

Eixo Temático ET-06-013 - Energia

PEGADA DE CARBONO ASSOCIADA A PROCESSOS DE SECAGEM: ELETRICIDADE V.S. ENERGIA SOLAR

Ana Livia Formiga Leite^{1,*}, Caio Tácito Miranda Castro Bezerra de Melo¹,
Diogenes Linard Aquino Freitas¹, Monica Carvalho²

¹Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, *Campus I*. Cidade Universitária, João Pessoa-PB (CEP 58051-970). E-mails: eng.analivia@gmail.com, eng.diogeneslinard@gmail.com, caiotcastro@gmail.com. * autora para correspondência

²Departamento de Engenharia de Energias Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, *Campus I*. Cidade Universitária, João Pessoa-PB. (CEP 58051-970). E-mail: monica@cear.ufpb.br

RESUMO

Considerando o princípio da análise, controle e preservação ambiental, diversas ferramentas são necessárias para o estudo de meios de produção e utilização de bens e serviços, de forma a minimizar os impactos gerados por estes no meio ambiente, atualmente já tão degradado. Uma das metodologias que podem ajudar na busca por melhoria contínua dos processos, visando a quantificação, gerenciamento e posterior redução de impactos é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Este artigo aplicou a metodologia de ACV para o cálculo da pegada de carbono associada a dois processos de secagem de frutas, realizados por um secador solar e outro elétrico. Verificou-se qual dos processos apresentou melhor desempenho ambiental e qual foi a principal fonte de emissão de poluentes dos processos. Para tal estudo foi realizado o levantamento de todos os materiais aplicados na confecção de cada secador, bem como as respectivas fontes energéticas utilizadas, consumo de energia e capacidade produtiva. Como método de avaliação de impacto utilizado foi o IPCC 2013 GWP 100 a, de forma que toda esta metodologia foi aplicada no software SimaPro 8.4.0.0 e o impacto ambiental resultante foi expresso em kg CO₂-eq. Assim, considerando operações de 1560 horas/ano e vida útil de 5 anos para o secador solar e 25 anos para o elétrico, foram obtidas pegadas de carbono de 20,6 kg CO₂-eq/ano e 17587,1 kg CO₂-eq/ano, respectivamente, onde tal diferença ocorreu devido à grande demanda energética do secador elétrico. Quando se levou em consideração a capacidade produtiva dos equipamentos foram obtidas pegadas de carbono de 0,132 kg CO₂-eq/kg de produto (secador solar) e 0,704 kg CO₂-eq/kg de produto (secador elétrico). Foi possível perceber que apesar da grande produtividade, a alta demanda energética é a grande causadora do impacto ambiental do secador elétrico.

Palavras-chave: Secador; Elétrico; Solar; Avaliação do Ciclo de Vida; Pegada de Carbono.

INTRODUÇÃO

Com o crescente aumento da degradação ambiental e consequentes problemas oriundos das mudanças climáticas, a utilização de produtos e de processos menos poluentes se torna cada vez mais necessária, sendo atualmente, de fundamental importância a pesquisa e a aplicação de técnicas que ajudem a privilegiar o uso consciente dos recursos energéticos disponíveis.

Os recursos naturais originários dos combustíveis fósseis estão cada vez mais escassos e contribuem significativamente para o aumento da poluição ambiental (SILVESTRE et al., 2015). Ademais, estes combustíveis são uma fonte de energia não renovável, de modo que devido ao expressivo aumento da demanda energética mundial, esses recursos estão se esgotando.

Estima-se que, comparando os anos de 1980 e 2009, houve um crescimento de 78% no consumo mundial de energia, sendo a variação média desse consumo de 1,96% ao ano, enquanto que a oferta mundial aumentou apenas 1,83% ao ano. Esse comportamento se deve a

muitos fatores, dentre os quais o crescimento da população, o desenvolvimento econômico e o tecnológico (SCHUTZ et al. 2013).

Contudo, a utilização de energias renováveis ganha cada vez mais prestígio no mundo pós-moderno, em função do surgimento de políticas de substituição das fontes energéticas de origem fóssil por fontes renováveis, principalmente energias solar e eólica.

Tendo isso em vista, os impactos ambientais oriundos das diversas fontes de poluição indicam a necessidade de ações estruturais de prevenção, controle e preservação ambiental. Uma das metodologias que as empresas podem utilizar na busca por melhoria contínua dos seus processos, visando a quantificação, gerenciamento e posterior redução de impactos é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), definida como metodologia que avalia e quantifica os impactos potenciais associados ao ciclo de vida de um produto, processo ou serviço (GUINÉE et al., 2011).

Assim, com o objetivo de fomentar o desenvolvimento sustentável e o consumo consciente dos recursos naturais, a ACV constitui-se como uma ferramenta de gestão ambiental que permite a avaliação dos aspectos ambientais e respectivos potenciais impactos envolvidos na concepção de um produto ou processo de maneira qualitativa e quantitativa, analisando diversas etapas que vão desde a extração de matérias-primas até o fim da vida útil do produto (ou alguma etapa intermediária, caso seja de interesse na análise). A ACV se baseia na utilização de métodos de estudo de impacto dos produtos e/ou processos com o intuito de quantificar as cargas produzidas, preenchendo os requisitos necessários como ferramenta de apoio para desenvolvimento de produtos menos impactantes e mais sustentáveis.

O setor da fruticultura é de fundamental importância no cenário econômico brasileiro (FACHINELLO et al., 2011; JUNQUEIRA, 2009; CNEA, 2016; SPOSITO, 2017). Analisando mais detalhadamente este setor, observa-se um alto grau de perecimento das frutas, fator que causa prejuízos econômicos aos fruticultores (FAYOSE; HUAN, 2015). A partir disso, com o intuito de reverter essa situação de desperdício, a utilização de processos de secagem se faz cada vez mais presente, onde a partir da remoção de parte da água dos frutos, garante-se o aumento do tempo de prateleira destes, garantindo o seu consumo por um prazo mais prolongado e agregando valor aos mesmos (MUJUNDAR, 2014; ALVES-FILHO, 2015; DINCER; ZAMFIRESCU, 2015; FORTES, 2017; GRILO, 2017). O secador é um equipamento usado na redução da umidade dos produtos pela ação do calor, propiciando, com isso, a conservação e manutenção da qualidade e das propriedades dos produtos por mais tempo (FORTES, 2017; GRILO, 2017). Existem vários tipos e modelos disponíveis, sendo alimentados pelas mais diversas fontes de energia, porém, esses equipamentos apresentam, em geral, custo elevado, incompatível com o poder aquisitivo do pequeno produtor rural.

A pegada de carbono é um indicador obtido através da ACV, que quantifica as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e é uma das várias formas de se medir impactos, obtendo grande visibilidade na comunidade acadêmica após o vislumbre de seus resultados (RÖÖS et al., 2013; DELGADO; CARVALHO, 2016; ANTOLÍNEZ; AMAYA, 2016; VASCONCELLOS; BELTRÃO; PONTES, 2016). Assim, o objetivo deste trabalho é quantificar a pegada de carbono de um processo de secagem de frutas que funciona com a utilização de energia solar e de um que funciona com energia elétrica.

OBJETIVO

Aplicar a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) para o cálculo da pegada de carbono associada a dois processos de secagem: secador solar vs. secador elétrico. Pretende-se comparar as pegadas de carbono obtidas, verificando qual dos processos possui desempenho ambiental mais satisfatório e identificar qual é a principal fonte de emissão de poluentes.

MATERIAIS E MÉTODOS

A secagem é um método para conservar alimentos e consiste na remoção, voluntária ou não, total ou parcial, de uma fase líquida ou gasosa de qualquer material, através da transferência de calor e massa (MELO, 2016). Seu principal objetivo é a redução da umidade

dos produtos, que é realizada por meio de um secador. Ainda segundo Melo (2016), as frutas desidratadas são destaques entre os produtos processados visto que mantém as características do produto natural, possuem custo de transporte reduzido e estão menos suscetíveis à proliferação dos microrganismos.

Os dois secadores objeto de estudo utilizam diferentes fonte energética: um secador utiliza energia elétrica e o outro, energia solar. Ambos foram construídos e postos em operação comprovando sua viabilidade operacional para o fim a que se destinam. O secador elétrico é classificado como secador contínuo de fluxo cruzado, enquanto que o secador solar é classificado como secador intermitente (ou de batelada) de fluxo cruzado.

Considerou-se que os secadores funcionarão durante 1560 horas anuais. Após o fim de sua vida útil, cada secador foi desmontado e os materiais recicláveis foram encaminhados para reciclagem, e os materiais remanescentes foram encaminhados ao aterro sanitário.

Secador elétrico

O secador elétrico possui grandes dimensões (2,50 m x 1,20 m x 2,10 m) se comparado ao secador solar, sendo confeccionado utilizando-se predominantemente estruturas metálicas de perfil “U” e chapas metálicas. Este secador possui sistema composto por 6 esteiras (Figura 1) para transporte dos frutos por 3 módulos de secagem.



Figura 1. Esteira do secador elétrico. Fonte: Brasileiro (2017).

A transmissão de movimento às esteiras é realizada por meio de correntes e catracas, alimentadas por um motor elétrico de 0,5 CV de 1700 RPM (Figura 2a). Cada módulo de secagem possui resistências elétricas 14kW (duas) e 9 kW, responsáveis pelo aquecimento do ar de secagem proveniente de secadores axiais de 1/5 HP (dois) e 1/6 HP, encarregados de fornecer fluxo de ar ao sistema (Figura 2b).



Figura 2. Estrutura, motor e ventiladores do secador elétrico. Fonte: Brasileiro (2017).

A Tabela 1 mostra a composição material do secador elétrico, elaborada a partir dos dados do fabricante.

Tabela 1. Composição material do secador elétrico.

Secador elétrico		Massa (kg)
Estrutura do Secador	Liga de Alumínio	11,766
	Aço de Baixa Liga	24,459
	Lã de Vidro	53,000
	Aço Inoxidável	191,700
	Vidro	6,840
	Aço comum	531,290
Motor Elétrico	Ferro Fundido	15,300
	Cobre	2,700
Ventiladores	Aço de Baixa Liga	6,360
	Polietileno de Alta Densidade	0,800
	Cobre	10,740

Fonte: Elaborado pelos autores.

Este secador consome eletricidade da rede elétrica, e a matriz de geração considerada para o ano de 2015 (dados mais recentes disponíveis) seguiu a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (BRASIL, 2016). O mix elétrico brasileiro utilizado nas análises está composto de 61,30% hidroelétrica, 16,92% termelétrica, 7,49% biomassa (lenha e bagaço de cana de açúcar), 5,64% eólica, 1,32% nuclear, 0,02% solar, e 5,80% recuperações, gás de

coqueria e outros combustíveis secundários. Já estão incluídas as importações da Argentina, Paraguai, Uruguai e Venezuela.

Secador solar

O secador solar foi confeccionado predominantemente em MDF (*Medium Density Fiberboard*) sendo dividido em coletor solar e câmara de secagem. O coletor solar (responsável pelo aquecimento do ar de secagem) possui cobertura de polietileno alveolar e no seu interior um capacitor térmico de fibrocimento. Na bandeja de nylon existente na câmara de secagem são depositados os frutos a serem secos. Além disso, no topo da câmara existe um sistema de convecção forçada no ar, composto por um cooler de computador alimentado por um mini painel fotovoltaico de 6W e 12V. Tal secador fica apoiado sobre um suporte de metal produzido com cantoneiras metálicas de perfis em “L” de forma a posicionar o secador na orientação de melhor aproveitamento da radiação solar. Na Figura 3 mostra o secador solar em estudo visto em perspectiva (a) e na vista superior (b).



Figura 3. (a) Secador solar em perspectiva e (b) vista superior. Fonte: Melo (2016).

A Tabela 2 mostra a massa dos materiais que compõem o secador solar.

Tabela 2. Composição material do secador solar.

Secador solar		Massa (kg)
Câmara de Secagem	Tela de Nylon	0,103
	MDF	9,096
Coletor Solar	MDF	19,961
	Policarbonato	5,040
	Fibrocimento	8,156
Sistema de Circulação de Ar	Placa Fotovoltaica (0,0875 m ²)	0,200
	Cooler Axial	0,050
	Polietileno de Alta Densidade	0,130
Suporte do Secador	Aço de Baixa Liga	31,040

Fonte: Melo, 2016.

Avaliação do Ciclo de Vida

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é um procedimento metodológico iterativo que permite um tratamento de todos os aspectos gerais e específicos das partes envolvidas no estudo (GUINÉE, 2001; GUINÉE, 2002). Devido à complexidade do estudo da ACV, existe regulamentação internacional por meio da *International Organization for Standardization*, em suas normas ISO 14040 (2006) e 14044 (2006), e no Brasil, estas normas foram traduzidas pela

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em NBR ISO 14040 e 14044 (ABNT, 2014a; ABNT, 2014b).

O processo da ACV é estruturado em quatro fases distintas: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto, e interpretação (Tabela 3).

Tabela 3. Fases da Avaliação de Ciclo de Vida.

Fase	Descrição
Definição de Objetivo e Escopo	Escolha da unidade funcional (produto, processo ou atividade), com descrição das fronteiras do sistema e o nível de detalhamento e o objetivo a ser estudado.
Análise de Inventário	Identifica e quantifica as intervenções associadas a cada processo; envolve a coleta de dados de entradas e saída relevantes da unidade funcional, e seus respectivos procedimentos de cálculo.
Avaliação de Impactos	Associa dados de inventário com categorias de impactos específicas e indicadores; classificação (correlação dos resultados) e caracterização (cálculo de resultados de indicadores de categoria), que fornecem informações para a fase de interpretação do ciclo de vida; Outros elementos opcionais são a: normalização, agrupamento e ponderação.
Interpretação dos resultados	Os resultados da análise de inventário e análise de impacto são considerados em conjunto e geram conclusões e recomendações; permite revisar o escopo da ACV, assim como a natureza e qualidade dos dados coletados.

Fonte: Adaptado da ABNT (2014b).

O método selecionado para avaliar o impacto ambiental foi o IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) 2013 GWP (*Global Warming Potential*) 100 a. Esta metodologia quantifica as emissões de gases de efeito estufa (GEE) resultantes dos produtos e dos processos incluídos no inventário. O GWP é um índice empregado para definir a contribuição relativa do aquecimento global ocasionado pelas emissões atmosféricas de um kg de GEE comparando-o com a emissão de um kg de dióxido de carbono. São definidos três horizontes temporais para analisar o impacto sob a atmosfera IPCC GWP 20 anos; IPCC GWP 100 anos e IPCC GWP 500 anos (FERREIRA, 2014). Neste trabalho, considerou-se o GWP 100 a. O impacto ambiental resultante dessa análise é expresso em kg CO₂-eq. Esta metodologia será aplicada no software SimaPro 8.4.0.0 (PRÉ CONSULTANTS, 2015).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estabelecidos os fluxos materiais e energéticos associados a cada secador, a Tabela 4 mostra os resultados da pegada de carbono para o secador solar, conforme informado pelo software SimaPro.

De acordo com a Figura 4, onde pode ser observada a contribuição percentual de cada material para a fabricação do secador solar, os materiais com contribuições mais significativas são o aço de baixa liga, policarbonato, MDF, a placa fotovoltaica e o fibrocimento. Com estes dados, verifica-se que a maior valor da pegada de carbono do secador solar é o seu suporte de aço de baixa liga.

No entanto, considerando o tratamento do resíduo, há uma redução considerável nesse valor. Nota-se, então, que o policarbonato que possui a maior contribuição para a pegada de carbono. Ressalta-se ainda que a massa do aço de baixa liga é cerca de seis vezes maior do que a do policarbonato.

Tabela 4. Pegada de carbono para o secador solar.

Fabricação		
Componente		kg CO ₂ -eq
Câmara de Secagem	Tela de Nylon	0,952
	Fabricação da tela de Nylon	0,055
	MDF	
		29,300
Coletor Solar	MDF	
	Policarbonato	41,100
	Fibrocimento	10,900
Sistema de circulação de ar	Placa fotovoltaica	15,300
	Cooler	0,697
	Polietileno de alta densidade	0,261
	Extrusão de tubos de plástico	0,061
Suporte do secador	Estrutura de aço de baixa liga	60,800
Descarte		
Tratamento do resíduo de polietileno		-8,010
Lixo municipal		5,110
Tratamento dos resíduos de plásticos		-0,518
Descarte de eletro-eletrônicos		0,007
Tratamento de resíduos de aço e ferro		-53,000
Descarte da madeira		0,396
Total		103,000

Fonte: Elaborado pelos autores a partir dos resultados do software SimaPro.

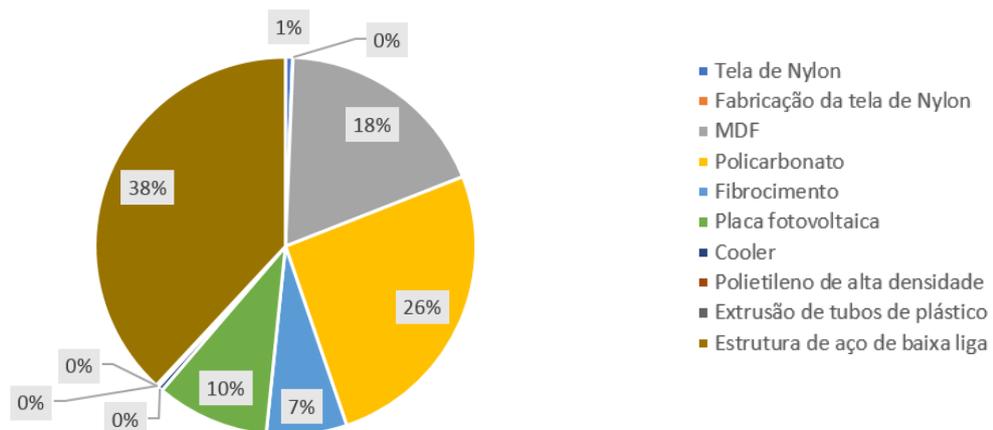


Figura 4. Percentual dos materiais na pegada de carbono na etapa de fabricação do secador solar.

A Tabela 5 mostra a pegada de carbono para o secador elétrico. Considerando-se que o mix elétrico de 2015 possui pegada de carbono 0,299 kg CO₂-eq/kWh (DELGADO; CARVALHO, 2016) e que este secador requer o consumo de 58676,28 kWh, a pegada de carbono associada à sua operação é de 17544,200 kg CO₂-eq/ano. A pegada de carbono total associada a este secador é calculada somando-se a etapa de fabricação, dividida por sua vida útil (25 anos), e sua etapa operacional, totalizando 17.587,103 kg CO₂-eq/ano.

Na Figura 5, observa-se que os metais são os materiais responsáveis por grande parte das emissões de CO₂-eq quando analisado apenas a fabricação do equipamento. Porém, este valor é pouco expressivo quando comparado à pegada de carbono gerada pela demanda de energia elétrica do dispositivo. De maneira oposta ao secador solar, a pegada de carbono relacionada à operação sistema possui uma contribuição considerável.

Tabela 5. Resultados da pegada de carbono por componentes do secador elétrico.

Fabricação		
	Componente	kg CO ₂ -eq
Motor elétrico	Ferro fundido	27,500
	Cobre	
		68,600
Ventilador	Cobre	
	Aço de baixa liga	12,500
	Polietileno de alta densidade	1,600
	Moldagem por injeção	1,230
		11,100
Sistema de circulação de ar	Placa fotovoltaica	15,300
	Cooler	0,697
	Polietileno de alta densidade	0,261
	Extrusão de tubos de plástico	0,061
Estrutura do secador	Liga de alumínio	100,000
	Laminação do alumínio	8,400
	Aço	1010,000
	Laminação do aço	206,000
	Lã de vidro	147,000
	Aço inoxidável	938,000
	Aço de baixa liga	41,300
	Extrusão do aço	26,000
		7,960
Descarte		
Tratamento de resíduos plásticos		-1,460
Tratamento da sucata de cobre		7,750
Tratamento de resíduos de aço e de ferro		-1310,000
Tratamento de resíduos de alumínio		-222,000
Tratamento dos resíduos de vidro		-8,900
Total		1.072,580

Fonte: Elaborado pelos autores a partir dos resultados do software



Figura 5. Percentual dos materiais na pegada de carbono da etapa de fabricação do secador elétrico.

Verifica-se, ainda, que a maior contribuição da pegada de carbono relacionada à fabricação do secador elétrico é do aço com 40%, seguido do aço inoxidável com 37%, seguido do processo de laminação do aço com 8%, da lã de vidro com 6% e do alumínio com 4%. Sabe-se que o material com maior quantidade em massa é o aço e que, devido a isso é o material com maior pegada de carbono. No entanto, é válido ressaltar que o secador possui uma quantidade bem menor de aço inoxidável, e este material também apresenta uma pegada de carbono de alto valor, de modo que este representa um grande impacto ambiental.

Porém a comparação absoluta dos secadores deve ser interpretada com cautela, pois suas capacidades produtivas são bastante diferentes, e é mais indicado considerar as produtividades de cada equipamento no cálculo da pegada de carbono, como feito em Abrahão, Carvalho e Causapé (2016) e Neves et al. (2018). A Tabela 6 mostra as produtividades de cada secador, de acordo com dados do fabricante e Melo (2016).

Tabela 6. Produtividade anual dos secadores em estudo.

Secador	Produtividade Anual
Elétrico	24.960 kg de produto
Solar	156 kg de produto

Portanto, ao dividir-se as pegadas de carbono anuais pela produtividade anual de cada secador, obtém-se 0,704 kg CO₂-eq/kg produto para o secador elétrico e 0,132 kg CO₂-eq/kg produto para o secador solar. Observa-se que mesmo com a produção do secador elétrico bastante superior à do secador solar, ainda assim, o impacto ambiental do secador elétrico é maior.

Mudança no descarte final

Considerando-se somente a pegada de carbono associada à construção dos equipamentos, e ao final de suas vidas úteis levando os equipamentos para aterros sanitários (sem reciclagem ou reutilização), há um acréscimo de 44,3 kg CO₂-eq na pegada de carbono do secador solar. Como não há descontos decorrente dos tratamentos, soma-se a pegada de carbono da fabricação do secador (159,0 kg CO₂-eq) a do descarte, obtendo-se assim um total de 204,0 kg CO₂-eq. Comparando este valor com o obtido pela Tabela 4 (103,0 kg CO₂-eq), observa-se que o valor da pegada de carbono sem tratamento de resíduos aumenta em 98%.

Analogamente, para o secador elétrico, ao considerar sua disposição em aterro sanitário, é adicionado um valor de 536,0 kg CO₂-eq na pegada de carbono do equipamento. Considerando a pegada de carbono associada à fabricação e ao descarte sem reciclagem ou reutilização, tem-se um valor de 3138,50 kg CO₂-eq. Comparando esse valor com o da Tabela 5 (1072,58 kg CO₂-eq), percebe-se que é um valor quase três vezes maior. As mudanças no descarte final dos equipamentos resultam em emissões anuais de 17669,74 kg CO₂-eq/ano para o secador elétrico e 40,800 kg CO₂-eq/ano para o secador solar.

Levando-se em conta suas produtividades, as emissões são de 0,707 kg CO₂-eq/kg produto para o secador elétrico e 0,261 kg CO₂-eq/kg produto para o secador solar. Nota-se que o aumento para o secador elétrico é maior. Isso ocorre porque para o secador elétrico, a parcela mais considerável é a correspondente à sua operação.

Publicações científicas sobre a aplicação da metodologia da ACV em sistemas de secagem são escassas, e o estudo de Notarnicola et al. (2017) mencionam que ao longo dos anos, ACV tem sido muito utilizada para avaliar sistemas agrícolas e de processamento de comida, comparando várias alternativas “campo ao garfo”. Sala et al. (2017) indicam que a ACV pode e deve ser aplicada para verificar os potenciais impactos ambientais associados a cadeia alimentar humana. Sala et al. (2017) mencionam ainda que uma melhor compreensão sobre as escolhas que o consumidor pode fazer e seu comportamento levam a consideração de vários aspectos diferentes que podem influenciar na compra de um tipo de comida, a potencial mudança para uma dieta menos poluente, na maneira na qual a comida é consumida, e até a quantidade de resíduos gerados na produção de um determinado tipo de alimento.

Roy et al. (2009) estudaram a ACV de vários produtos alimentícios, concluindo que é uma metodologia adequada para a contabilização de impactos ambientais, e que pode fornecer informação aos produtores para melhora dos processos produtivos. O trabalho de Oirshot et al (2017) demonstrou que, no processo produtivo de algas desidratadas, os impactos mais importantes estavam associados ao processo de secagem, e ao processo produtivo do aço inoxidável, destacando a necessidade de cautela quando se projetam sistemas de secagem de alimentos. O estudo de DeMarco et al. (2015) comparou dois métodos de secagem para a produção de pó de maçã, verificando que tanto o secador de tambor quanto o método de etapas múltiplas possuíam potencial para redução de seus impactos.

Os resultados obtidos neste trabalho foram esperados, na primeira parte, onde o secador elétrico, de tamanho e capacidades superiores, apresentou pegada de carbono mais alta. O secador solar, por suas dimensões mais reduzidas, obviamente apresentou pegada de carbono mais baixa. Porém, ao limitar o funcionamento do secador elétrico às horas de sol, para comparação com o secador solar, limitou-se também a sua produção e isso não foi suficiente para que a pegada de carbono por produção (kg CO₂-eq/kg produto) se tornasse competitiva. Caso se considerasse produção do secador elétrico ao longo de 8760 horas anuais, sua pegada de carbono seria 0,125 kg CO₂-eq/kg produto. A consideração de uma unidade funcional diferente, que compreende o máximo de sua capacidade produtiva, forneceu um resultado de pegada de carbono mais baixa que o secador solar, que possui sua produção limitada pelas horas diárias de sol. Ressalta-se a importância da etapa de interpretação de resultados nas análises ambientais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização da metodologia da Avaliação de Ciclo de Vida considera tanto a matéria prima da confecção dos equipamentos, como as demandas de operação dos mesmos, sendo expresso em unidade de fácil entendimento, sendo possível se obter várias formas de equivalência entre produtos e/ou processos. Com isso, é possível analisar não só o potencial impacto das fontes de energia da operação, mas também a parcela de impacto ambiental associada à confecção de determinado produto, auxiliando assim na consolidação do conceito de sustentabilidade produtiva.

Este trabalho alcançou os objetivos com êxito, sendo possível analisar a equivalência entre a pegada de carbono entre o secador solar e elétrico, levando em consideração a

confeção, a operação dos dois equipamentos para 1560 horas anuais e o descarte dos mesmos com reciclagem/reutilização, e apenas em aterro sanitário.

Conforme esperado, o secador solar apresentou menor impacto ambiental que o secador elétrico, tendo em vista que este secador possui menores dimensões e materiais menos impactantes que o elétrico, o qual é de grandes proporções e construído em sua maior parte de metais. Quanto à operação, o secador solar não possui impacto ambiental, já o elétrico possui elevada demanda energética. Ao se limitar a operação do secador elétrico para comparação com o solar (em 1560 horas anuais), impediu-se o aumento de sua produção, que no final tornaria o secador mais competitivo, desde um ponto de vista ambiental.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de produtividade nº303199/2015-6 e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas de mestrado e doutorado.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14040 - Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009 - versão corrigida. 2014a.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14044 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009 - versão corrigida. 2014b.
- ABRAHÃO, R.; CARVALHO, M.; CAUSAPÉ, J. Carbon and water footprints of irrigated corn and non-irrigated wheat in Northeast Spain. **Environmental Science and Pollution Research International**, v. 23, p. 1-7, 2016.
- ALVES-FILHO, O. **Heat pump dryers: Theory, design and industrial applications**. Boca Raton: CRC Press, 2015.
- ANTOLÍNEZ, G. L.; AMAYA, L.M.V. Cómo reducir nuestra huella de carbono. Una experiencia de investigación e innovación en ciencias. **Indagatio Didactica**, v. 8, n. 1, 2016.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Disponível em <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 03 abr. 2016.
- CNEA. Fruticultura. 2016. Disponível em: <http://www.cnabrazil.org.br/sites/default/files/sites/default/files/uploads/10_fruticultura.pdf>. Acesso em: 06 nov 2017.
- DELGADO, D. B. M.; CARVALHO, M. Potencial da energia solar fotovoltaica em geração distribuída para manutenção da pegada de carbono do Mix Elétrico Brasileiro. Anais do Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade – Congestas, v. 4, João Pessoa, 2016.
- DE MARCO, I.; MIRANDA, S.; RIEMMA, S.; IANNONE, R. Environmental assessment of drying methods for the production of apple powders. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 20, n. 12, p. 1659-1672, 2015.
- DINCER, I.; ZAMFIRESCU, C. Drying phenomena theory and applications. John Hoboken, New Jersey: Wiley and Sons, 2015.
- ISO 14040. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. International Organization for Standardization (ISO), Genebra, 2006.
- ISO 14044. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. International Organization for Standardization (ISO), Genebra, 2006.
- FACHINELLO, J. C.; PASA, M. S.; SCHMITZ, J. D.; BETEMPS, D. L. Situação e perspectivas da fruticultura de clima temperado no Brasil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 33, n. 1, p. 109-120, 2011.
- FAYOSE F.; HUAN, Z. Heat pump drying of fruits and vegetables: Principles and potentials for Sub-Saharan Africa. **International Journal of Food Science**, v. 2016, Article ID 9673029, 2016.

FERREIRA, H. **Aplicação da metodologia de avaliação de ciclo de vida na produção de polpa de concentrado de minério de ferro**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade Socioeconômica Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto: UFPB, 2017.

FORTES, A.F.C. **Análise termoeconômica e ambiental de um secador por bomba de calor**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa: UFOP, 2014.

GRILO, M. M. S. **Análises termodinâmica, ambiental e econômica de uma bomba de calor para secagem de alimentos**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis da Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa: UFPB, 2017.

GUINÉE, J. B. (Ed). **Life cycle assessment: An operational guide to the ISO Standards; LCA in perspective; guide; operational annex to guide**. Centre for Environmental Science, Leiden University, The Netherlands, 2001.

GUINÉE, J. B. **Handbook on life cycle assessment: Operational guide to the ISO standards**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.

GUINÉE, J. B.; REINOUT, H.; GJALT, H.; ZAMAGNI, A.; MASONI, P.; BUONAMICI, R.; EKVALL, T.; RYDBERG, T. Life cycle assessment: Past, present and future. **Environmental Science & Technology**, v.45, n. 1, p. 90-96, 2011.

JUNQUEIRA, N. T. V. A importância da fruticultura no agronegócio brasileiro. 2009. Embrapa cerrados. Disponível em: <<http://www.cpac.embrapa.br/publico/usuarios/uploads/fruticulturatangara/palestrat1.pdf>> Acesso em: 06 nov. 2017.

MELO, C.T.M.C.B. **Desenvolvimento e estudo experimental de um secador solar aplicado na secagem de banana**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande: UFCG, 2016.

MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying**. 4 ed. Boca Raton: CRC press, 2014.

NEVES, T. I.; UYEDA, C. A.; CARVALHO, M.; ABRAHAO, R. Environmental evaluation of the life cycle of elephant grass fertilization - *Cenchrus purpureus* (Schumach.) Morrone - using chemical fertilization and biosolids. **Environmental monitoring and assessment**, 2018.

NOTARNICOLA, B.; SALA, S.; ANTON, A.; MCLAREN, S.J.; SAOUTER, E.; SONESSON, U. The role of life cycle assessment in supporting sustainable agri-food systems: A review of the challenges. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 399-409, 2017.

OIRSCHOT, V. R.; THOMAS, J.B.E.; GRÖNDAHL, F.; FORTUIN, K.P.J.; BRANDENBURG, W.; POTTING, J. Explorative environmental life cycle assessment for system design of seaweed cultivation and drying. **Algal Research**, v. 27, p. 43-54, 2017.

RÖÖS, E.; SUNDBERG, C.; TIDÅKER, P.; STRID, I.; HANSSON, P. A. Can carbon footprint serve as an indicator of the environmental impact of meat production? **Ecological Indicators**, v. 24, p. 573-581, 2013.

ROY, P.; NEI, D.; ORIKASA, T.; XU, Q.; OKADOME, H.; NAKAMURA, N.; SHIINA, T. A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. **Journal of Food Engineering**, v. 90, n. 1, p. 1-10, 2009.

SALA, S.; ANTON, A.; MCLAREN, S.J.; NOTARNICOLA, B.; SAOUTER, E.; SONESSON, U. In quest of reducing the environmental impacts of food production and consumption. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 387-398, 2017.

SCHUTZ, F.; MASSUQUETTI, A.; ALVES, T. W. Demanda e oferta energética: uma perspectiva mundial e nacional para o etanol. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental - REGET**, v.16, n. 16, p. 3167-3186, 2013.

SILVESTRE, A. D.; MACIEL, F.; CARVALHO, M. Comparative Life Cycle Analysis of the utilization of Diesel and biomass for the production of electricity. Anais do XXIII International Congress of Mechanical Engineering - COBEM, Rio de Janeiro, 2015.

SPOSITO, M. B. Panorama da fruticultura no Brasil. 2017. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3277102/mod_resource/content/1/Panorama%20da%20Fruticultura%20Brasileira.pdf>. Acesso em: 06 nov. 2017.

VASCONCELLOS, R. C.; BELTRÃO, N.E.S.; PONTES, A.N. Estimativa da pegada de carbono no setor de soja no Município de Paragominas, Pará. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 7, n. 1, p. 142-149, 2016.