Para quantificar a periculosidade dos materiais se observam a inflamabilidade, a explosividade ou toxicidade dos mesmos. Para quantificar os efeitos da inflamabilidade são utilizados vários fatores, entre eles estão limites de explosividade, ponto de fulgor, temperatura de autoignição, velocidade de queima, pressão de vapor e energia de

ignição. Para os efeitos de toxicidade são utilizadas informações toxicológicas dos materiais como dose letal mediana (LD50), concentração letal 50 (LC50) e concentração letal total.

Exemplos de índices de segurança em relação à toxicidade são Emergency Response Planning Guidelines (ERPG) que utiliza como parâmetro níveis de concentrações de tóxicos aceitáveis para os trabalhadores, usado em análise de risco e os valores Immediately Dangerous to Life and Health (IDLH), que são as concentrações limites no ar de contaminantes que possam causar risco de vida ou algum efeito adverso de forma permanente.

Para o caso dos materiais inflamáveis ou explosivos existem índices produzidos pela National Fire Protection Association (NFPA), que também produziu diversos padrões e códigos de prevenção de incêndio a serem seguidos.

Também existem índices de segurança que incorporam informações contempladas pelos casos anteriores e também trabalha com históricos de acidentes, que é o caso do índice K de Al-Sharrah (2007). Ele desenvolveu um índice com formato final simples para comparar entre diversas configurações de planta, as menos nocivas para os trabalhadores.

O índice é representado pela equação:

$$K = Freq * Haz * Inv * Size \quad (9)$$

Onde o termo *Freq* representa a frequência com que acidentes no tipo de processo estudado ocorrem por ano, baseado em dados históricos. *Haz* é um valor atribuído conforme a periculosidade dos materiais. *Inv*, o possível inventário de materiais liberados em um acidente, em toneladas por acidente e o ultimo fator, *Size* que indica o tamanho da planta em números de processos. Esse cálculo resulta no valor *K* cuja unidade atribuída foi número de pessoas afetadas por ano, para representar o número máximo de pessoas afetadas caso ocorresse um acidente que liberasse todo o inventário da planta. A vantagem deste índice segundo o autor é de que encoraja o uso de processos mais simples e utiliza uma vasta experiência de acidentes que ocorreram anteriormente, o que também leva a necessidade de possuir um grande banco de dados sobre acidentes envolvendo os processos estudados.

2.5 Indicadores Econômicos

Os indicadores econômicos são os mais comuns e amplamente utilizados por indústrias e instituições financeiras. É uma forma de descrever criação de valor e riqueza, avaliando a capacidade de uma empresa de gerar valor enquanto cumpre com suas responsabilidades. Esses índices podem considerar capital humano e financeiro. Entre exemplos desse tipo de indicadores estão os de rentabilidade, eficiência e produtividade.

A indústria é um dos segmentos mais importantes da nossa economia, sendo que grandes sistemas industriais ditam os fluxos de materiais e energia através da economia. Mesmo a indústria sendo conhecida como uma atividade que esgota recursos naturais e

promove a degradação ambiental, é reconhecida como parte vital da economia, gerando desenvolvimento e criação de riqueza (Al-Sharrah, 2010).

A forma mais básica de um indicador econômico é o *added value*, uma simples comparação entre a receita das vendas e o custo da produção. A partir desse ponto, existe a possibilidade dele ser implementado. O que pode ou não ser selecionados para o cálculo deste tipo de índice dependerá do propósito e complexidade do estudo para o qual os dados são obtidos e de quem irá utilizá-los.

3 Materiais e Métodos

As aplicações dos índices de sustentabilidade são totalmente dependentes da qualidade dos dados disponíveis. Neste caso os dados mais relevantes são as vazões mássicas de todas as correntes junto com suas respectivas temperaturas e também a o consumo energético do processo.

Para obtenção dos dados necessários sobre o processo fez-se simulações utilizando o software *Aspen Plus*[®] 24.0 produzido pela AspenTech. Este software foi escolhido por ser uma referência entre simuladores de processos para a indústria química, provendo uma grande quantidade de ferramentas para análises de sensibilidade e otimização.

Construíram-se os modelos de planta no Aspen Plus seguindo as especificações encontradas no trabalho de Luyben (2008). Após a construção dos modelos se verificou a qualidade das informações obtidas, os valores obtidos nas simulações foram comparados com os valores encontrados no artigo base.

Utilizando tais modelos foi realizada uma série de simulações utilizando a função *Design Spec* para garantir as especificações dos produtos. Depois de atingidas as condições desejadas, começou o uso das ferramentas de análise de sensibilidade para o método de destilação por troca de pressão. Foi variada a carga de alimentação ao redor do valor inicial para observar a variação no consumo de energia. Em seguida fez se o mesmo estudo para diferentes especificações nos produtos para verificar o quão sensível é o comportamento do consumo energético frente às variações na pureza dos produtos juntamente com variações de carga.

Para a avaliação dos dados também foi utilizado o software WAR GUI 1.0.17, ele é uma interface gráfica para facilitar a aplicação do WAR. O software, assim como o indicador, foi desenvolvido pela EPA. Ele é distribuído gratuitamente no site da agência. Os dados de entrada para análise são os componentes de cada uma das correntes, suas vazões mássicas, sua função no processo (entre entrada, produto e resíduo) e o consumo de energia do processo, podendo considerar três tipos diferentes de combustível: gás, óleo e carvão. O programa permite que os dados sejam colocados manualmente pelo usuário ou importados de um arquivo de dados gerado no Aspen Plus. Ele também permite que o usuário informe quais impactos seja mais relevantes para o estudo.

Outro índice utilizado para avaliação dos dados foi o IRCHS. O método foi aplicado conforme instruções contidas no documento *Pollution Prevention Progress Measurement Method (3P2M)*.

No 3P2M (1998) se encontra a planilha a ser utilizada para a aplicação do índice, as instruções e os dados de valores de risco de diversos produtos químicos conforme ordem do número de registro CAS.

Além disso, utilizaram-se ainda indicadores simples, encontrados em uma compilação de Mercado (2011). Escolheu-se para uso nesse trabalho o índice de eficiência intensidade mássica, que é o valor da razão da entrada mássica do sistema pela massa de produtos. E os índices energéticos: Energia total consumida, Intensidade energética específica, Eficiência energética dos recursos. O primeiro apenas assume o valor do total

de energia consumida no sistema. O indicador de intensidade energética específica é dado pela razão da energia líquida consumida como combustível pela massa de produto produzida. A Eficiência energética dos recursos é a divisão entre a energia contida nos produtos pela energia contida na alimentação do sistema.

4 Estudo de Caso

Para realizar a aplicação dos índices de sustentabilidade escolheram-se duas formas de separação de metanol e acetona através de destilação. Esta escolha permite comparar os resultados de duas configurações diferentes para plantas de mesmo propósito, de forma a ser possível inferir qual obtém melhores resultados.

4.1 Mistura binária de metanol e acetona

O metanol juntamente com a acetona forma um azeótropo de mínimo ponto de ebulição, que em uma atmosfera de pressão e 328 K contém 77,6% em mol de acetona. Conforme pode ser visto na Figura 1, aumentando temperatura e pressão para 10 atm e 408 K respectivamente se consegue deslocar o azeótropo para a composição de 37,5% em mol de acetona. Observar que o azeótropo é sensível à pressão permite que seja possível aplicar o método de destilação por *Pressure Swing*. Também é possível realizar uma destilação extrativa, utilizando água como solvente.

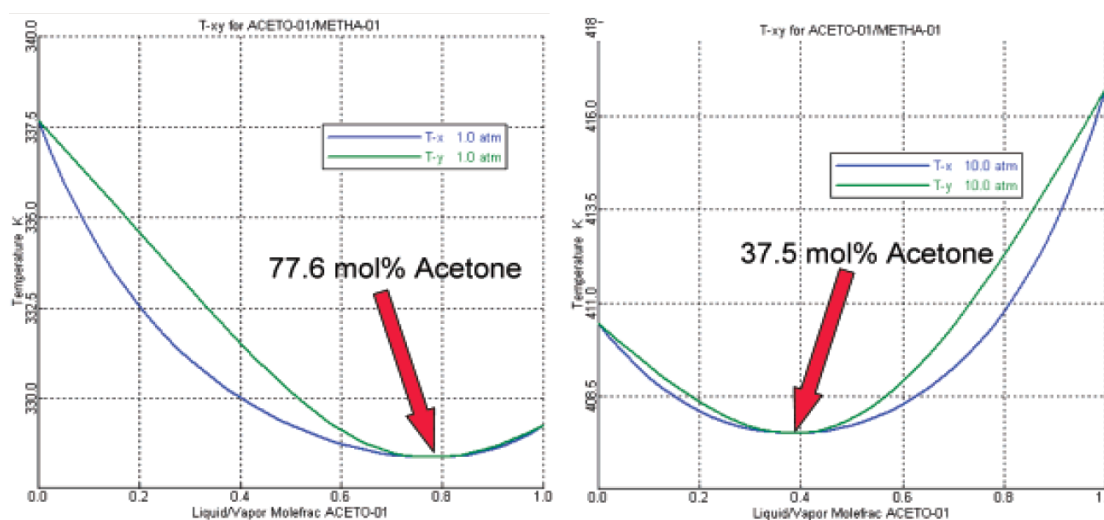


Figura 1: Diagrama de fases metanol-acetona em 1 e 10 atm (modificado de Luyben, 2008).

4.2 Separação metanol acetona por *Pressure Swing*

A separação é feita utilizando duas colunas de destilação. A primeira coluna opera com pressão de uma atmosfera no topo, nessa condição a acetona é o componente da mistura com o menor ponto de ebulição, permitindo o metanol seja removido pelo fundo da coluna com 99,5% de pureza molar. A segunda coluna utilizando a pressão de 10 atm no topo torna o metanol mais volátil que a acetona, permitindo que a acetona seja retirada no fundo da coluna, com a mesma especificação de pureza em acetona que o metanol na primeira coluna.

A alimentação é uma mistura equimolar de metanol e acetona com vazão de 540 kmol/h a 320 K e 1,1 atm. A corrente entra na primeira coluna no estágio 37. A saída de topo da primeira coluna é direcionada ao estágio 41 da coluna de alta pressão (10 atm). A saída de topo da segunda coluna é retornada à primeira entrando no estágio 42 sem nenhuma modificação na pressão. As razões de refluxo das colunas de baixa e alta pressão foram especificadas em, respectivamente, 2,84 e 3,11 e possuem 52 e 62 estágios. Foi especificado também que as duas colunas trabalham com condensador total. A Figura 2 ilustra essa configuração.

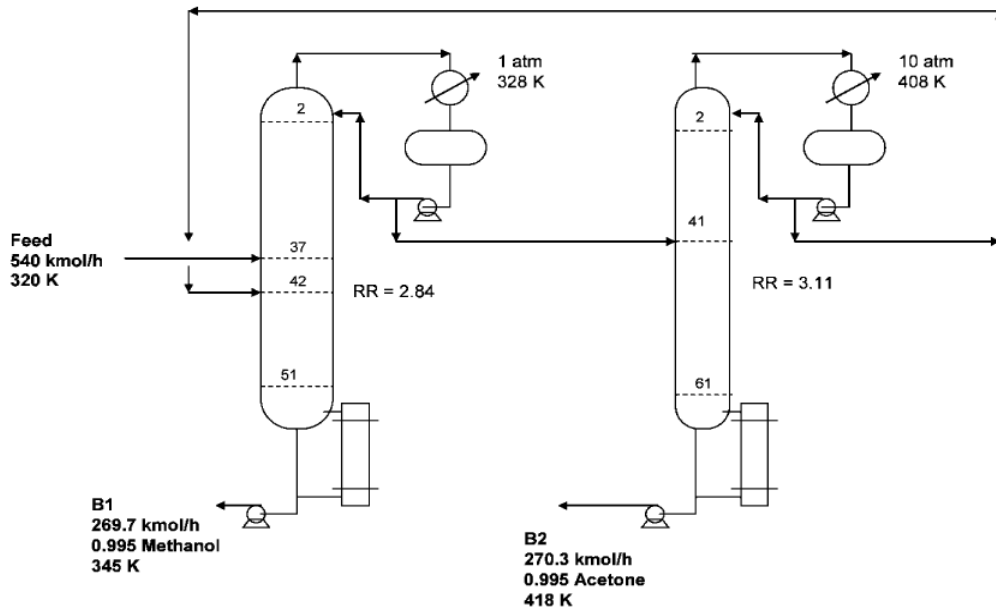


Figura 2: Fluxograma para destilação por troca de pressão (modificado de Luyben, 2008).

4.3 Separação metanol acetona pelo método extrativo

Para efetuar uma destilação extrativa é necessária a existência de um solvente adequado, que facilite a separação dos componentes, que seja de fácil remoção dos produtos ou que a quantidade de solvente contida nos produtos esteja dentro de especificações aceitáveis. Para o caso da mistura utilizada a água atende essas necessidades, conforme pode ser observado na Figura 3.

Este método também necessita de duas colunas de destilação. Nesta configuração as colunas operam em condições mais brandas de temperatura e pressão que a alternativa de *Pressure Swing*, as duas colunas podem trabalhar com apenas uma atmosfera de pressão.

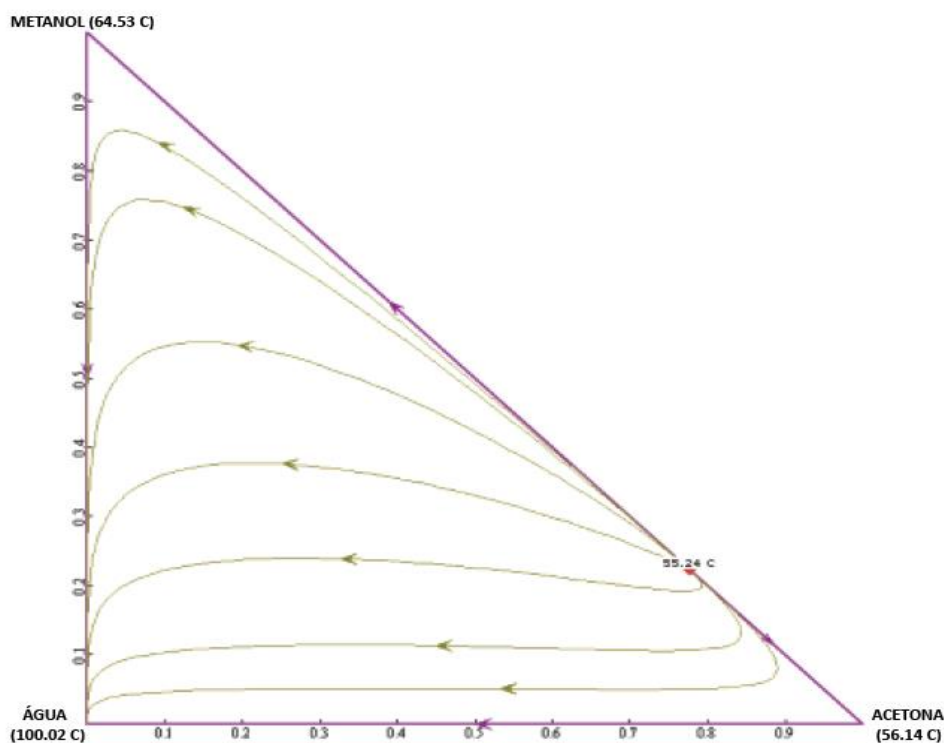


Figura 3: curva de resíduo ternária para acetona, metanol e água (modificado de Luyben, 2008).

A alimentação da mistura é a mesma utilizada anteriormente, 540 kmol/h à temperatura de 320 K, equimolar entre metanol e acetona. Ela entra na primeira coluna pelo estágio 40, esta coluna é utilizada para remover acetona pelo topo, sua corrente de fundo é a alimentação da segunda coluna no estágio 14. A segunda coluna remove o metanol pelo topo e sua corrente de fundo retorna para a coluna anterior.

Devido à necessidade do uso de um solvente e a perda de parte do mesmo nos produtos, é necessária uma corrente injetando 1,73 kmol/h de água limpa na corrente de refluxo do processo.

O refluxo do sistema é considerável, próximo de duas vezes a vazão de metanol e acetona alimentados no sistema. A fim de facilitar a convergência se utiliza um trocador de calor para adequar a corrente de refluxo às mesmas condições da alimentação. A configuração do sistema extrativo se encontra na Figura 4 demonstrada a seguir.

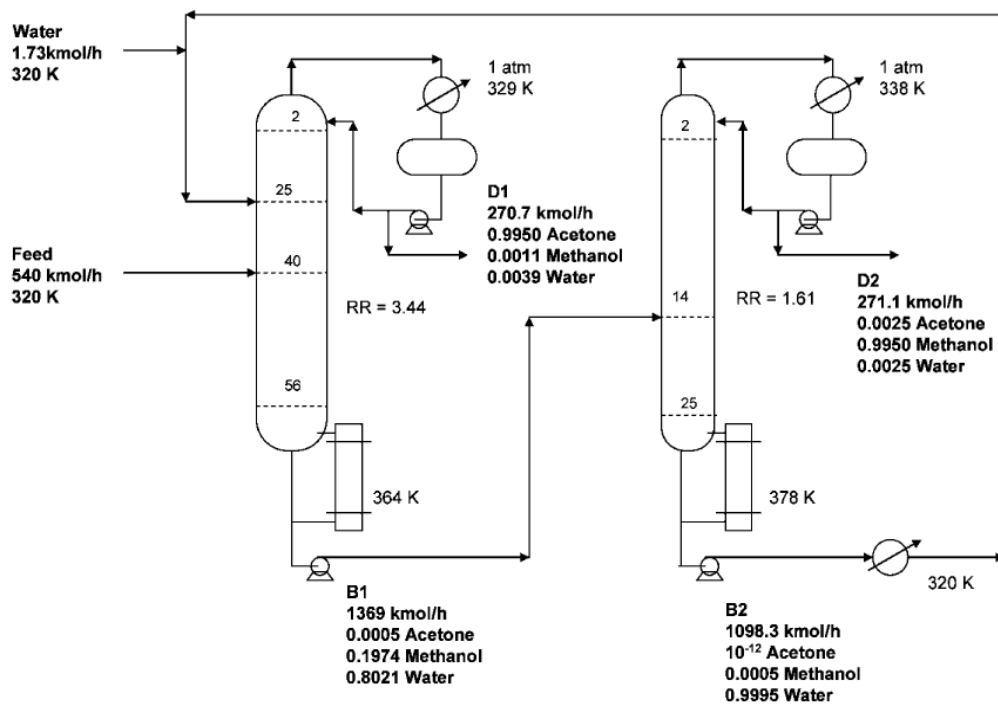


Figura 4: Fluxograma para o sistema de destilação extrativa (modificado de Luyben 2008).

5 Resultados e discussões

A seguir serão demonstrados os resultados obtidos para as simulações realizadas no Aspen Plus dos dois métodos utilizados.

5.1 Separação por Destilação Extrativa

Para a simulação do método de separação por destilação extrativa utilizando água como solvente só foi possível adquirir os dados para a condição inicial das simulações, não foi possível efetuar variações na carga e composição devido a dificuldades de convergência para as colunas.

Para a condição de entrada de 540 kmol/h de metanol e acetona equimolar e as especificações de produto das colunas em 99,5% em mol dos seus respectivos produtos foram encontradas um consumo energético de 4,7 Mcal/s na primeira coluna e 3,4 Mcal/s na segunda coluna. A corrente de saída do produto metanol na segunda coluna atingiu a especificação de pureza desejada e apresentou uma fração molar de 0,002 de solvente. A corrente de topo da primeira coluna também foi capaz de atingir sua especificação de pureza, 99,5% em mol de acetona, com uma fração de 0,004 em mol de água, o dobro o valor apresentado anteriormente na corrente de metanol.

Para uma melhor visualização, os resultados da simulação do método extrativo podem ser conferidos na Tabela 1. Nessa tabela não é considerada a reposição do solvente, corrente adicionada ao refluxo que permite fechar o balanço de massa.

Tabela 1: Dados obtidos para o método de separação extrativo.

Corrente	Alimentação*	Saída Acetona	Saída Metanol
-	-	-	-
Temperatura (K)	320	329,3	337,6
Vazão Mássica (kg/hr)	24333	15667,3	8696,8
Acetona	15681,6	15639,4	42,2
Metanol	8651,4	8,1	8643,3
Água	-	19,8	11,3
Frações Mássicas	-	-	-
Acetona	0,644	0,998	0,005
Metanol	0,356	520 PPM	0,994
Água	-	0,001	0,001
Frações Molares	-	-	-
Acetona	0,500	0,995	0,003
Metanol	0,500	940 PPM	0,995
Água	-	0,004	0,002
Consumo de Energia (cal/s)	8.059.142		

5.2 Separação através de troca de pressão

Utilizando a mesma entrada de metanol e acetona que a usada no outro sistema, e mantendo as especificações de 99,5% de pureza em mol dos produtos, o consumo de energia da primeira coluna foi de 6,9 Mcal/s e na segunda coluna o consumo chegou a 2,9 Mcal/s.

Sobre a pureza, as duas correntes atingiram suas frações molares alvo, 0,995 em seus respectivos produtos. Pelo fato de só existir no sistema os dois componentes desejados como produtos, a quantidade de acetona que é perdida na corrente de metanol é quase 90% maior que a quantidade presente na corrente de metanol do método extrativo.

A Tabela 2 ilustra as informações acima.

Tabela 2: Dados obtidos para o método de destilação por troca de pressão.

Corrente	Alimentação	Saída Acetona	Saída Metanol
-	-	-	-
Temperatura (K)	320	418,1	345,3
Vazão Mássica (kg/h)	24333	15646,4	8686,6
Acetona	15681,6	15603	78,6
Metanol	8651,4	43,4	8608
Frações Mássicas	-	-	-
Acetona	0,644	0,998	0,005
Metanol	0,356	520 PPM	0,995
Frações Molares	-	-	-
Acetona	0,500	0,995	0,005
Metanol	0,500	0,005	0,995
Consumo de Energia (cal/s)	Primeira Coluna	6.857.847	
	Segunda Coluna	2.918.838	

A partir dessa simulação fez-se uma análise de sensibilidade frente a variação de carga. A variação utilizada foi de 520 kmol/h até 640 kmol/h em intervalos de 10 unidades entre as simulações.

Para as especificações iniciais iguais as do caso anterior se observou uma variação no consumo energético de mesma proporção que a variação efetuada na carga. Para o caso da menor alimentação testada, 520 kmol/h que representa uma redução de 3,7% na alimentação, para o consumo energético total foi observado o valor de 9,4 Mcal/s uma redução dos mesmos 3,7% no consumo energético. Esse comportamento é observado em todos os pontos avaliados. A alimentação de 640 kmol/h atingiu o maior consumo total de energia obtido com o valor de 11,6 Mcal/s, um aumento de 18,5% na carga e no consumo. A energia consumida nesses casos e nos intermediários pode ser visualizada na Figura 5.

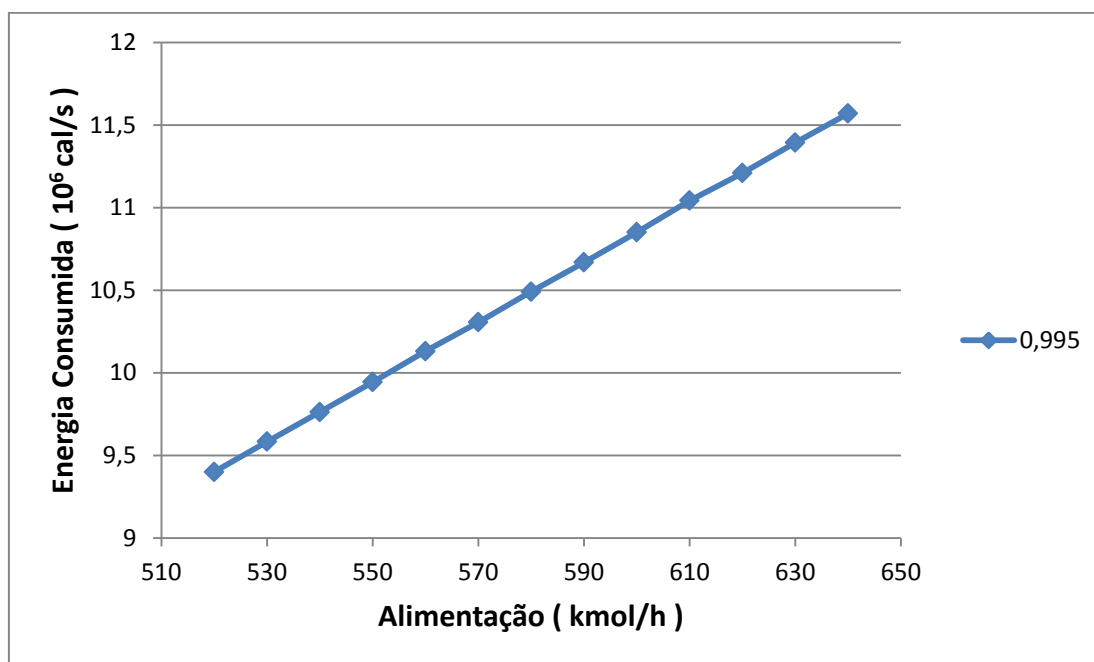


Figura 5: Gráfico da relação entre a energia consumida pela alimentação para os produtos com 99,5% de pureza.

A mesma análise foi repetida, desta vez variando a especificação dos produtos. Foram utilizadas como especificação de pureza em ambos os produtos, as frações molares de 0,997, de 0,999, de 0,9995 e de 0,9998. Ainda foi verificado o ponto de maior pureza possível obtida nesta configuração cuja especificação foi de no máximo 20 PPM de outras substâncias no metanol e de 72,5 PPM na acetona.

A Figura 6 resume essas simulações, mas ainda não contempla a de maior pureza possível. Nela são apresentadas as curvas de energia total consumida pela alimentação do sistema para cada uma das diferentes especificações até 0,9998 (200 ppm).

Pode se observar que até a curva de 500 ppm não há variações no consumo de energia tão bruscas quanto as variações na especificação. Reduzindo a quantidade de contaminantes em 10 vezes o consumo de energia teve um acréscimo de 3,5% no consumo de energia para todos os pontos entre 520 kmol/h e 640 kmol/h. Para 200 ppm o acréscimo de energia consumida quando comparado ao caso inicial foi de 7,2%.

O último caso avaliado, onde foi obtida a maior pureza observada o consumo energético apresentou um aumento significativo, em média 110% maior que o consumo de energia para a primeira especificação de pureza.

Devido à diferença de grandeza nos valores de consumo de energia, para não comprimir as curvas anteriores, a curva de energia por alimentação do caso de maior pureza foi separado na Figura 7.

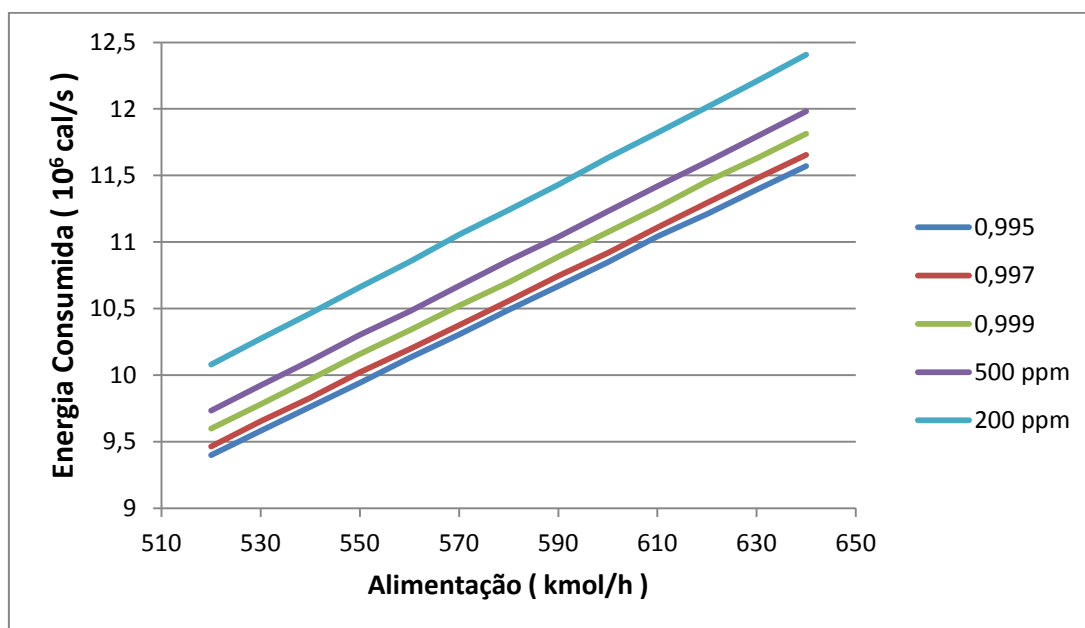


Figura 6: Gráfico da energia consumida por alimentação para diferentes especificações de produto.

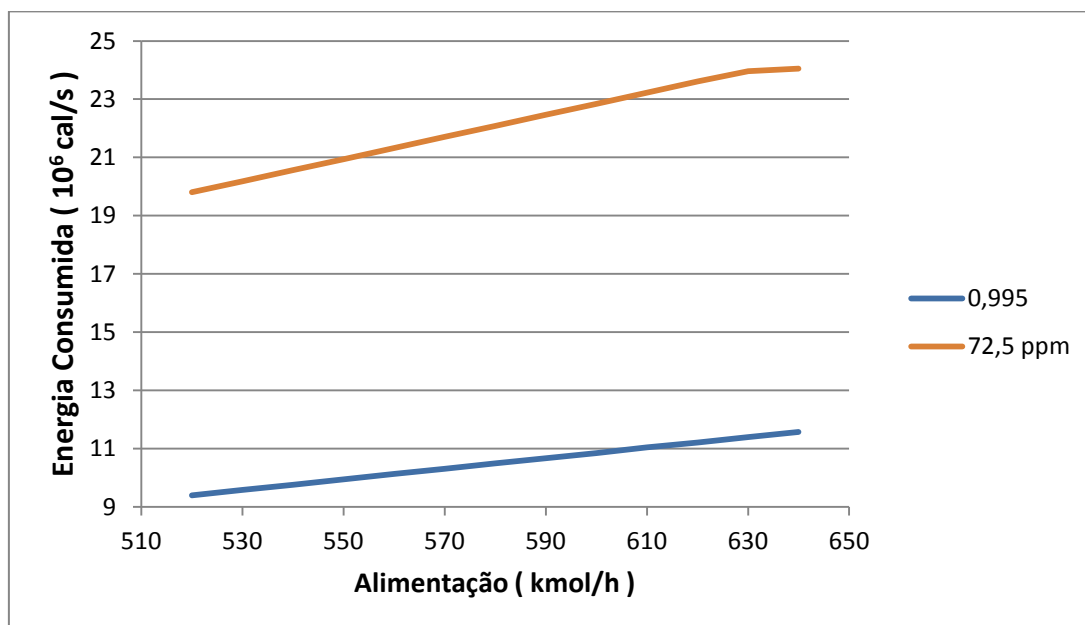


Figura 7: Gráfico da relação entre consumo de energia por alimentação para o caso de maior pureza.

5.3 Resultados da aplicação do WAR

Para avaliar os dados obtidos nas simulações utilizando o índice WAR, foi utilizado o aplicativo WAR GUI, que aplica internamente as equações encontradas no Capítulo 2 para o cálculo do PEI do sistema.

Os dados obtidos nas simulações foram inseridos manualmente em um estudo de caso criado dentro do WAR GUI. As informações utilizadas foram os componentes e suas vazões mássicas além do consumo total de energia.

Foram mantidas com valores padrão, relevância igual, todas as oito categorias de potenciais consideradas pelo software, elas são: toxicidade por ingestão (HTPI), por inalação ou contato com a pele (HTPE), aquática (ATP), terrestre (TTP), aquecimento global (GWP), esgotamento de ozônio (ODP), oxidação fotoquímica (PCOP) e o potencial de acidificação (AP).

Para os casos iniciais da destilação extrativa e destilação por troca de pressão, utilizando os dados apresentados nas tabelas 1 e 2, e utilizando gás como opção de combustível o WAR GUI retornou os resultados como apresentados na Figura 8 onde DE foi usado para representar destilação extrativa e PS representa *Pressure Swing*. Este gráfico não contém o PEI associado ao consumo de energia. Esses dados são obtidos através do arquivo de resultados gerado posteriormente, eles serão comentados em seguida à análise do material.

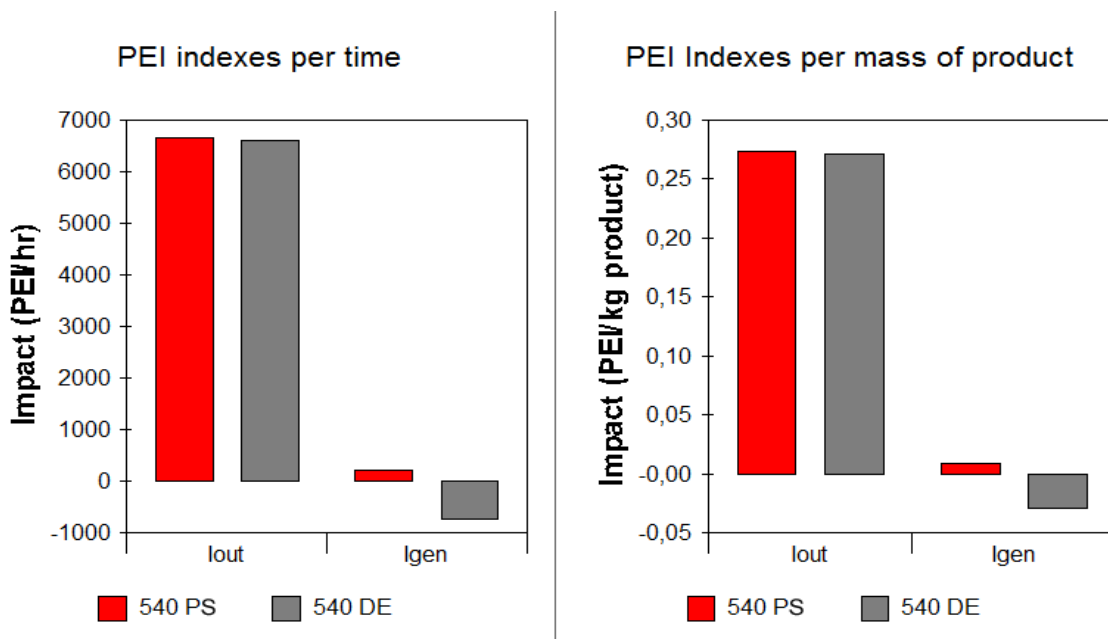


Figura 8: Gráfico exportado de WAR GUI com análise de potencial de impacto ambiental.

Pode se observar que o PEI por tempo, assim como o PEI por massa de produto de saída do método extrativo é ligeiramente inferior ao apresentado pela troca de pressão. Isso se deve ao fato de que a água mesmo em pouca quantidade está diluindo o PEI das correntes de produto.

O mesmo se aplica ao PEI gerado dentro do sistema, para o caso da troca de pressão entra uma quantidade de metanol e acetona misturada que é a mesma quantidade de metanol e acetona que saem em suas correntes de produto. A variação de PEI para este caso é desprezível. No método extrativo a redução de PEI observada no sistema se deve a pequena diluição dos componentes de saída. A especificação das

correntes em pureza do produto é a mesma, mas a presença da água, na mesma quantidade de metanol e acetona do caso anterior, por si só é considerada menos prejudicial que as correntes compostas de metanol e acetona apenas.

No lado energético, utilizando gás natural como combustível, os resultados da análise WAR para a saída de PEI relacionada ao consumo de combustíveis foram de 163 PEI/h para o método de troca de pressão e 134 PEI/h para o extrativo. Utilizando carvão como combustível para suprir a demanda energética dos sistemas o PEI associado à energia chegou a 1060 PEI/h para troca de pressão e 872 PEI/h no extrativo, a proporção continua a mesma, mas o potencial associado é mais de seis vezes maior que utilizando gás. O suficiente para anular a geração negativa de PEI provocada pela diluição dos produtos por causa da água, como observado na Figura 9.

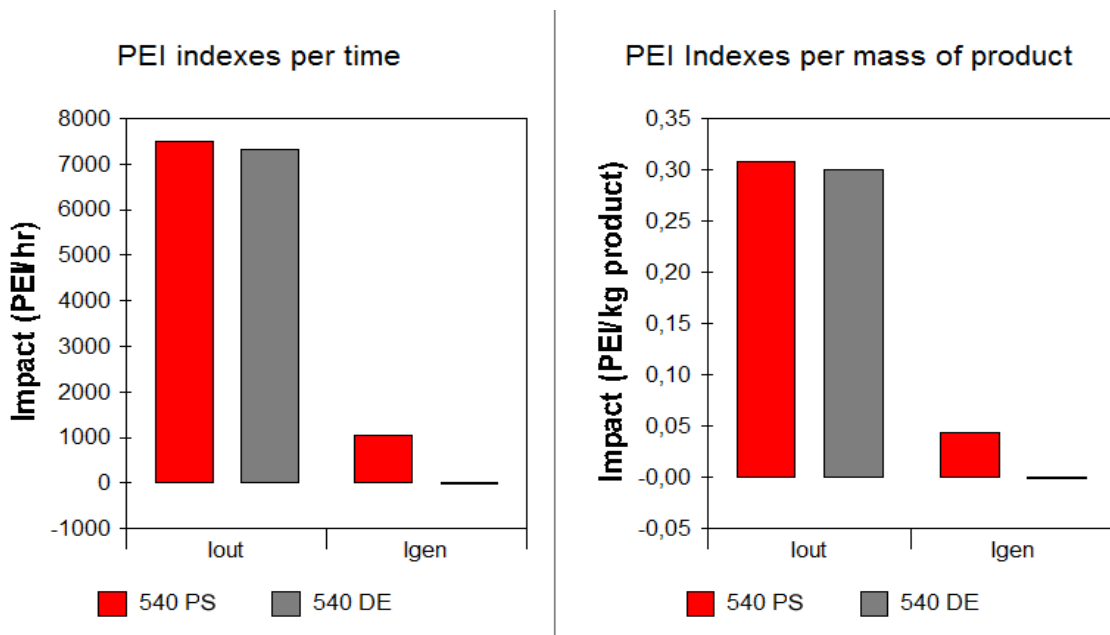


Figura 9: Análise substituindo o combustível por carvão.

Analisando os casos extremos e o intermediário de alimentação para o método *Pressure Swing* com especificação dos produtos em 99,5% em mol de pureza, obtêm-se os resultados dispostos na Figura 10.

É possível observar na Figura 10 que o índice associa um maior PEI por tempo conforme a alimentação aumenta e ao avaliar o PEI obtido em relação à massa de produto esse valor é constante.

Utilizando o WAR para comparar três especificações com a mesma alimentação obtiveram-se resultados semelhantes, na Figura 11 pode-se ver que para os dois primeiros casos os resultados são praticamente iguais, o último caso só se destaca por utilizar mais do que o dobro de energia que os anteriores.

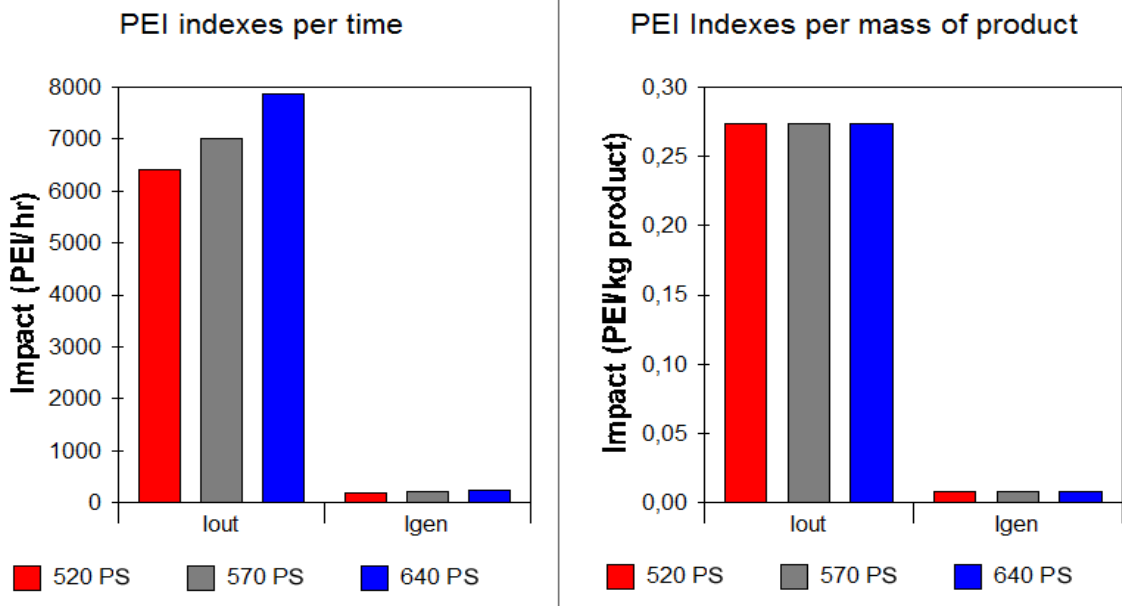


Figura 10: Comparação entre diferentes cargas para o mesmo método.

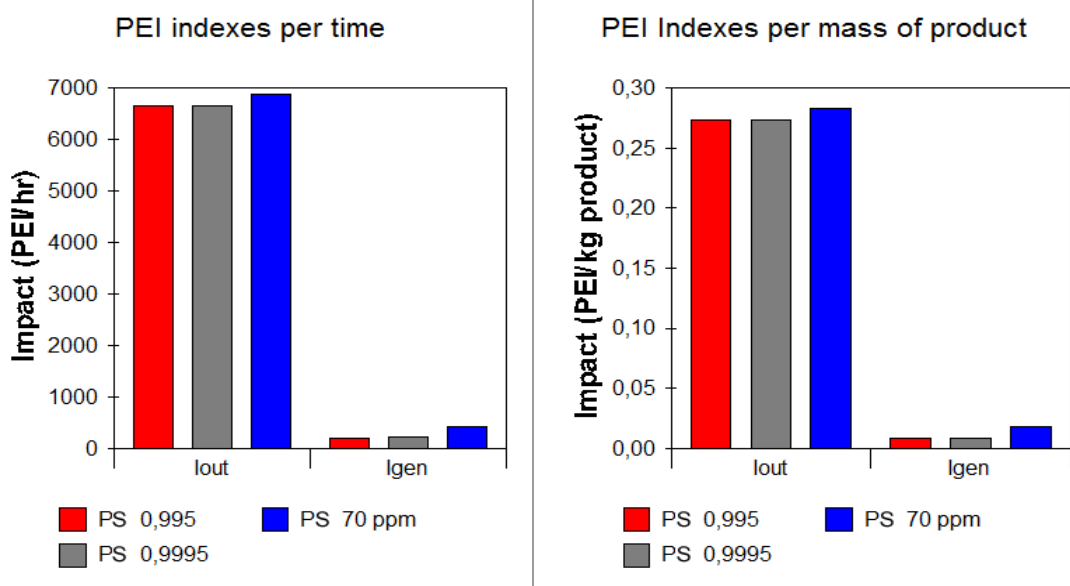


Figura 11: Comparação entre diferentes especificações para o mesmo método.

5.4 Outros resultados

A aplicação do método IRCHS apresentou resultados semelhantes à análise com variação na carga efetuada no WAR, como só leva em consideração o inventário do sistema, seu resultado em *Hazard Pounds* aumentou proporcionalmente com a

alimentação, mas permaneceu o mesmo entre os diferentes métodos ou especificações para a mesma entrada. Conforme observado na Figura 12.

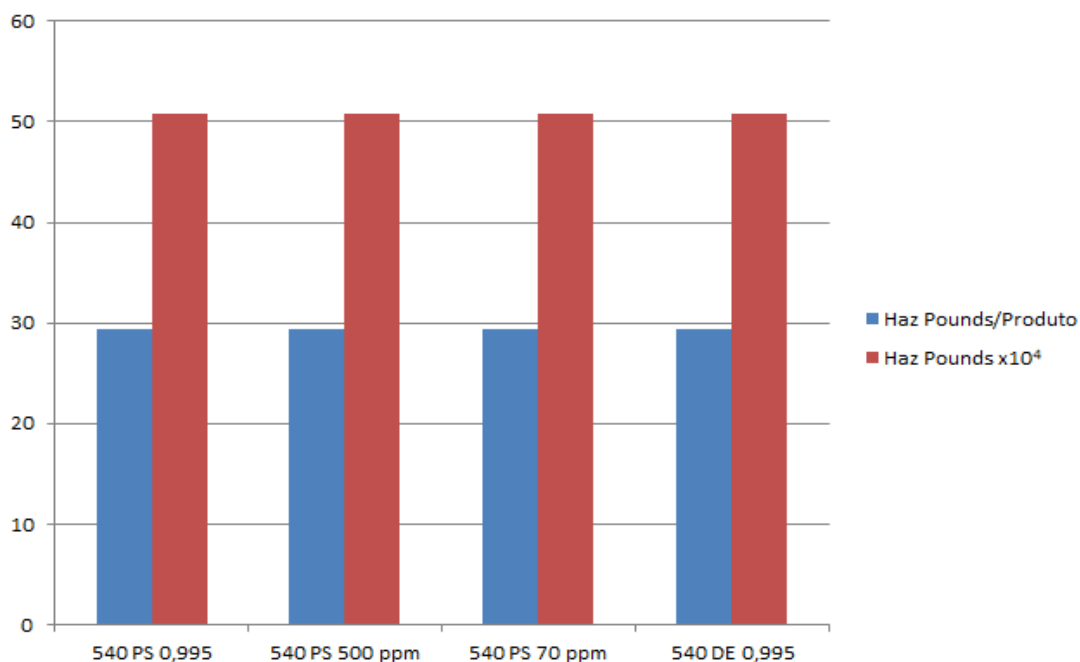


Figura 12: Resultados do indicador IRCHS para mesma carga.

Utilizando o índice simples de intensidade energética específica, a destilação extrativa consumiu 330,78 cal/kg de produto. Na mesma especificação a destilação por troca de pressão utilizou em média 401,32 cal/kg. Para as especificações de 0,997, 0,999, 0,9995 e 70 ppm os resultados obtidos foram 404,09 cal/kg, 409,65 cal/kg, 415,40 cal/kg e 844,07 cal/kg respectivamente.

Nos modelos estudados como todas as saídas são de produtos a aplicação do índice de intensidade mássica da forma que como é definido foi prejudicada. Devido à utilização de água no caso extrativo e a mesma sair em pequena quantidade nos produtos, este método acaba gerando mais massa de produto com a mesma alimentação de metanol e acetona que o método da troca de pressão. A contra partida dessa aparente vantagem seria quantificar o consumo de água. Entretanto, para este caso específico isso se resume ao fato que a destilação extrativa usa água e a troca de pressão não necessita de uma fonte de água.

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

No presente trabalho foram apresentados alguns indicadores de sustentabilidade para comparar duas tecnologias de destilação para separação azeotrópica. Escolheram-se indicadores que poderiam ser utilizados para avaliar indústrias químicas, voltados para fatores ambientais.

Para o caso de estudo os índices energéticos utilizados apontaram o método extrativo como o mais sustentável. Seu consumo de energia é consideravelmente menor (20%) e suas torres também possuem um porte menor o que significaria um menor custo de instalação. Na comparação para as diferentes especificações de produto para a destilação por troca de pressão, o aumento no consumo de energia foi pequeno (3,5%) para uma melhoria de 5000 ppm para 500 ppm nos produtos. Caso o valor agregado aos produtos com melhor especificação seja maior que os gastos de combustível operados nesses pontos pode ser justificado.

A princípio o método extrativo também obteve os melhores resultados para os indicadores ambientais. Seu uso, porém poderia ser limitado ou até proibitivo dependendo da disponibilidade de água na região da planta. Se o custo de água for muito alto ou ela ser um recurso muito limitado à destilação por troca de pressão pode se tornar a opção mais ambientalmente correta, mesmo com a necessidade de um maior investimento e maior consumo energético.

Caso o consumo de água não seja um fator limitante e as especificações do produto aceitem uma pequena quantidade de água nos produtos, então a destilação através do método extrativo é a escolha mais sustentável ambientalmente e com pouca diferença até em segurança por trabalhar em temperaturas e pressão menores.

O índice WAR utilizado através do programa WAR GUI demonstrou ser de fácil aplicação e avaliação de seus resultados, mas assim como o método IRCHS não foi capaz de apresentar boas comparações entre correntes de processos semelhantes, sistemas sem reações ou sem geração de resíduos.

Métricas de sustentabilidade apresentam flexibilidade para serem utilizadas conforme as necessidades de quem as usam. Pode por exemplo ser escolhido um fator mais importante e lhe conferir um peso maior. Em determinadas situações poderá ser o risco aos trabalhadores, ou ao ambiente, em outras o mais importante poderá ser retorno financeiro ou o simples, mas de extrema importância hoje, o consumo de água.

A fim de dar continuidade a este trabalho é possível buscar novos conjuntos de indicadores para obter uma melhor visualização deste e de outros casos de estudo. Sugerir modificações em índices já estabelecidos de forma a possibilitar sua aplicação em casos com características diferentes da sua aplicação inicial, sugerir um conjunto inteiramente novo de indicadores.

7 Referências

- (1) AL-SHARRAH, G. K. et al. *A new safety risk index for use in petrochemical planning*. Process Safety and Environmental Protection. **2007**, 85 (B6), 533–540.
- (2) AL-SHARRAH, G. et al. *Sustainability indicators for decision-making and optimization in the process industry: The case of the petrochemical industry*. Chem. Eng. Science. **2010**, 65, 1452-1461.
- (3) BRUNDTLAND, G. H. (editor). *Our Common Future: The World Commission on Environment and Development*. Oxford: Oxford University Press. **1987**.
- (4) CABEZAS, H., et al. *Pollution Prevention with Chemical Process Simulators: The Generalized Waste Reduction (WAR) Algorithm*. Computers & Chemical Engineering. **1997**, 21, 1: S305–S310.
- (5) FATHI-AFSHAR, S., YANG, J. *Designing the optimal structure of the petrochemical industry for minimum cost and least gross toxicity of chemical production*. Chemical Engineering Science. **1985**, 40 (5), 781–797.
- (6) GODFRAY, L., TODD, C. *Defining Thresholds for Freshwater Sustainability Indicators within the Context of South African Water Resource Management*. 2nd WARFA/Waternet Symposium. **2001**.
- (7) HILALY, A. K.; SIKDAR, S. K. *Pollution Balance: A New Methodology for Minimizing Waste Production in Manufacturing Processes*. J. Air Waste Manage. Assoc. **1994**, 44, 1303-1308.
- (8) KOHLHASE, K. R. *The oil industry after Rio*. In: *Proceedings of the 14th World Petroleum Congress*. John Wiley & Sons, Norway. **1994**.
- (9) LANCKER, E., NIJKAMP, P. *A policy scenario analysis of sustainable agricultural development options: a case study for Nepal*. Impact Assess. Project Appraisal. **2000**, 18 (2), 111–124.
- (10) LUYBEN, W. L. *Comparison of Extractive Distillation and Pressure-Swing Distillation for Acetone-Methanol Separation*. Ind. Eng. Chem. Res. **2008**, 47, 2696-2707.
- (11) National Fire Protection Association (NFPA) Standard 49, Hazardous Chemical Data. **1994**.
- (12) *Pollution Prevention Progress Measurement Method (3P2M) A tool for Evaluating Pollution Prevention and Identifying Safer Chemical Substitutes*. Purdue University. **1998**.
- (13) RUIZ-MERCADO, et al. *Sustainability Indicators for Chemical Processes: I. Taxonomy*. Ind. Eng. Chem. Res. **2012**, 51, 2329-2353.

-
- (14) SARAIVA, I. *Custos e Impactes Ambientais no Projecto de Processos Químicos*. DEQ Universidade de Coimbra. **2003**.
- (15) WARD, P. B. *Analyzing the past, planning the future, for the hazard of management*. Process Safety and Environmental Protection. **2002**. 81 (B1), 47–54.
- (16) YOUNG, D. M., CABEZAS, H. *Designing sustainable process with simulation: the waste reduction (WAR) algorithm*. Computers & Chemical Engineering. **1999**, 23, 1477–1491.