

## ESTUDO APLICADO DE ACV EM OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO DE DUPLO EFEITO COM APORTE DE ENERGIA SOLAR

**Bruno Campos Teixeira de Carvalho (\*), João Luiz de Medeiros Neto, Monica Carvalho**

\* Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Cidade Universitária. João Pessoa-PB. CEP 58051-970. Tel +55 83 3216 7186, brunotcarvalho@gmail.com

### RESUMO

Com a crescente demanda mundial de energia causada pelo aumento das populações e do consumo nas últimas décadas, tratar da sustentabilidade do planeta a partir do uso de energias alternativas e renováveis, bem como a inserção de softwares para ajudar na análise de impactos ao meio ambiente, tornaram-se prioridade entre gestores e líderes mundiais e já começam a ser demandados pela sociedade em geral. Com isso, os sistemas de refrigeração por absorção de vapor têm se tornado atrativo, entre outros motivos, por apresentarem reduzido consumo de energia elétrica e também por apresentarem baixo impacto ambiental, devido ao tipo de fluido refrigerante utilizado. Ferramentas de análise estão atualmente buscando não somente uma visão financeira a curto prazo, mas sim um estado otimizado que também leve em consideração o ciclo que envolve desde a produção do produto/equipamento, até o descarte final do produto na natureza após seu uso. Com isso, as tomadas de decisões que antes se baseavam exclusivamente em critérios econômicos, passam agora a incluir também os critérios ambientais. Na busca por produtos e processos mais eficientes, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) se mostra como uma metodologia consolidada para cálculo de impactos ambientais. A ACV também é conhecida como análise do "berço ao túmulo", e pode ser aplicada a processos, atividades ou serviços. Nesse contexto, o presente estudo tem por objetivo apresentar uma ACV comparativa em um sistema de refrigeração por absorção de duplo efeito em série (que utiliza o par água - brometo de lítio). Duas opções de calor fornecido serão comparadas: calor fornecido por coletores solares e o calor fornecido pela queima direta convencional de gás natural.

**PALAVRAS-CHAVE:** Refrigeração por absorção, coletor solar, avaliação de ciclo de vida.

### INTRODUÇÃO

O abastecimento energético mundial é o grande desafio da atualidade e muitos países estão fazendo esforços para racionalizar o emprego da energia, seja por meio de pesquisas que busquem a maior eficiência dos sistemas, seja procurando outras fontes alternativas de energia. Considerações econômicas e ambientais trouxeram um novo interesse no uso de métodos de uso e geração de energia. O governo brasileiro vem incentivando a adoção de medidas para redução das emissões de GEE em todos os setores produtivos. No final de 2009, foi instituída a Política Nacional sobre Mudança do Clima (Lei 12.187, de 29/12/2009), que instiga os diversos setores da economia a pesquisar, desenvolver e adotar tecnologias de baixo carbono (BRASIL, 2009). Com isso, sistemas que antigamente utilizavam apenas de combustíveis fósseis, vem sendo gradativamente substituídos por outros que se utilizam de fontes de energia alternativas e renováveis, fazendo com que tais medidas se tenham fortalecido a pesquisa de sistemas de condicionamento de ar e refrigeração que utilizam o recurso solar como fonte alternativa de energia.

Os protocolos de Montreal (1987) e Quioto (1997) impulsionaram o retorno das pesquisas em refrigeração por absorção no tocante a indústria e comércio, por causa das metas de substituição dos fluidos refrigerante CFCs (clorofluorocarbonetos), fluidos que são aplicados na refrigeração por compressão de vapor, como também a necessidade de desenvolvimento de tecnologias alternativas para produção do frio (SANTOS, 2005). De acordo com as alternativas existentes, os sistemas de refrigeração por absorção tornam-se uma opção interessante, pois prioriza o aspecto de análise do ponto de vista térmico e no aproveitamento de fontes energéticas. (SANTOS, 2005)

Os sistemas de refrigeração por absorção utilizam energia térmica como fonte energética para o efeito desejado, enquanto que os sistemas de refrigeração com tecnologia de compressão de vapor utilizam trabalho mecânico proveniente de um compressor (CORDEIRO, 2012). O consumo de energia elétrica nos sistemas de absorção é mínimo (energia elétrica para acionar as bombas) em comparação ao consumo de energia elétrica de um compressor de vapor. (MOREIRA, 2008)

Os sistemas em estudo são compostos basicamente de trocadores de calor. O fluido de trabalho é uma mistura binária de água (fluido refrigerante) e Brometo de Lítio (solução aquosa). Utilizam pressões abaixo da atmosférica, em vácuo, e dependendo da disposição do sistema (simples, duplo e triplo efeito), utilizam uma ou mais pressões superiores a pressão atmosférica. (ROCHA, 2010)

Outra característica dos sistemas de absorção é o número de vezes que a solução é aquecida para gerar vapor a alta pressão. Tal característica se refere ao número de efeitos, ou seja, simples efeito utiliza o calor de entrada uma vez;

duplo efeito consome o calor de entrada no primeiro gerador de vapor e o vapor gerado com pressão elevada é usado como fonte térmica para o segundo gerador, e assim por diante. (SANTOS, 2005)

Essa tecnologia também é caracterizada no que tange ao fluxo da solução, podendo ser em série ou em paralelo. Na configuração em série, a solução oriunda do absorvedor é bombeada de forma direta para o gerador de vapor de alta pressão, e quando tratamos do sistema em paralelo, a solução é bombeada de forma simultânea para todos os geradores de vapor quem compõem o sistema de absorção. (ROCHA, 2010)

O sistema de refrigeração por absorção adotado no presente trabalho é o de duplo efeito, que possui eficiência global maior do que a eficiência dos sistemas de simples, devido a utilização do calor de entrada no segundo gerador de vapor do ciclo. O supracitado sistema é constituído de sete trocadores de calor, uma bomba de recirculação do fluido refrigerante e outra bomba para solução. Trabalha com três níveis de pressão (duas pressões abaixo da atmosfera e outra acima). É composta por três níveis de concentração. (SANTOS, 2005)

O ciclo do sistema de refrigeração por absorção de duplo efeito em série (mostrado na figura 1) ocorre do seguinte modo: O vapor de refrigerante com baixa pressão, oriundo do evaporador, é absorvido pela solução (Brometo de Lítio) ao chegar no absorvedor. Logo após a solução é bombeada para o gerador de vapor 1. Chegando no gerador de vapor I, a solução recebe energia térmica na forma de calor de uma fonte térmica (queima direta gás natural ou energia solar) até que o vapor do fluido refrigerante se separe da solução de brometo de lítio, logo do gerador I sai vapor de refrigerante com elevada pressão e solução de Brometo de lítio. A solução expelida do gerador I passa por um dispositivo de expansão antes de chegar no gerador de vapor II (processo necessário para que se atinja a pressão adequada na entrada do gerador II, mantendo a diferença de pressão). O vapor do fluido refrigerante produzido no gerador I vai para o gerador II, aquecendo a solução vinda do gerador II e se transformando em líquido saturado. Em contrapartida a solução aquecida no gerador II vai liberar a parte restante do vapor, sendo assim, do gerador II saem vapor refrigerante com pressão elevada e solução de Brometo de lítio. O fluido refrigerante no estado de líquido saturado percorre um dispositivo de expansão, tornando-se mistura. Em seguida, se junta com o vapor fabricado no gerador II, antes de passar pelo condensador. No condensador, o fluido refrigerante e a solução perdem calor para o ambiente devido a um sistema de arrefecimento, e é condensado. Por fim o condensado e a solução passa por um dispositivo de expansão, chegando no evaporador e no absorvedor, respectivamente, recomeçando o ciclo. (ROCHA, 2010)

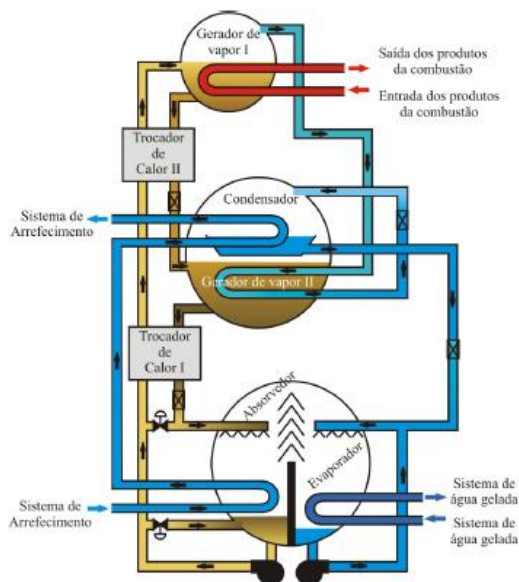


Figura 1: Sistema de refrigeração por absorção de duplo efeito em série. Fonte: SANTOS, 2005

O aproveitamento da energia produzida pelo sol, abundante na escala terrestre, tanto como gerador de calor como também de luz, é uma das alternativas mais promissoras para suprir a necessidade energética no caso de ocorrência do colapso das fontes fósseis, sendo assim, a utilização de coletores solares como fonte de energia térmica, pode ser uma opção interessante nos sistemas de absorção, por ser uma tecnologia que não tem necessidade de manutenção de alto custo e que não gera impactos ambientais com emissão dos GEE (Gases de Efeito Estufa).

Diante do exposto, o presente trabalho visa a realização do estudo comparativo via ACV (Análise de Ciclo de Vida) da pegada de carbono associada ao fornecimento de calor a um sistema de refrigeração por absorção de duplo efeito em série, através da queima direta do gás natural em um queimador da fabricante WEISHAUP, modelo WG5F/1-A com potência de trabalho regulável 5 a 50 kW (1,42 a 14,22 TR) em substituição a um coletor solar fabricado pela empresa Suíça TVP, modelo MT- POWER com capacidade de aquecimento de até 200 °C. A unidade de refrigeração analisada terá capacidade de refrigeração de 5 TR.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Avaliação de Ciclo de Vida

Para comparar os impactos ambientais da pegada de carbono dos derivados do fornecimento de calor no sistema de refrigeração por absorção de duplo efeito, através de coletores solares e pela queima direta do gás natural, utilizou-se a ACV como ferramenta de gestão ambiental. O objetivo da ACV é quantificar os impactos ambientais causados por determinado produto ou serviço, possibilitando uma visão ampla dos danos ambientais e sociais causados, para que se possa comparar com outros processos ou produtos da mesma linha para escolha do processo menos impactante (GUINÉE, 2001; GUINÉE, 2002).

A ACV é uma abordagem composta por quatro componentes: definição de objetivos e âmbito, que descreve e define o produto, o processo ou atividade; a análise de inventário, que identifica e quantifica as entradas e saídas; a análise de impacto, que analisa os efeitos ambientais das entradas e saídas identificadas na análise de inventário; e por fim a interpretação dos resultados para selecionar o melhor produto, processo ou serviço (ABNT, 2014).

O software utilizado para executar e desenvolver a ACV foi o SimaPro® 8.2.0.0 (PRÉ-CONSULTANTS, 2014). Para iniciar a análise, o SimaPro® vem com um inventário completo na forma de bases de dados de materiais e processos acoplados com ferramentas de cálculo de impactos (SCHISCHKE, 2005). De acordo com Ferreira (2004), desde que foi introduzido em 1990, este software tem sido um dos mais utilizados para análise ambiental dos produtos com vista a uma tomada de decisão no desenvolvimento de produtos e política de produto. O programa inclui diversas bases de dados para realização dos inventários, com milhares de processos detalhados.

A pegada de carbono de um produto se refere à quantidade de gases de efeito estufa emitidos na produção, uso e descarte desse produto (PANDEY et al., 2011), o seu gerenciamento na cadeia de produtos é um passo importante para o esforço de reduzir as emissões de carbono e mitigar as mudanças climáticas (CARBON TRUST, 2006).

O método para avaliação de impactos ambientais utilizado neste trabalho foi o Global Warming Potencial (GWP) desenvolvido pelo IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) (IPCC, 2013). Esse método leva em consideração o potencial direto de aquecimento global oriundo das emissões gasosas, agregando todos os valores em um denominador comum, que é a quantidade de CO<sub>2</sub> equivalente (PRÉ-CONSULTANTS, 2014). Assim, o CO<sub>2</sub> é utilizado como referência, expressando o potencial da substância em gerar aquecimento global em um horizonte temporal de 100 anos (GWP 100a), com a unidade quantificadora expressa por kg de CO<sub>2</sub> equivalentes. O alcance deste indicador é global (PRÉ-CONSULTANTS, 2014).

Para esse estudo, a base de dados utilizada foi a Ecoinvent possui dados de vários setores, dentre eles, a produção de energia, produção de produtos químicos, materiais de construção, entre outros. Seu banco de dados consiste em conjuntos de mais de 10.000 dados interligados, com cada um descrevendo um inventário de ciclo de vida em algum nível de processo, atividade ou serviço (ECOINVENT, 2016).

### Estudo de caso: fornecimento de calor a um sistema de refrigeração de absorção de duplo efeito

A Tabela 1 traz as especificações do coletor solar analisado, e a Figura 2 traz a relação da temperatura com a eficiência do coletor solar, a uma radiação de 1000 W/m<sup>2</sup>. Considerando a temperatura máxima de trabalho em 180°C, exposta na Tabela 1, a Figura 2 nos traz a informação da eficiência para esta temperatura no valor de 0,4.

Para realização da comparação entre as duas metodologias utilizadas no sistema de refrigeração por absorção deste estudo, os impactos ambientais analisados através do ciclo de vida serão distintos: enquanto os efeitos causados através do queimador à gás natural (GN) estarão apenas relacionados à combustão do mesmo ao longo de um ano de funcionamento (aproximadamente oito mil horas), nos coletores solares os impactos causados vão além e devem considerar as emissões de CO<sub>2</sub> em relação a fabricação, transporte, manutenção e vida útil de acordo com o número de coletores necessários, mantendo as oito mil horas de trabalho em um ano.

Como a unidade de refrigeração analisada possui capacidade de refrigeração de 5 TR (Toneladas de Refrigeração), equivalente a 506304 MJ, o número de coletores solares necessários para atender a demanda energética foi calculado de acordo com a potência e eficiência da unidade. Com pico de potência de 500 W (Tabela 1) e com eficiência de 0,4 (Figura 2), temos que em uma hora, 200 W serão consumidos, totalizando 1600 kWh (5760 MJ) ao longo de oito mil horas anuais por um coletor.

Assim, para garantir a capacidade térmica demandada anualmente de 506304 MJ, serão necessários 88 coletores solares.

Tabela 1. Especificações da TVP Solar MT-Power - Fonte: TVP Solar

Especificações da TVP Solar MT-Power			
Características Físicas		Condições de Operação	
<b>Dimensões:</b>		Temperatura de Estagnação	310°C
Área Bruta	1,95m <sup>2</sup>	Pressão Máxima de Operação	16 bar
Área de Abertura	1,84m <sup>2</sup>	<b>Aplicações</b>	
Peso:	52kg		
<b>Materiais:</b>		Refrigeração: (Chiller de Absorção de Duplo Efeito)	
Tubo absorvedor de calor	Folha de Alumínio + Tubo de cobre	Temperatura Necessária	180°C
Placa traseira	Aço inox 441	Pico de potência	500 W
Revestimento Anti Reflexivo:	Vidro		

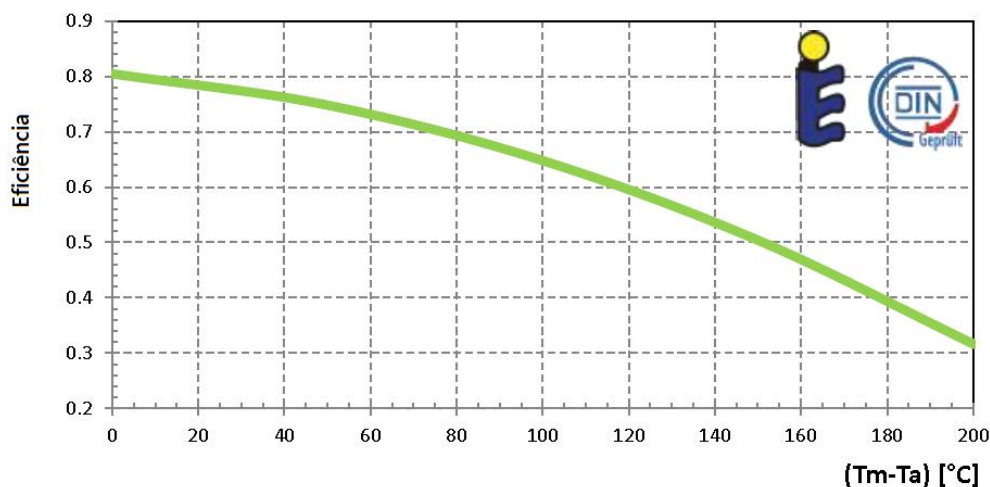


Figura 2: Curva de performance (radiação / temperatura) do coletor. Fonte: TVP Solar

A Tabela 2 mostra a composição material dos coletores solares que suprirão o calor necessário para o sistema de refrigeração. Devido a impossibilidade de mostrar todos os materiais envolvidos na fabricação dos coletores, aqui utilizou-se um *cutoff* de 1%, mostrando todos os materiais de contribuem em pelo menos 1% no resultado total de emissões.

Tabela 2. Composição material principal para 88 coletores solares - Fonte: Elaborado pelos autores.

Material	Quantidade	Material	Quantidade
Borracha sintética	121,6 kg	Lã de rocha	396,0 kg
Propileno glicol	162,4 kg	Aço inox	702,0 kg
Revestimento anti-reflexo	162,0 m <sup>2</sup>	Papelão ondulado	598,0 kg
Alumínio	650,0 kg	Vidro	1476,0 kg
Revestimento (cobre)	162,0 m <sup>2</sup>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	0,386 m <sup>3</sup>
		Cobre	484,0 kg

Os valores apresentados na Tabela 2, representam os valores referentes ao cálculo anual de emissões, multiplicados pela vida útil dos coletores (20 anos).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das considerações feitas na etapa de inventário, a Tabela 3 mostra as emissões de kg CO<sub>2</sub>-eq associadas a utilização do coletor solar para fornecimento de calor. Considerando que os 88 coletores solares são fabricados na Suíça, o deslocamento desses materiais e conseqüentemente seus impactos ambientais via transporte oceânico também foram contabilizados. Considerou-se vida útil, e que não há emissões associadas a manutenção destes coletores. A unidade funcional do estudo, a qual todas as entradas e saídas estão associadas, é o funcionamento do sistema de refrigeração durante 1 ano (8000 horas), produzindo 5 TR. Assim, as emissões de CO<sub>2</sub>-eq são mostradas em base anual.

**Tabela 3. Emissões associadas a utilização de coletores solares para fornecimento de calor a um sistema de refrigeração por absorção - Fonte: Elaborado pelos autores.**

Materiais	kg CO <sub>2</sub> -eq/ano
Lã de rocha	28,4
Aço inox	170,0
Papelão ondulado	32,5
Vidro	83,1
C3H8O2	20,4
Cobre	161,0
Borracha sintética	18,2
Propileno glicol	35,7
Revestimento anti-reflexo	14,1
Alumínio	618,1
Revestimento (cobre)	19,2
Transporte	23,30
<b>TOTAL</b>	<b>1.224,00</b>

Considerando que a queima do gás natural funcione com potência máxima (17,58 kW) durante 8000 horas por ano, isso resulta em um consumo anual de 140.640 kWh (12.902,75 m<sup>3</sup>). Assim, avaliando a queima de 506.304 MJ de gás natural como fonte de energia, o valor encontrado para as emissões foi de 32.400 kg CO<sub>2</sub>-eq/ano.

Observa-se que as emissões associadas a utilização de coletores solares foram significativamente mais baixas que as associadas a combustão do gás natural. Com essa otimização no sistema de refrigeração por absorção utilizando energia solar, houve uma redução de 96,2% das emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera por ano.

A literatura científica mostra que sistemas de refrigeração por absorção com funcionamento contínuo necessita de uma quantidade menor de energia térmica quando comparada com um funcionamento intermitente para a mesma carga térmica (CARVALHO, 2010). Para os dois tipos de sistemas, a energia pode ser fornecida por queimadores a gás natural, coletores solares, ou até mesmo cogeração proveniente de gases quentes residuais. Aqui verificou-se a vantagem ambiental para a utilização de coletores solares para fornecimento do calor necessário.

Tais sistemas podem ser usados tanto para pequenas demandas energéticas como refrigeradores residenciais, ou médias demandas, como *containers* destinados a pista de patinação, por exemplo, chegando a sistemas de refrigeração a nível industrial de grande porte.

Ainda que o foco seja local, devido ao estudo de caso utilizado, os resultados são extrapoláveis para uma cidade, região ou até país, indicando o potencial de mitigação de mudanças climáticas associado a mudança de combustão de gás natural.

## CONCLUSÃO

A ACV é uma metodologia de gestão ambiental muito eficaz para a compreensão e desenvolvimento de estratégias de redução de impactos ambientais, tornando-se um método de estudo muito eficiente na busca de alternativas para diminuição dos impactos gerados em sistemas térmicos em geral.

Os resultados do presente estudo demonstram uma diminuição nos impactos ambientais gerados ao longo do ciclo de vida em uso de equipamentos. A substituição do uso de combustíveis fósseis por energias renováveis gerou uma diminuição de 96,2% nos GEE emitidos durante a operação anual de um sistema de refrigeração por absorção de duplo efeito.

A expansão deste estudo a nível global, acarretaria em enorme benefício ao meio ambiente quanto a redução de emissões de GEE e estudos à cerca da melhoria da eficiência desses sistemas serão explorados pelos autores, visando também uma melhora em outras áreas.

Este estudo faz parte de uma pesquisa mais ampla que envolverá aspectos onde serão estabelecidos métodos para implementação de uma função objetivo multicritério, que relacione simultaneamente os custos econômicos totais e as emissões em determinados intervalos de tempo, formando um estado-ótimo de fornecimento energético relacionando tais características.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (projetos nº 475879/2013-9, 303199/2015-6) e a RECOGAS (Rede Cooperativa Norte – Nordeste do Gás Natural) pelo apoio na obtenção das informações dos equipamentos utilizados no presente trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2014). **NBR ISO 14040**: gestão ambiental, avaliação do ciclo de vida, princípios e estruturas. Rio de Janeiro.
2. BRASIL. **Lei n. 12.187, de 29 de dezembro de 2009**. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 29 dez. 2009. Disponível em: <[http://www.camara.gov.br/proposicoesWeb/prop\\_mostrarintegra?codteor=841507&filename=LegislacaoCitada+-L+195/2011](http://www.camara.gov.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=841507&filename=LegislacaoCitada+-L+195/2011)>. Acesso em: 18 set. 2016
3. CARBON TRUST. *Carbon footprints in the supply chain*: the next step for business. The Carbon Trust, nov. 2006.
4. CARVALHO, P. S. G. **Estudo Aplicado de ACV a Ciclo de Refrigeração por Absorção**. São Paulo, 2010, 351p
5. CORDEIRO, M. C. L. **Estudo Termodinâmico e Avaliação Experimental do Protótipo do Sistema de Refrigeração por Absorção com par Água-Brometo de Lítio da Recogás**. João Pessoa, 2012.
6. ECOINVENT (2016). Base de dados, versão 3. Disponível em: < <http://www.ecoinvent.ch> >. Acesso em: 18 set. 2016. [Em inglês]
7. FERREIRA, J. V. R. **Gestão ambiental** – Análise de ciclo de vida dos produtos. Instituto Politécnico de Viseu. 2004
8. GUINÉE, J. B. (ed). *Life Cycle Assessment*: An operational guide to the ISO Standards; LCA in Perspective; Guide; Operational Annex to Guide. Leiden, Holanda: Centre for Environmental Science, Leiden University, 2001.
9. GUINÉE, J.B. *Handbook on life cycle assessment*: operational guide to the ISO standards. Boston, Estados Unidos: Kluwer Academic Publishers, 2002.
10. IPCC - *Intergovernmental Panel On Climate Change* (2013). Revised supplementary methods and good practice guidance arising from the kyoto protocol. Disponível em: < <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/kpsg/> >. Acesso em 18 set. 2016. [Em inglês]
11. PANDEY, D.; AGRAWAL, M.; PANDEY, J. S. **Carbon footprint**: Current methods of estimation. Environmental Monitoring and Assessment, v. 178, n. 1-4, p. 135– 160, 2011. [Em inglês]
12. PRÉ-CONSULTANTS (2014). Website do **SimaPro**. Disponível em: <<http://www.pre-sustainability.com/>>. Acesso em: 18 set. 2016. [Em inglês]
13. ROCHA, M. A. **Estudo Teórico – Experimental de um Sistema de Refrigeração por Absorção de Duplo Efeito em Série Usando O Par Água – Brometo De Lítio**. João Pessoa [sn], 2010
14. SANTOS, P. H. D. **Análise Exergética de Sistemas de Refrigeração por Absorção de Múltiplos Efeitos com o Par Brometo de Lítio – Água**. João Pessoa, 2005.
15. SCHISCHKE. **Guia de Ferramentas de EcoDesign**. Disponível em: [http://www.ecodesignarc.info/servlet/is/524/A%20Guide%20for%20EcoDesign%20Tools%20April05\\_PT\(1\).pdf](http://www.ecodesignarc.info/servlet/is/524/A%20Guide%20for%20EcoDesign%20Tools%20April05_PT(1).pdf)

command=downloadContent&filename=A%20Guide%20for%20EcoDesign%20Tools%20April05\_PT(1).pdf.  
Acesso em: 18 set. 2016