



Título: Proposta de uso da análise exergética como ferramenta para o uso racional da energia

Bolsista: Marina Torelli Reis Martins Pereira

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Keutenedjian Mady

Universidade Estadual de Campinas - Campinas - SP

Faculdade de Engenharia Mecânica - Departamento de Energia

Área de conhecimento: Termodinâmica.

RESUMO

Este projeto propõe a avaliação da eficiência exergética de uma residência como indicador para a tomada de decisão em relação à efetividade de tecnologias e hábitos de consumo, sendo considerada a matriz energética brasileira. Para tal, foram propostos modelos termodinâmicos e foram simulados os de eletrodomésticos em função de condições diversas. Ademais, foi feito o estudo da exergia contida em itens de consumo cotidianos, através de dados já validados obtidos por Análise de Ciclo de Vida. Além disso, o projeto estuda o consumo da casa sob a ótica da sustentabilidade e impactos ambientais no que tange as emissões de gás carbônico. Este projeto não tem como intuito impor estilos de vida, mas sim investigar como é possível viver mais, melhor e consumindo menos exergia.

1. INTRODUÇÃO

Muito tem sido feito e discutido em relação aos impactos ambientais associados à geração e utilização de energia. A análise exergética se apresenta como uma ferramenta capaz de apontar ganhos e perdas de eficiência de maneira quantitativa (Rosen et al, 2007), capaz de conciliar aspectos econômicos, ambientais e a real eficiência de um processo (Dincer et al, 2000). Tais questões permeiam o cotidiano dos cidadãos em suas escolhas relacionadas ao uso direto de energia elétrica e em outros itens relacionados à sua sobrevivência, como alimentos e itens de cesta básica.

Dincer (2000) define “análise exergética” como um método que utiliza a primeira e a segunda leis da termodinâmica, permitindo a obtenção de sistemas mais eficientes através da redução de suas irreversibilidades.

O objetivo deste projeto é estudar a maneira com que o ser humano usa os recursos naturais em seus hábitos, englobando diversos aspectos: desde a utilização da energia elétrica por eletrodomésticos e etc, até a intensidade energética associada à produção de alguns itens de cesta básica. Por meio desta análise, serão buscadas correlações entre os hábitos de consumo e a geração de CO_2 .

2. MATERIAIS E MÉTODOS

São propostos os volumes de controle:

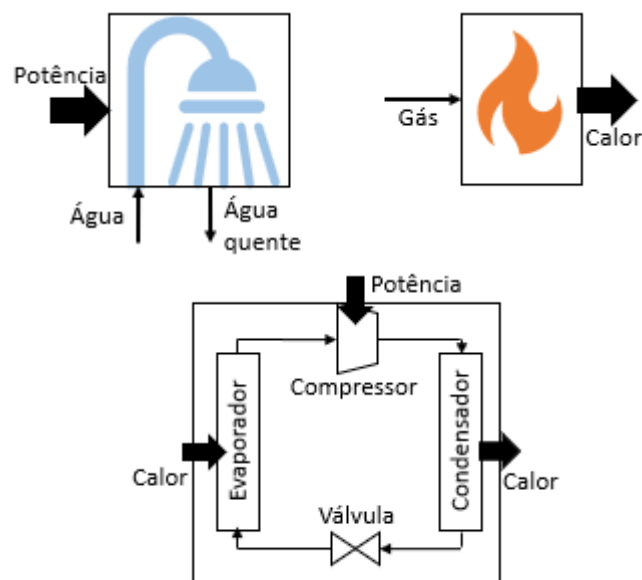


Figura 1. a, b e c) volumes de controle para o chuveiro, fogão e sistemas de compressão de vapor.

Para o fogão a gás (mesa de cocção), considerou-se a vaporização de 1 kg de água a temperatura constante ($100\text{ }^\circ\text{C}$). Foram obtidos resultados em função da utilização do GLP e do gás natural.

O INMETRO considera a eficiência relacionada à eficiência dos queimadores, que varia de 63% a 52%. Para a eficiência exergética, considerou-se a expressão abaixo. Para a produção de CO_2 , considerou-se as equações de combustão completa do gás natural e do GLP.

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{Q}(1 - \frac{T_0}{T})}{\phi * \dot{m}_{comb} * PCI} \quad (1)$$

Para o chuveiro elétrico, dentre as informações disponíveis, destaca-se as faixas de desempenho, que tem como base a potência do chuveiro e elevação de temperatura. Para este modelo, adotou-se vazão de 4,8 L/min. Buscou-se obter uma avaliação da eficiência exergética em função da potência e elevação de temperatura, através da seguinte expressão:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{B}_{out}}{W_{in}} \quad (2)$$

Para a geladeira e ar condicionado, considerou-se ciclos de compressão de vapor. Para a geladeira, tendo como fluido de trabalho o refrigerante R134a e vazão de 0,0925 m³/s (Staley et al, 1992), buscou-se avaliar a influência da temperatura ambiente (funcionamento em dias mais quentes ou frios) e, para o ar condicionado, além desta questão, avaliou-se a influência da carga térmica no interior da sala sendo refrigerada.

$$COP = \frac{Q_{ev}}{\dot{W}_{in}} \quad (3)$$

$$\eta_{ex} = COP \left[1 - \frac{T_0}{T} \right] \quad (4)$$

Para o ar condicionado, utilizou-se a seguinte equação para a eficiência:

$$\eta_{ex} = COP \left[1 - \frac{T_0}{\Delta T_{ML}} \right] \quad (5)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Fogão a gás (mesa de cocção)

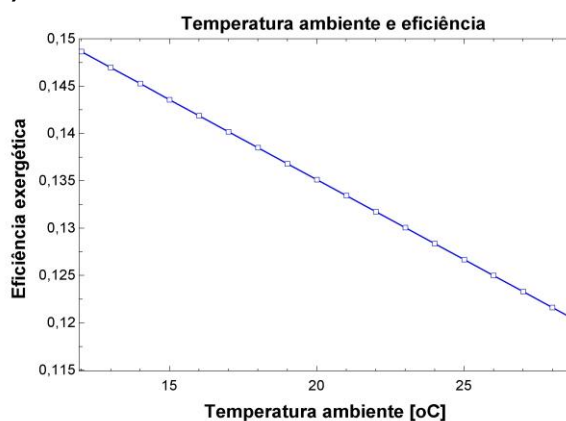


Figura 2. Eficiência exergética em função da temperatura ambiente.

Observa-se que o aumento na temperatura ambiente impacta em piora na eficiência exergética. Além disso, observa-se que para o fogão, a melhor eficiência dos queimadores implica em melhora na eficiência exergética, mas que os valores de eficiência exergética são bem menores do que os de eficiência energética (dos queimadores). A melhora na eficiência também é acompanhada de um menor consumo de combustível, o que, por sua vez, resulta em menor produção de CO₂ na queima. Observa-se que o gás natural tem produção ligeiramente menor de CO₂, o que ocorre devido ao menor teor de carbono em sua constituição.

4.2. Chuveiro elétrico

Observa-se que maiores elevações de temperatura da água resultam em maior consumo de eletricidade (como esperado) e também em maior eficiência exergética. O valor para a eficiência é na faixa de 4,5 a 1,5%, ou seja, valores consideravelmente baixos, se comparados com o fogão a gás, na seção anterior. Isso se dá pela degradação da qualidade da energia, que, no chuveiro, ocorre à medida que energia de alta nobreza (elétrons) é convertida a energia de menor nobreza (calor).

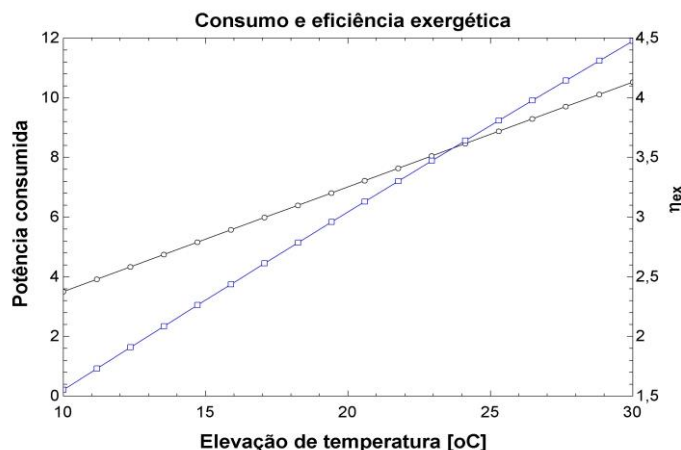


Figura 3 Eficiência exergética e potência consumida para o chuveiro elétrico.

3.4. Itens de consumo cotidiano

Foi estudada a influência de outros hábitos de consumo no comportamento exergético da residência, por meio do levantamento de hábitos relacionados a itens presentes no cotidiano. Para esta seção, considerou-se o consumo de alimentos e de alguns produtos de limpeza. Considerou-se a possibilidade de duas pirâmides alimentares, sendo uma convencional (Philippi, 2002) e uma vegetariana (Venti, Johnston, 2002). Aproximou-se a pegada de exergia para a demanda acumulada de energia.

4.3. Geladeira e ar condicionado

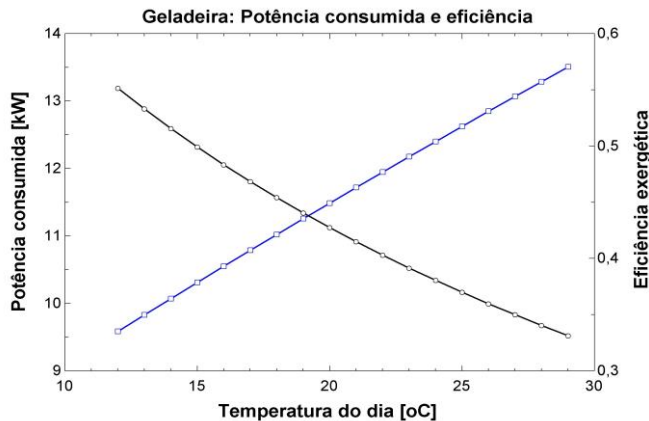


Figura 4: Potência e eficiência exérgica em função da temperatura ambiente.

Observa-se que em dias mais quentes há uma elevação na potência consumida, e há um decréscimo na eficiência exérgica. Comportamento similar é observado para o ar condicionado, quanto ao condensador (que é responsável por trocar calor com o ambiente externo), observa-se que, quanto maior a temperatura do ar em sua saída, menor o COP e eficiência exérgica, e maior a destruição de exergia.

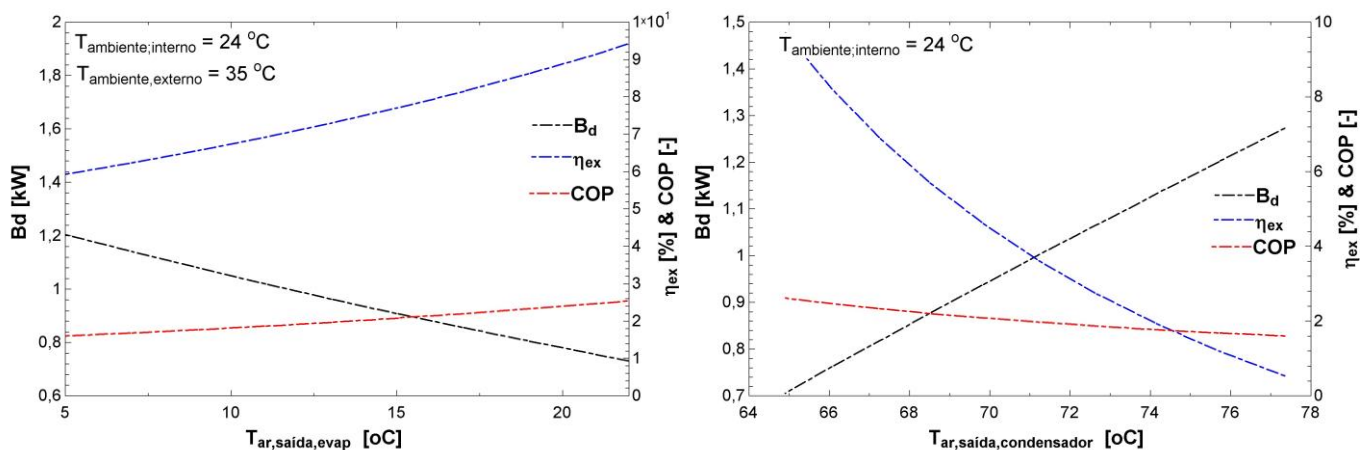


Figura 5. Exergia destruída, eficiência e COP em função de a) temperatura do ar na saída do evaporador e b) temperatura do ar na saída do condensador.

Observa-se que o ar condicionado se torna mais eficiente à medida em que a temperatura do ar na saída do evaporador (ou seja, o ar que é responsável por resfriar o ambiente) se torna maior. O COP é semelhante, e a exergia destruída é inversamente proporcional.

4.4. Eficiência exérgica, consumo e emissões da residência

A partir da análise do efeito dos eletrodomésticos foram obtidos os seguintes resultados:

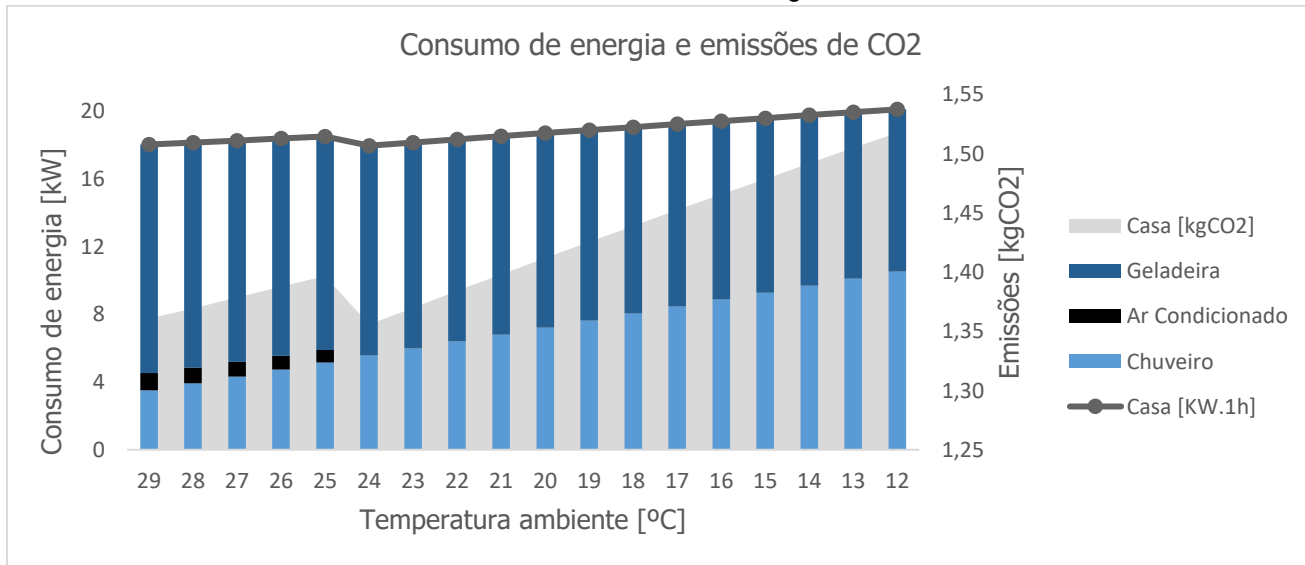


Figura 6: Consumo de energia da casa e eletrodomésticos, e emissões da casa.

O consumo dos eletrodomésticos aumenta conforme menor temperatura ambiente. Considerou-se que o ar condicionado fica ligado apenas até ser atingida temperatura de 25°C. Seu consumo foi muito menor do que o da geladeira e chuveiro. Isso indica que o aquecimento da água através de efeito Joule demanda mais energia do que a refrigeração do ar através de compressão de vapor. A geladeira utiliza a mesma tecnologia do ar condicionado e consome mais energia, o que pode ocorrer pelas faixas de temperatura diferentes.

Vale apontar que se ignorou o tempo que os aparelhos ficam ligados e outras questões relativas ao seu funcionamento. Assim, os resultados podem e devem variar de acordo com o uso real dos equipamentos (número de vezes em que a geladeira é aberta, tempo de uso do chuveiro, etc). Do mesmo jeito foi avaliada a eficiência da casa em função da dos eletrodomésticos, segue abaixo:

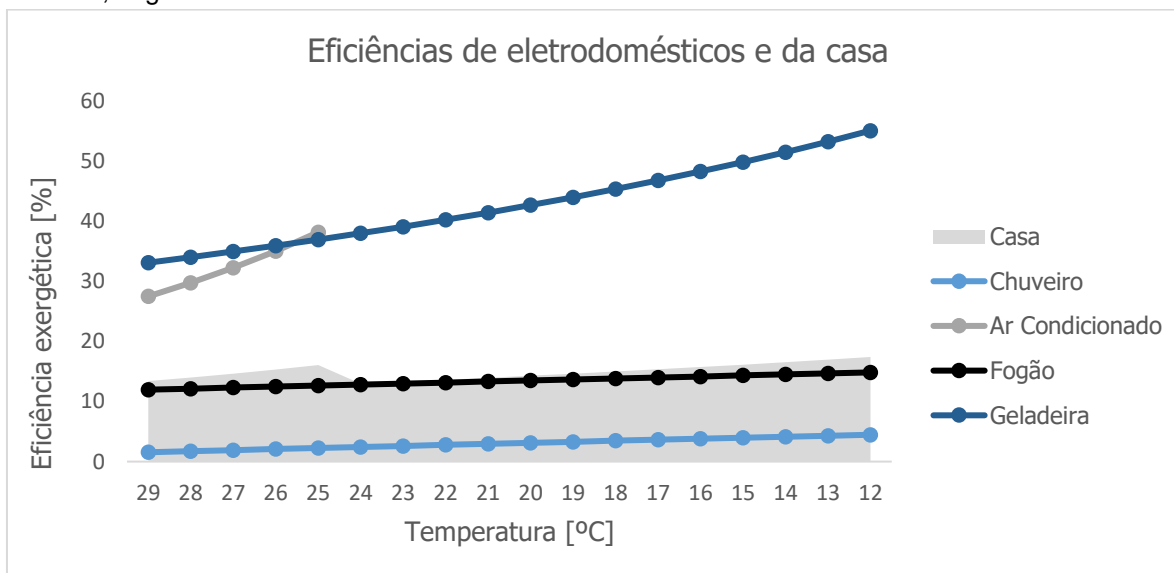


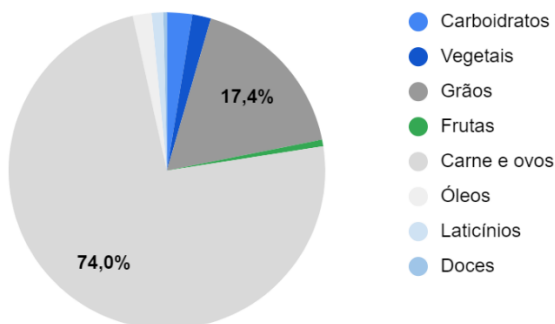
Figura 7: Eficiência exergética da casa e dos eletrodomésticos.

Observa-se que as tecnologias de compressão de vapor foram as mais eficientes dentre os aparelhos analisados, e o aquecimento da água por efeito Joule foi a menos eficiente. A eficiência do fogão se mantém praticamente constante em comparação com a dos demais equipamentos. Todos os equipamentos se tornaram mais eficientes conforme mais frio.

4.5. Itens de cesta básica

Os grupos alimentares de maior destaque em ambos os indicadores foram as carnes e demais produtos de origem animal (como laticínios), além de alimentos industrializados.

Emissões (kgCO₂eq/kg alimento)



Demanda acumulada de energia(MJ/kg)

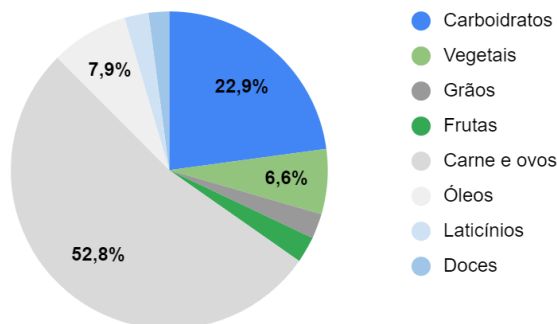


Figura 8. a) e b) Pegada de exergia e carbono para os grupos alimentares estudados.

Tabela 2: Impacto diário por pessoa das duas pirâmides alimentares analisadas.

Dieta	Quantia máx [g]	Quantia mín [g]	Pegada máx de CO ₂ [kg]	Pegada mín de CO ₂ [kg]	Pegada máx de exergia [MJ]	Pegada mín de exergia [MJ]
Padrão	2387	1670	6,082	3,431	36,69	21,44
Vegetariano	2435	1715	1,91	1,354	7,13	5,62

Com a base de dados em que se trabalhou neste projeto, a conclusão é que a alimentação convencional e

principalmente o consumo de carne bovina está ligado a diversos impactos ambientais. Outros projetos encontraram resultados diferentes, como, por exemplo, Wallén et al (2004), que concluiu que haveria uma diferença de apenas 5% entre as duas dietas. Abaixo, os resultados levantados para os produtos de limpeza, segundo o consumo sugerido por Koehler-Wildbolz (2009).

Tabela 3: Impacto anual do uso de produtos de limpeza.

Produto	Quantidade/uso	Pegada de exergia fóssil [MJ]	Pegada de carbono [kg]
Sabonete líquido	2,3 g	423,11	15,53
Sabão em pó para roupas	68 g	134,09	7,21
Sabão líquido para roupas	120 g	69,89	32,95
Produtos para banheira	0,24 m ² - 4,7 g	6,40	0,06
Produtos para cozinha	0,24 m ² - 4,7 g	1,31	0,06
Produtos para janelas	0,12 m ² - 4,7 g	3,70	0,15
Fralda descartável	1 unidade (40,2 g)	173,45	8,05
Total (ano)		811,95	64,01
Total diário		2,23	0,18

Os alimentos foram a parcela presente no cotidiano de maior intensidade exérgica e de maior impacto ambiental, por terem um considerável volume de consumo. Os produtos de limpeza, por sua vez, apesar da intensidade energética de uma unidade, são consumidos em menor quantidade.

4. CONCLUSÃO

Foi possível avaliar o efeito de variáveis relacionadas ao uso dos eletrodomésticos sobre a eficiência e consumo destes, e fazer comparações entre as tecnologias empregadas. Conclui-se que a análise exérgica é satisfatória para estes fins, empregada como ferramenta que permite a comparação entre tecnologias diferentes, que fornece uma interpretação sobre a qualidade dos processos de conversão de energia.

Em termos de sustentabilidade, o consumo isolado de exergia (energia elétrica e gás) não foi responsável pela maior parte das emissões do indivíduo em questão, o que se relaciona à participação das energias renováveis na matriz energética brasileira. Constatou-se que os alimentos foram os itens de maior intensidade na demanda de recursos, e os de maior pegada de carbono.

5. REFERÊNCIAS

- MADY, C.E.K. et al. - Entropy, 2020
- FILOGÔNIO, L.M. - Trabalho de conclusão de curso, Universidade Estadual de Campinas, 2016.
- MOSQUIM, R.F et al. - Journal of Cleaner Production, 2018.
- SZARGUT, J et al. - Hemisphere, 1988.
- SANQUETTA, C.R. et al. - BIOFIX Scientific Journal, 2017.
- EPE - Balanço Energético Nacional, 2019.
- MORAN, M.J. et al. - Princípios de Termodinâmica para engenharia. - 4a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- INMETRO – Programa Brasileiro de Etiquetagem, 2016.
- DINCER, I. - Energy Policy, 2000; 30:137-149.
- STALEY, D.M. et. al. - Air Conditioning and Refrigeration Center. University of Illinois, 1992.
- FOGÁS- <https://www.fogas.com.br/residencia/propriedade-glp/>
- COPERGÁS – <https://www.copergas.com.br/produtos/>
- ROSEN, M.A. et al. - Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact - 2007
- KOEHLER, A., et al. - Environ. Sci. Technol. 2009, 43, 8643–8651
- WALLÉN, A. et al. - Environmental Science & Policy 7 (2004) 525–535
- CPFL Energia - <<https://www.cpf.com.br/atendimento-a-consumidores/produtos-e-servicos/Paginas/historico-de-consumo.aspx>>
- PEDREIRA, N. de M. S. – Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017
- PHILIPPI, S. T. - Nutrition Today, Volume 40, Number 2
- VENTI, C.A., JOHNSTON, C.S. - American Society for Nutritional Sciences. J. Nutr. 132: 1050–1054, 2002.
- NUNES, F.A., et al. - Journal of Cleaner Production 139 (2016) 799e809.
- CARMO, H.F. et al. - Pesq. agropec. bras., Brasília, v.51, n.9, p.1069-1077, set. 2016
- PRUDÊNCIO DA SILVA, V. et al - Journal of Environmental Management 133 (2014) 222e231.
- NOTARNICOLA, B. et al. - Journal of Cleaner Production (2016)
- RUINI, L., MARINO, M. – LCA of semolina dry pasta produced by Barilla
- FUSI, A. et al. - Int J Life Cycle Assess (2016) 21:162–175
- FISHER, S. et al. - Proceedings of the 9th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector
- LOPES, J. et al. - Journal of Cleaner Production 170 (2018)
- CASTANHEIRA, E.G. et al. - Journal of Cleaner Production 54 (2013)
- PRUDÊNCIO DA SILVA, A.C. et al - Journal of Environmental Management 91 (2010)
- COLTRO, L., et al - Journal of Cleaner Production (2018)
- DE CARVALHO, A.M., et al - Public Health Nutrition: 16(10), 2012.
- ASEM-HIABLIE, S. et al - The International Journal of Life Cycle Assessment (2019) 24:441–455
- TSAROUHAS, P. et al - Journal of Cleaner Production (2015)
- RAJAEIFAR, M.A. et al. - Energy 66 (2014)
- LÉIS, C.M. et al - Int J Life Cycle Assess (2015)
- SEABRA, J.A. et al. - Biofuels, Bioprod. Bioref. 5:519–532 (2011)
- CORDELLA, M. et al - Journal of Cleaner Production 95 (2015)