

PEGADA DE CARBONO DA PRODUÇÃO DE PÃO FRANCÊS EM PADARIA NO NORDESTE BRASILEIRO

Thiago Freire Melquíades¹

Luiz Moreira Coelho Junior²

Monica Carvalho³

RESUMO: A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma importante metodologia para avaliar os aspectos e os impactos ambientais de um produto, bem ou serviço. A ACV é uma ferramenta analítica de gestão ambiental que pode analisar a aquisição de matéria-prima, fabricação, utilização, manutenção e até seu destino final. Este estudo quantificou os impactos ambientais associados à produção do pão francês em uma panificadora no Nordeste brasileiro. Os métodos de avaliação de impacto ambiental empregados na ACV foram IPCC 2013 GWP 100a (*midpoint*, que expressa os impactos ambientais em kg CO₂-eq) e o ReCiPe (*endpoint*, que agrupa impactos na saúde humana, danos ao ecossistema e uso de recursos energéticos). Constatou-se que a fonte energética com maior impacto ambiental foi o gás natural, para ambos os métodos aplicados, chegando a contribuir com mais de 23% para o impacto final. Como o gás natural participou do mix energético da panificadora em maior porcentagem, também foi responsável pela maior parcela de custos. O briquete de bagaço de cana-de-açúcar apresentou baixos níveis de impactos ambientais e preço reduzido, mas a substituição do gás natural pelo briquete não é direta e deve considerar seu poder calorífico, bem mais baixo.

PALAVRAS-CHAVE: Avaliação do ciclo de vida; Impactos ambientais; Indústria de alimentos.

CARBON FOOTPRINT IN THE PRODUCTION OF FRENCH BREAD IN A BAKERY IN NORTHEAST BRAZIL

ABSTRACT: Life Cycle Assessment (LCA) is an important methodology for assessing the environmental aspects and impacts of a product, good or service. LCA is an

* Administrador, Mestre em Energias Renováveis pelo Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis na Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa (PB), Brasil.

** Economista, Dr. Prof. do Departamento de Engenharia de Energias Renováveis (DEER), Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa (PB), Brasil.

*** Eng. Eletricista, Ph.D., Profª. do Departamento de Engenharia de Energias Renováveis (DEER), Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa (PB), Brasil. E-mail: monica@cear.ufpb.br

analytical environmental management tool that can analyze the acquisition of raw materials, manufacture, use, maintenance and even its final destination. This study quantified the environmental impacts associated with the production of French bread in a bakery in northeastern Brazil. The environmental impact assessment methods employed in the LCA were IPCC 2013 GWP 100a (midpoint, which expresses environmental impacts in kg CO₂-eq) and ReCiPe (endpoint, which groups impacts on human health, damage to ecosystems and use of energy resources). It was verified that the energy source with the greatest environmental impact was natural gas, for both methods evaluated, reaching a participation of more than 23% in the environmental impacts generated. Because natural gas is a major contributor to the energy mix of the bakery, the costs associated with its consumption were higher. Sugarcane bagasse briquettes presented lower levels of environmental impacts and reduced price, but the substitution of natural gas by briquettes is not direct and should consider its significantly lower heating value.

KEY WORDS: Life cycle assessment; Environmental impacts; Food industry.

INTRODUÇÃO

O uso de recursos naturais está diretamente ligado ao desenvolvimento econômico. A explosão do crescimento populacional atrelado ao crescimento da economia resultou numa diminuição da disponibilidade de recursos naturais. Este cenário vem recebendo influência de uma crescente sensibilização da população ao longo do tempo (CARVALHO; SERRA; LOZANO, 2012). Com a evolução da conscientização ambiental, surgiram novos parâmetros de produção, em termos de qualidade dos produtos e processos, com necessidade de adaptação das empresas em obter práticas sustentáveis, aprimorando os bens e serviços à nova realidade do mercado global (BARROS; AMIN, 2006; FREIRE *et al.*, 2016).

Carvalho *et al.* (2016) afirmam que o mercado está cada vez mais competitivo e com possibilidades de ampliação da produção, e as empresas têm procurado gerenciar seus recursos de forma mais eficiente e pautadas na sustentabilidade. São necessárias estratégias ambientais pra melhorar o nível de produção, lucratividade e crescimento com responsabilidade socioambiental, e a gestão responsável dos recursos naturais visa ganhar competitividade em curto ou médio prazo. É clara a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e desenvolver

matrizes energéticas baseadas em fontes renováveis (reduzindo a dependência de combustíveis fósseis) (SILVA *et al.*, 2018).

A gestão sustentável deve estender-se também ao setor de panificação, em virtude da sua relevância na indústria de transformação brasileira. Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Panificação e Confeitaria (ABIP, 2018a), em 2018 havia 70.523 estabelecimentos no Brasil, sendo o mais representativo da indústria alimentícia (ABIP, 2018b), representando em torno de 800 mil empregos diretos e 1,8 milhão de forma indireta (Programa de Desenvolvimento da Alimentação, Confeitaria e Panificação - PROPAN, 2019). No Estado da Paraíba, a fabricação de produtos alimentícios foi a mais relevante indústria de transformação em 2018, contando com 1.372 empresas (ABIP, 2018a).

O setor de panificação está entre os maiores consumidores de energia elétrica, pois houve incentivo de trocas dos maquinários subsidiados pelas companhias energéticas, onde boa parte da produção já empregava fornos elétricos em 2008 (Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas - SEBRAE, 2008) e essa tendência continua (BARBOSA; ODAKURA, 2012; RAMOS; ANDRADE, 2017). O estudo de Hartono e Christiani (2018) também verificou que o consumo de eletricidade era o fator que mais contribuía às emissões de GEE. Algumas panificadoras utilizam o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) como alternativa de redução do consumo de energia elétrica na produção.

No entanto, pouco se conhece do processo produtivo de pão atrelado à gestão ambiental. Mas o cenário vem mudando, especialmente para os empreendimentos que desejam atuar no mercado externo (CARVALHO *et al.*, 2016). Um instrumento para avaliar os aspectos e os impactos ambientais de um produto, bem ou serviço é a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). A ACV consiste em uma ferramenta analítica de gestão ambiental que verifica desde a aquisição de matéria-prima até o destino final (FINNVEDEN *et al.*, 2009; CURRAN, 2012; HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2018). Esta metodologia possui inúmeras aplicações, como desenvolvimento de produtos, passando pela rotulagem ecológica e regulação, até à definição de cenários de prioridade e de política ambiental. A ACV trabalha em várias categorias de impactos ambientais, sejam elas sobre a saúde humana, recursos naturais e/ou consequências ecológicas (ARAÚJO *et al.*, 2018; CARVALHO *et al.*, 2019; COELHO

JUNIOR; MARTINS; CARVALHO, 2018). A ACV vem sendo bastante aplicada na busca por alternativas para um melhor desempenho ambiental e auxiliar na tomada de decisões para escolha de produtos e processos, resultando em um menor impacto ambiental (ABRAHAO; CARVALHO, 2017; GRILO *et al.*, 2018; MELO; SILVESTRE; CARVALHO, 2019; MELQUIADES *et al.*, 2019).

O objetivo deste estudo foi quantificar os impactos ambientais associados à produção do pão francês em uma panificadora no Nordeste brasileiro, aplicando a metodologia do ACV e dois métodos diferentes de avaliação de impacto ambiental.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 OBJETO DE ESTUDO

O estudo foi conduzido em uma empresa de panificação localizada no município de João Pessoa, no Estado da Paraíba, na região Nordeste do Brasil. A empresa foi criada em 1985, sendo classificada como uma microempresa. O complexo possui cinco fornos: dois elétricos e dois a gás natural, e um forno que pode ser alimentado tanto com briquetes como por lenha.

As informações relativas aos recursos, materiais e energia consumidos foram obtidas a partir de visitas à empresa, que tiveram como finalidade a observação do modelo organizacional e as etapas de produção. As informações foram obtidas por meio de entrevista com os diretores da empresa, no mês de abril de 2015, referente ao período de fevereiro de 2014 a janeiro de 2015. Os valores dos custos foram corrigidos pelo IPCA para agosto de 2019.

Para elaboração e levantamento das informações referentes ao processo produtivo do pão francês, tomou-se como base o processo de fabricação indicado pela empresa, onde as matérias-primas utilizadas são a farinha de trigo, água potável, sal refinado iodado, gordura vegetal (opcional), melhorador unificado em pó, açúcar cristal e fermento biológico instantâneo. O processo de preparo na panificadora conta com as seguintes etapas: amassamento, divisão da massa, modelagem e descanso, fermentação, corte de pestana na massa, e, por fim, o processo de forneamento.

2.2 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

A necessidade de considerar os impactos ambientais na hora de projetar um sistema energético vem ganhando espaço, devido principalmente a um processo de conscientização global e demandas sociais cada vez mais fortes para a redução dos impactos ambientais associados à vida moderna (CARVALHO; SERRA; LOZANO, 2011). A Avaliação de Ciclo de Vida é uma metodologia que proporciona uma perspectiva global das cargas ambientais e possui o potencial para se tornar um critério de projeto adequado (GUINÉE, 2002) e satisfazer essas expectativas da sociedade civil, dos consumidores e dos governos.

A ACV é uma metodologia objetiva, que avalia os impactos ambientais associados a um produto, processo ou atividade, identificando e quantificando o uso de massa e energia, assim como as emissões ao meio ambiente. A ACV também determina o impacto oriundo da utilização destes recursos e emissões, pela avaliação e desenvolvimento de estratégias para melhorias ambientais. A ACV ajuda a projetar ou melhorar sistemas energéticos, pois avalia propostas técnicas diferentes e identifica a alternativa mais favorável sob um ponto de vista ambiental (CARVALHO; SERRA; LOZANO, 2011).

Internacionalmente, a ACV é regida pela *International Organization for Standardization* (ISO) em suas normas 14040 (2006) e 14044 (2006) que abordam os princípios gerais e diretrizes, por meio de inventário de entrada e saída de materiais e energia em um sistema produtivo. No Brasil, estas normas foram editadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 14040, 2014a; ABNT NBR 14044, 2014b). A Figura 1 mostra que a ACV se compõe de quatro fases bem definidas:

- i. Definição do objetivo e do escopo (fatores motivadores e pretendidos do estudo, além do público-alvo a ser atendido e a escolha do produto a ser estudado, juntamente com outros elementos como: pressupostos, limitações, unidades do sistema, fronteiras);
- ii. Análise de inventário (conjunto de informações formadas por dados de entradas e saídas do processo em estudo, por exemplo: consumo energético, matéria-prima, resíduos, emissões para o solo, ar, água);
- iii. Avaliação de impactos (busca entender e associar cada elemento do

processo estudado com os indicadores e modelos de caracterização, ou seja, trata-se da classificação dos resultados e sua respectiva definição); e iv. Interpretação (conclusão da análise do inventário, exposição das limitações enfrentadas e possíveis recomendações).

Existe uma quinta etapa, opcional, que inclui normalização, agrupamento e ponderação. Esta etapa é empregada quando o método de avaliação de impacto ambiental escolhido na etapa iii) expressa os impactos em termos mais amplos, agrupando várias categorias de impacto em uma categoria de dano, ou até em um único indicador.

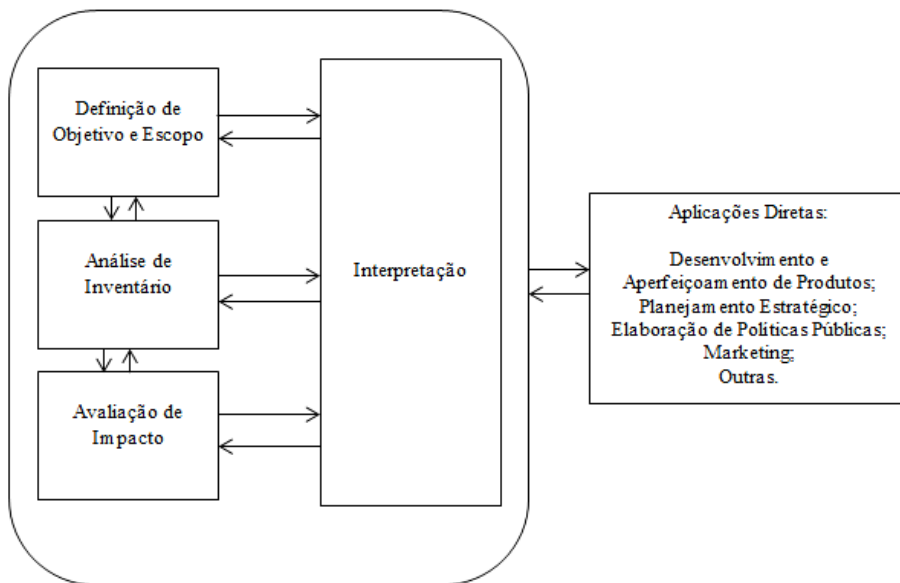


Figura 1. Esquema da Avaliação do Ciclo de Vida.
Fonte: ABNT NBR 14040 (2014a).

A amplitude da metodologia da ACV está nas averiguações de cada elemento considerado, verificando os potenciais impactos ambientais associados, além de permitir modificações entre elementos, observando a sensibilidade nos resultados. O *software* utilizado para desenvolvimento da ACV foi o SimaPro® versão 9.0.0.35 (PRÉCONSULTANTS, 2019), uma ferramenta altamente especializada para ACV.

Devido a preocupações globais com mudanças climáticas, considerou-se o método IPCC 2013 GWP 100a (IPCC, 2013) para avaliação de impactos ambientais. Este método utiliza os fatores de conversão publicados pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) em seus relatórios periódicos. É um dos métodos mais aplicados à avaliação de impactos ambientais, caracterizando as diferentes emissões gasosas de acordo com seu potencial de aquecimento global (GWP - *Global Warming Potencial*), com posterior agregação das diferentes emissões dentro da categoria “mudanças climáticas” ao longo de 100 anos (RALUY *et al.*, 2014).

Para proporcionar uma perspectiva mais global à ACV, empregou-se também o método *ReCiPe endpoint* (RECIPE, 2016), que emprega o quinto passo opcional da ACV e considera as seguintes categorias de impacto (*midpoint*): mudança climática, depleção de ozônio, acidificação terrestre, eutrofização aquática de água doce, eutrofização aquática marinha, toxicidade humana, formação de oxidantes fotoquímicos, formação de matéria particulada, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade aquática de água doce, ecotoxicidade aquática marinha, radiação ionizante, uso do solo agrícola, uso do solo urbano, transformação de terra natural, esgotamento de recursos fósseis, esgotamento de recursos minerais e esgotamento de recursos de água doce.

Estas categorias de impacto são multiplicadas por fatores de dano e classificadas em três categorias *endpoint*: saúde humana, ecossistemas e esgotamento de recursos. Estas categorias *endpoint* são normalizadas, ponderadas e agregadas, resultando em um índice único. O método *ReCiPe* utiliza três perspectivas culturais para lidar de forma consistente com escolhas no nível *endpoint*: igualitária, individualista e hierárquica (RECIPE, 2016). Aqui se considerou a perspectiva hierárquica (H), que exige consenso entre cientistas para determinar a inclusão dos efeitos, e conjunto de normalização global médio (World H/A).

Considerou-se a produção anual de pão francês (132.000 kg) como unidade funcional do estudo, que relacionou as entradas (fluxos de matéria e energia) e as saídas (impactos ambientais e produto). A fabricação do pão francês correspondeu a 50% da produção da panificadora, logo os fluxos de energia anual foram alocados em 50% para o pão francês. As bases de dados Agri-footprint (2016) e Ecoinvent (2019) foram utilizadas para modelar o processo produtivo.

Para o briquete de bagaço de cana-de-açúcar, foi considerado um poder calorífico de 2.257 kcal/kg (50% de umidade para o bagaço) e, para o diesel, foi

considerada uma densidade de 0,840 kg/m³ e poder calorífico de 10.750 kcal/kg (EPE, 2014). Para o gás natural, considerou-se um poder calorífico de 9.100 kcal/m³ (PBGÁS, 2014). Já em relação às cinzas geradas pela queima dos briquetes de bagaço de cana-de-açúcar, de acordo com Vasconcelos e Cesar (2010), são gerados 25 kg de cinzas para cada tonelada de bagaço de cana-de-açúcar incinerada.

A Tabela 1 é referente aos dados de consumo dos recursos do complexo da empresa, entre fevereiro de 2014 a janeiro de 2015. O consumo anual da empresa em energia elétrica foi de 88.644kWh, sendo metade alocada para produção de pão. A energia elétrica não apenas inclui a utilização do forno para produção do pão francês, mas também está associada ao uso da iluminação, ventilação, refrigeração etc. Para o consumo de eletricidade, foi utilizado como base o trabalho de Carvalho *et al.* (2017) para estimar as emissões de GEE associadas ao consumo de 1kWh de energia elétrica da rede elétrica no Brasil no ano de 2018, que utilizou os dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2018) mais recentes no período, dividindo as fontes de geração de energia em: hidrelétricas 71,80%, térmica 16,70%, eólica 8,30%, nuclear 2,70% e solar 0,50%. A tarifa de energia elétrica foi de R\$ 0,18/kWh para o consumo fora de ponta e R\$ 1,19/kWh para o consumo em horário de ponta.

Quanto ao briquete de bagaço de cana-de-açúcar, são consumidos 7.200 kg por ano, a uma tarifa de R\$ 0,50/kg. Já o diesel ocorre apenas entre as 17h30 e 20h30, de segunda à sexta, para alimentação de um gerador elétrico, e desta forma resulta um consumo médio anual de 520 litros, a uma tarifa de 2,71/L. É importante considerar que nesses horários o consumo de energia elétrica apresenta tarifas mais elevadas. Em relação ao gás natural, o consumo anual foi de 13.496 m³ em um ano, considerando apenas a produção do pão francês, a uma tarifa de R\$ 1,80/m³.

Dentro das bases de dados disponíveis no Simapro não houve processo similar ao fermento para inclusão na ACV. Porém pesquisa bibliográfica levou à conclusão de que a remoção do fermento da análise não altera o resultado final (MOUDRÝ *et al.*, 2011; NIGRI *et al.*, 2014).

Após desenvolvimento da ACV, examinaram-se por meio da análise de sensibilidade os diferentes cenários em relação às emissões de carbono e os custos das fontes energéticas em consequência de uma alteração em seus consumos. Blank e Tarquin (2008) afirmam que a análise de sensibilidade permite verificar os efeitos

finais em uma determinada variável, dada uma modificação em suas quantidades, gerando informações da variável de interesse para o processo de tomada de decisão.

Tabela 1. Inventário anual das matérias-primas e das fontes energéticas para a produção de pão francês na padaria de João Pessoa (PB), em 2014

Recursos	Unidade	Quantidade
Produção Anual de Pão Francês	kg	132.000
Farinha	kg	90.000
Açúcar	kg	4.500
Sal	kg	900
Fermento/Reforçador/Melhorador	kg	2.700
Água Resfriada	L	45.000
Consumo de Energia Elétrica	kWh	88.644
Briquetes (bagaço de cana-de-açúcar)	kg	7.200
Consumo de Gás Natural	m ³	13.496
Consumo de Diesel	L	520

Para este trabalho, foi utilizada uma variação entre $\pm 30\%$ no consumo das fontes energéticas, usando uma escala de variação de 10%. As simulações foram realizadas de formas individualizadas, verificando o efeito isolado de cada uma delas, ou seja, varia-se apenas uma variável *coeterisparibus*. As fontes de maior e menor impacto de emissões de CO₂ foram utilizadas para mostrar os efeitos compensatórios em quantidade por fonte e em termos de custos e poder calorífico.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em relação ao mix energético nacional, seguindo a metodologia descrita por Carvalho e Delgado (2017), a pegada de carbono associada ao consumo de 1 kWh de energia elétrica da rede elétrica nacional foi 0,259 kg CO₂-eq/kWh. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos com a aplicação dos métodos IPCC 2013 GWP 100a e ReCiPe (World H/A).

Tabela 2. Impactos ambientais anuais associados à produção de pão francês da padaria de João Pessoa (PB)

Recursos anuais	IPCC 2013 GWP 100a (kg CO ₂ -eq)	ReCiPe World H/A (Pontos)
Farinha	71.154	4.964
Açúcar	5.584	319
Sal	223	13
Água Resfriada	32	4
Consumo de Energia Elétrica	9.682	455
Combustão de Briquetes	452	27
Combustão de Gás Natural	18.435	413
Combustão de Diesel	1.718	115
TOTAL	107.280	6.311

Verificou-se que os principais impactos (CO₂-eq) se concentram no consumo da farinha de trigo, responsável por uma emissão de 71.154 kg CO₂-eq/ano, representando 66,33% da produção de pão francês. O gás natural vem em segundo lugar, com 18.435 kg CO₂-eq, relativo a 17,18% de todas as emissões. Esses impactos ambientais associados à produção de pão francês geraram emissões de 107.280 kg CO₂-eq/ano, o que resultam 0,813 kg CO₂-eq por kg de pão francês produzido.

Considerando-se uma perspectiva mais ampla para impactos ambientais, verificou-se que novamente a farinha de trigo e o consumo de eletricidade estiveram associados às maiores contribuições anuais em emissões. Neste caso, o impacto ambiental por kg de pão francês foi 0,048 pontos/ano. Decompondo a pontuação do ReCiPe por categoria de dano (Tabela 3), observou-se que a farinha de trigo representa o maior dos impactos ambientais, nas três categorias. A combustão gás natural e a eletricidade possuem impactos consideráveis nas categorias de «saúde humana» e «recursos» (minerais e fósseis), mas bastante menores em «ecossistemas».

Tabela 3. Decomposição dos impactos ambientais por categoria de dano (ReCiPe World H/A) para produção de pão francês da padaria de João Pessoa (PB)

	Farinha de trigo	Água resfriada	Açúcar	Sal	Gás natural	Energia elétrica	Diesel	Briquete
Saúde humana	3510,03	3,36	261,57	12,72	364,88	416,09	106,77	22,25
Ecossistemas	1417,27	0,42	57,05	0,67	32,27	35,24	6,37	4,78
Recursos	36,55	0,01	0,76	0,08	16,11	3,79	1,83	0,08

Andersson e Ohlsson (1999) avaliaram diferentes escalas de produção de pão e os impactos em termos de emissões de CO₂-eq. Entre as escalas industriais, os impactos foram aproximadamente 0,940-1,0 kg CO₂-eq e, para a produção caseira, 0,630-0,640 kg CO₂-eq por cada kg de pão (pronto para consumo). A avaliação da pegada de carbono incluiu os processos de agricultura, processamento (moagem do trigo, cozimento do pão etc.), acondicionamento e consumo final. Já o estudo desenvolvido por Moudrý *et al.* (2011) obteve 1,05-1,14 kg CO₂-eq para cada kg de pão produzido, excluindo-se o transporte e considerando sistemas de agricultura convencionais para produção de trigo e condições de cultivo orgânico. Foi retirado do modelo o fermento/reforçador/melhorador no processo produtivo do pão por não causar impactos.

Espinoza-Orias, Stichnotche e Azapagic (2011) obtiveram 0,977 - 1,244 kg CO₂-eq por pão de 800g, resultando 1,22 - 1,55 kg CO₂-eq/kg de pão. Korsæth *et al.* (2012) obtiveram um valor um pouco mais baixo, 0,950 kg CO₂-eq/kg, e Jensen e Arlbjørn (2014) estudaram o pão de centeio, obtendo 0,731 kg CO₂-eq/kg. Notarnicola *et al.* (2017) desenvolveram análises de sustentabilidade ambiental para 21 tipos de pão consumidos na União Europeia, obtendo valores entre 0,5 e 6,6 kg CO₂-eq/kg de pão. Goucher *et al.* (2017) verificaram que um pão de 800g emite cerca de 0,5 kg CO₂-eq, representando 0,625 kg CO₂-eq/kg de pão, e a maioria destas emissões podem ser atribuídas ao fertilizante empregado na produção do trigo. Assim, os valores encontrados neste estudo, 0,813 kg CO₂-eq por kg de pão francês, estão dentro da faixa de valores informada pela literatura científica. Devido à facilidade da comunicação de resultados da pegada de carbono, um indicador que está muito mais popularizado, houve possibilidade de comparação dos resultados aqui obtidos com estudos científicos. Porém, não foram encontrados estudos que aplicassem o método ReCiPe *endpoint*.

Para a análise econômica, construiu-se a Tabela 4, que mostra os gastos anuais por fontes energéticas para o complexo da empresa em estudo, ajustados para 2019. Os maiores custos são apresentados no consumo de energia elétrica e o gás natural.

Tabela 4. Despesas anuais por fonte energética, para produção de pão francês da padaria no município de João Pessoa (PB), valores nominais (04/2015) e reais (08/2019 pelo IPCA)

Fonte Energética	Custo nominal (04/2015)	Custo real (08/2019)
Energia Elétrica	R\$ 16.492,00	R\$ 21.333,42
Briquetes (bagaço de cana-de-açúcar)	R\$ 3.600,00	R\$ 4.656,82
Consumo de Gás Natural	R\$ 24.293,00	R\$ 31.424,49
Consumo de Diesel	R\$ 1.409,00	R\$ 1.822,63

A Tabela 5 apresenta a análise de sensibilidade nas emissões de carbono, utilizando o método IPCC 2013 GWP 100a, considerando valores anuais. Verificou-se que mesmo com uma redução no consumo de gás natural em 30%, a representatividade no processo em relação às emissões passa para 18%, uma redução de 5,9% em comparação com o cenário de referência da panificadora. Em contrapartida, uma elevação de 30% no consumo de gás natural leva a um aumento de 5,1% na emissão de dióxido de carbono.

Tabela 5. Análise de sensibilidade para as emissões de carbono em um ano por fonte energética

Recursos	-30%	-20%	-10%	0%	+10%	+20%	+30%
Gás Natural	18,0%	20,1%	21,8%	23,9%	25,7%	27,4%	29,0%
Energia Elétrica	12,0%	13,5%	14,8%	16,3%	17,7%	19,0%	20,3%
Briquetes de cana	0,26%	0,30%	0,33%	0,37%	0,41%	0,45%	0,49%
Diesel	0,79%	0,90%	1,01%	1,13%	1,24%	1,36%	1,47%

No tocante à energia elétrica, uma redução de 30% no consumo provocou uma diminuição de 4,3% de emissões de CO₂-eq, enquanto um aumento de 30% no consumo implicou no aumento de 4% de emissões de CO₂-eq. Para o uso do briquete de cana foi mostrado que uma elevação do consumo de 30% gerou 0,12%

de emissões de CO₂-eq. Com a elevação no consumo do diesel em 30%, houve um incremento de 0,34% de emissões de CO₂-eq, e uma redução de 30% provocou um decréscimo na mesma proporção nas emissões de CO₂-eq.

A elevação do consumo do briquete e diesel evidencia a possibilidade de mitigação dos impactos provocados pelo uso de gás natural e da energia elétrica. Mas, apenas a verificação dos impactos do consumo das fontes energéticas não foi suficiente; desta forma a Tabela 6 expõe a análise de sensibilidade para os custos por fontes.

Verificou-se que com uma diminuição de 30% do consumo de gás natural os custos passariam para R\$ 21.997,01 e uma redução de R\$ 9.427 nos custos anuais. Desta forma, como exposto na Tabela 3, que resultou uma mitigação de 5,9% nas emissões de CO₂. Caso a empresa reduza em 10% do consumo, os custos anuais passam para R\$ 28.281,14, tendo um abatimento de R\$ 3.143,35 e uma redução de 1,5% na emissão de dióxido de carbono na produção de pão francês.

Para um decréscimo de 30% do consumo a energia elétrica leva uma economia de R\$ 6.400,02 anual e a uma redução nas emissões de CO₂ em 4,3%. Para o briquete, é importante expor que um incremento do consumo em 30% aumenta R\$ 1.397,05 dos custos e as emissões de CO₂ se elevam em 0,12%.

Tabela 6. Análise de sensibilidade dos custos reais anuais das fontes energéticas para a padaria de João Pessoa (PB)

Variação de Recurso	Gás Natural	Energia Elétrica	Briquetes de cana	Diesel
-30%	R\$ 21.997,01	R\$ 14.933,39	R\$ 3.259,77	R\$ 1.275,84
-20%	R\$ 25.139,07	R\$ 17.066,73	R\$ 3.725,46	R\$ 1.458,10
-10%	R\$ 28.281,14	R\$ 19.200,07	R\$ 4.191,14	R\$ 1.640,37
0%	R\$ 31.424,49	R\$ 21.333,42	R\$ 4.656,82	R\$ 1.822,63
+10%	R\$ 34.566,55	R\$ 23.466,76	R\$ 5.122,50	R\$ 2.004,89
+20%	R\$ 37.708,61	R\$ 25.600,10	R\$ 5.588,19	R\$ 2.187,15
+30%	R\$ 40.850,67	R\$ 27.733,44	R\$ 6.053,87	R\$ 2.369,42

A Figura 3 expõe a compensação necessária de poder calorífico para o uso do briquete dada uma redução em escalas de 10% no consumo do gás natural anual. Foi observado que se o consumo do gás natural passar de 80,6% da matriz energética

inicial do complexo para 72,5%, será necessária uma compensação de 75% no consumo de briquetes (12.641 kg) para atingir o mesmo poder calorífico. Já para uma redução no consumo do gás natural de 20%, chegando a 64% do consumo de todas as fontes energéticas, demandará um aumento em torno de 151% no consumo de briquete (18.083 kg). Por fim, com um decréscimo em 30% no consumo do gás natural, necessitaria uma compensação de 226% do consumo do briquete (23.524 kg).

Em relação à emissão de CO₂-eq para os cenários apresentados na Figura 3, uma redução de 10% do gás natural em detrimento de uma compensação de 75% no consumo de briquete, seriam gerados cerca de 151.000 kg CO₂-eq em um ano, equivalente a 1,15 kg de CO₂-eq por kg de pão francês, ou seja, uma diminuição de 3.000 kg CO₂-eq anual. Para um abatimento de 20% do consumo do gás natural e aumento em 151% do briquete, o total de emissão passaria para 148.000 kg CO₂ anual, reduzindo em 6.000 kg CO₂-eq em comparação com o atual cenário, representando 1,12 kg de CO₂-eq por kg de pão francês. Já um decréscimo de 30% do gás natural e elevação de 226% do consumo do briquete, implicaria uma emissão de 145.000 kg CO₂-eq/ano, mitigando em torno de 9.000 kg CO₂-eq em relação à atual matriz energética do complexo, ou seja, gerando 1,1 kg de CO₂-eq por kg de pão francês.

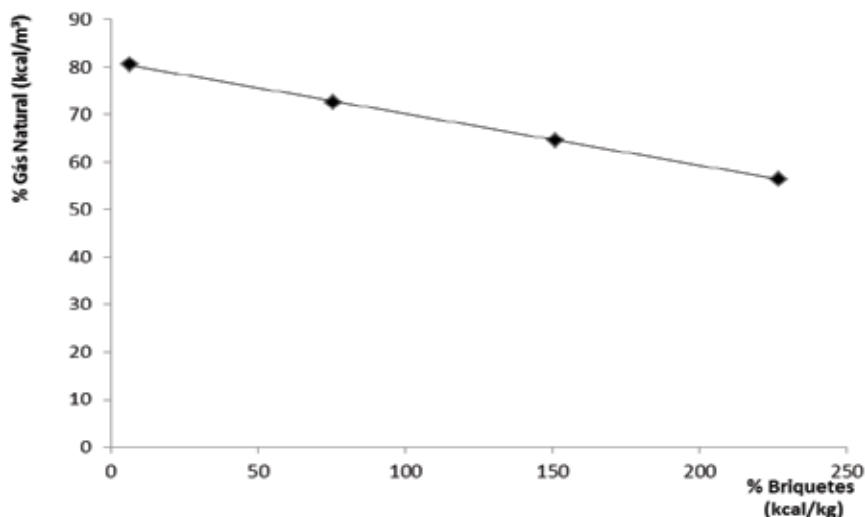


Figura 3. Compensação necessária de poder calorífico entre o gás natural e briquete, para a padaria de João Pessoa (PB).

A Figura 4 mostra a relação direta de substituição do poder calorífico e custos do gás natural e do briquete. O eixo horizontal caracteriza a relação apresentada na Figura 4 em poder calorífico que é a subtração do poder calorífico do gás natural e briquete.

O ponto de equilíbrio da Figura 4 representa a igualdade dos custos a nível de poder calorífico. Este ponto de equilíbrio apresentou um déficit do poder calorífico equivalente a 4.440,73 kWh. Essa relação é resultado do poder energético mais elevado do gás natural, já que apresenta 4 vezes mais energia do que o briquete. Após o ponto de equilíbrio os custos do briquete são mais elevados que do GNV.

Cabe aos responsáveis pela empresa decidirem uma possível elevação de seus preços finais, na intenção de uma produção de um pão francês menos poluente, já que o efeito de substituição do gás natural para o briquete de cana poderia apresentar mitigação considerável dos impactos.

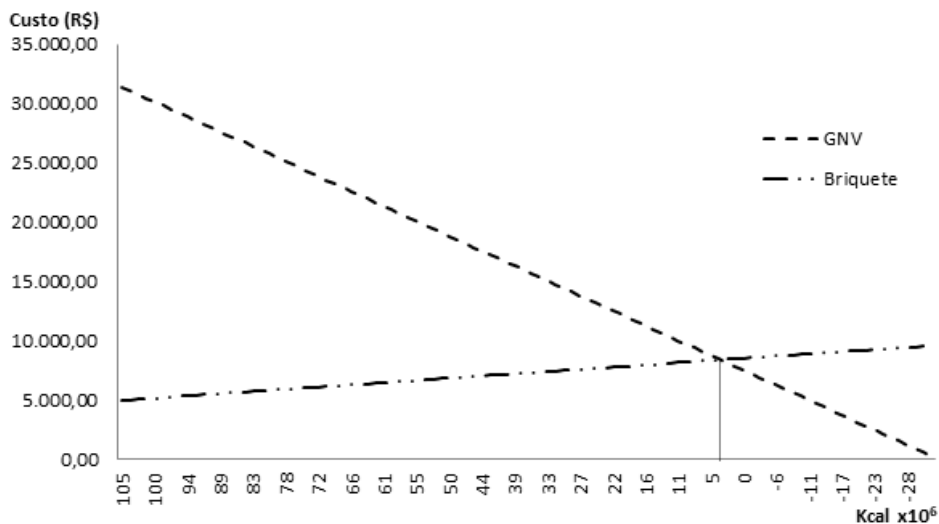


Figura 4. Relação de custos reais das fontes (R\$) energéticas e poder calorífico (Kcal x 10⁶) para a padaria de João Pessoa (PB), corrigido pelo IPCA.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho aplicou a metodologia da Avaliação de Ciclo de Vida ao processo produtivo do pão francês. Para tanto, considerou-se como estudo de caso uma padaria localizada na cidade de João Pessoa, capital do Estado da Paraíba. Visitas ao local permitiram determinar os consumos anuais de matéria e energia, além da obtenção das tarifas energéticas. Foram empregados dois métodos de avaliação de impacto ambiental, o IPCC 2013 GWP 100a, que é um método mais conhecido e permite comparação de resultados com os já obtidos em outros estudos, e o método ReCiPe, que engloba uma perspectiva mais ampla e considera o consumo de recursos, qualidade do ecossistema, e danos à saúde humana.

A farinha de trigo foi a responsável pela maior contribuição aos impactos ambientais, em ambos os métodos. Das fontes energéticas utilizadas, o maior impacto esteve associado ao consumo e combustão de gás natural.

A energia elétrica consumida da rede nacional produziu pouco impacto ambiental, mas apresenta relevância nos custos da empresa.

O brique de bagaço de cana-de-açúcar apresentou níveis de emissões de CO₂-eq bastante inferiores aos do gás natural. Porém, para atingir o mesmo poder calorífico do gás natural, o nível de consumo de briquetes atingirá custos mais elevados, não sendo viável a substituição total nos fornos da padaria.

O incremento no preço de venda do pão francês (e demais produtos da padaria) poderia ser uma alternativa para viabilizar a substituição do gás natural pelo brique, reduzindo consideravelmente os impactos gerados pela padaria. Conclui-se que há potencial para mitigação de mudanças climáticas associado à transição energética no processo produtivo.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Bolsa de Produtividade nº 307394/2018-2).

REFERÊNCIAS

ABRAHAO, R.; CARVALHO, M. Environmental impacts of the red ceramics industry in Northeast Brazil. *Int. J. Emerg. Res. Manag. Technol*, 6, p. 310-317, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP. **Levantamento de preços**. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/>. Acesso em: 31 jul. 2019.

AGRI-FOOTPRINT. **The agri-footprint database**. 2014. Disponível em: <http://www.agri-footprint.com/>. Acesso em: 31 jul. 2019.

AGRI-FOOTPRINT. **LCA database**. 2019. Disponível em: <http://www.agri-footprint.com/> Acesso em: 06 ago. 2019.

ANDERSSON, K.; OHLSSON, T. Life cycle assessment of bread produced on different scales. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 4, n. 1, p. 25-40, 1999.

ARAÚJO, Y. R. V.; GOIS, M. L.; COELHO JUNIOR, L. M.; CARVALHO, M. Carbon footprint associated with four disposal scenarios for urban pruning waste. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 25, p. 1863-1868, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PANIFICAÇÃO E CONFEITARIA -ABIP. Número de padarias por estado 2018. 2018a. Disponível em: <http://www.abip.org.br/site/numero-de-padarias-por-estado-2018/> Acesso em: 31 jul. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PANIFICAÇÃO E CONFEITARIA - ABIP. Balanço e tendências do mercado de panificação e confeitaria. 2018b. Disponível em: <http://www.abip.org.br/site/wp-content/uploads/2018/03/INDICADORES-E-TENDENCIAS-DE-MERCADO.pdf> Acesso em: 31 jul. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR ISO 14040/2014 - Gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro, ABNT, 2014a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR ISO 14044/2014 - Avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientações. Rio de Janeiro, ABNT, 2014b.

BARBOSA, A. T. R.; ODAKURA, O. V. A. Forno a lenha ou elétrico: o impacto nas despesas em uma empresa de panificação. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS*, 4, Goiânia, 2012. Anais...[...]. Goiânia, 2012.

BLANK, L.; TARQUIN, A. **Engenharia econômica**. 6. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2008.

CARVALHO, M.; SERRA, L. M.; LOZANO, M. A. Optimal synthesis of trigeneration systems subject to environmental constraints. **Energy**, v. 36, n. 6, p. 3779-3790, 2011.

CARVALHO, M.; LOZANO, M. A.; SERRA, L.M. Multicriteria synthesis of trigeneration systems considering economic and environmental aspects. **Applied Energy**, v. 91, n. 1, p. 245-254, 2012.

CARVALHO, M.; FREIRE, R. S.; BRITO, A. M. V. G. Promotion of sustainability by quantifying and reducing the carbon footprint: new practices for organizations. *In: ENERGY, transportation and global warming*. Cham: Springer, 2016. p. 61-72.

CARVALHO, M.; DELGADO, D. Potential of photovoltaic solar energy to reduce the carbon footprint of the Brazilian electricity matrix. **LALCA-Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**, v. 1, n. 1, p. 64-85, 2017.

CARVALHO, M.; SILVA SEGUNDO, V. B.; MEDEIROS, M. G.; SANTOS, N. A.; COELHO JUNIOR, L. M. Carbon footprint of the generation of bioelectricity from sugarcane bagasse in a sugar and ethanol industry. **International Journal of Global Warming**, v. 17, p. 235-251, 2019.

COELHO JUNIOR, L. M.; MARTINS, K. L. C.; CARVALHO, M. Carbon Footprint Associated with Firewood Consumption in Northeast Brazil: An Analysis by the IPCC 2013 GWP 100y Criterion. **Waste and Biomass Valorization**, p. 1-9, 2018.

CURRAN, M.A.(ed.). **Life cycle assessment handbook: a guide for environmentally sustainable products**. John Wiley & Sons, 2012.

DINATO, R. M. **Sistematização dos métodos de contabilização de emissões de gases de efeito estufa sob a ótica do ciclo de vida**. 2013. 86 f. Dissertação (Mestrado em química) - Universidade de São Paulo, São Paulo. 2013.

DURLINGER, B.; REINDERS, A.; TOXOPEUS, M. A comparative life cycle analysis of low power PV lighting products for rural areas in South East Asia. **Renewable energy**, v. 41, p. 96-104, 2012.

ECOINVENT. **The ecoinvent database**. 2019. Disponível em: <http://www.ecoinvent.org/>. Acesso em: 6 ago. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balço energético nacional 2014: ano base 2013**. Rio de Janeiro, 2014.

ESPINOZA-ORIAS, N.; STICHNOTHE, H.; AZAPAGIC, A. The carbon footprint of bread. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 16, n. 4, p. 351-365, 2011.

FINNVEDEN, G. *et al.* Recent developments in life cycle assessment. **Journal of environmental management**, v. 91, n. 1, p. 1-21, 2009.

FREIRE, R. S. *et al.* Perspectives on the implementation of climate change public policies in Brazil. *In: ENERGY, Transportation and Global Warming*. Cham: Springer, 2016. p. 13-20.

GIANNETTI, B. F.; ALMEIDA, C. M. B. V. **Ecologia Industrial: conceitos, ferramentas e aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

GOUCHER, L.; BRUCE, R.; CAMERON, D. D.; KOH, S. L.; HORTON, P. The environmental impact of fertilizer embodied in a wheat-to-bread supply chain. **Nature Plants**, v. 3, n 3, p. 17012, 2017.

GRILO, M. M. S.; FORTES, A. F. C.; SOUZA, R. P. G.; SILVA, J. A. M.; CARVALHO, M. Carbon footprints for the supply of electricity to a heat pump: Solar energy vs. electric grid. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 10, n. 2, p. 023701, 2018.

GUINÉE, J. B. Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards. **The international journal of life cycle assessment**, v. 7, n. 5, p. 311-313, 2002.

HARTONO, N.; CHRISTIANI, A. (2018). Case study of life cycle assessment in bread production process. *In*: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (v. 195, n. 1, p. 012043). IOP Publishing.

HAUSCHILD, M. Z.; ROSENBAUM, R. K.; OLSEN, S. (ed.) **Life cycle assessment. Theory and Practice**. New York: Springer, 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO, ISO 14040: 2006: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, Genebra, ISO 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO, ISO 14044: 2006: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines, Genebra, ISO 2006.

IPCC. **Revised supplementary methods and good practice guidance arising from the Kyoto protocol**. 2013. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/kpsg/> Acesso em: 23 mar. 2019.

JENSEN, J. K.; ARLBJØRN, J. S. Product carbon footprint of rye bread. **Journal of cleaner production**, v. 82, p. 45-57, 2014.

KORSÆTH, A. *et al.* Environmental life cycle assessment of cereal and bread production in Norway. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section A-Animal Science**, v. 62, n. 4, p. 242-253, 2012.

KULAK, M. *et al.* Life cycle assessment of bread from several alternative food networks in Europe. **Journal of Cleaner Production**, v. 90, p. 104-113, 2015.

LCA-FOOD. **The LCA-food database**. 2007. Disponível em: <http://www.lcafood.dk/>. Acesso em: 31 jul. 2019.

MELO, F. M.; SILVESTRE, A. D.; CARVALHO, M. Carbon footprints associated with electricity generation from biomass syngas and diesel. **Environmental Engineering and Management Journal**, n. 7, v. 18, 2019.

MELQUIADES, T. F.; COELHO JUNIOR, L. M.; ARAUJO, Y. R. V.; CARVALHO, M. Pegada de carbono associada ao processo de pasteurização de sorvetes. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 12, p. 609-629, 2019.

MOUDRÝ JR, J. *et al.* Carbon dioxide equivalent emission load within production and processing of wheat under conditions of organic and conventional farming systems. **Agronomy Series of Scientific Research / Lucrari Stiintifice Seria Agronomie**, v. 54, n. 2, 2011.

NIGRI, E. M. *et al.* Assessing environmental impacts using a comparative LCA of industrial and artisanal production processes: “Minas Cheese” case. **Food Science and Technology (Campinas)**, v. 34, n. 3, p. 522-531, 2014.

NOTARNICOLA, B. *et al.* Energy flows and greenhouses gases of EU (European Union) national breads using an LCA (Life Cycle Assessment) approach. **Journal of cleaner production**, v. 140, p. 455-469, 2017.

PBGÁS. **Informações sobre as fontes energéticas**. Disponível em: http://www.pbgas.com.br/?page_id=1477. Acesso em: 23 dez. 2014.

PRÉCONSULTANTS. **Software Simapro**. 2014a. Disponível em: <http://www.pre.nl/simapro>. Acesso em: 31 jul. 2019.

PROPAN. **Desempenho das Panificadoras e Confeitarias Brasileiras em 2018**. 2018. Disponível em: <http://www.propan.com.br/?pagina=indicadores>. Acesso em: 31 jul. 2019.

RALUY, R. G. *et al.* Life cycle assessment of central solar heating plants with seasonal storage. **Energy Procedia**, v. 48, p. 966-976, 2014.

RAMOS, M. C.; ANDRADE, V. S. Auditoria energética no setor de panificação - um estudo de caso em Governador Valadares. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL*, 8, Campo Grande, 2017. **Anais [...]**. Campo Grande, 2017.

RECIPE. **Método de avaliação de impacto ambiental**. Disponível em: <http://www.lcia-recipe.net/>. Acesso em: 31 jul. 2019.

SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. **Consumo energético na panificação, biscoito e confeitaria**. Minas Gerais: SEBRAE - Nacional, 2008. 12p.

SILVA, J. L. S. *et al.* Análise do crescimento da geração distribuída: estudo de caso do Brasil com ênfase no estado de Minas Gerais. **Revista de Engenharia e Tecnologia**. v. 10, n. 1, 2018, p. 169-183.

VASCONCELOS, Y.; CESAR, E. **Concreto feito de Cinzas**. Pesquisa FAPESP, n. 171, p. 68, 2010.

Recebido em: 26/05/2018

Aceito em: 17/10/2019