



**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

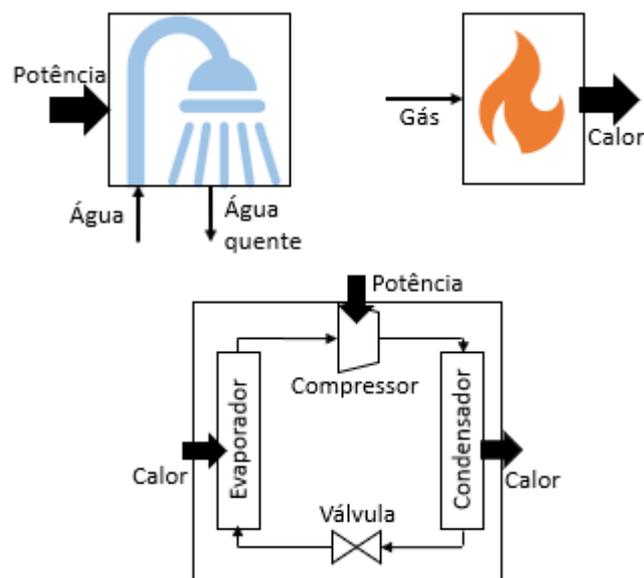
Muito tem sido feito e discutido em relação aos impactos ambientais associados à geração e utilização de energia. A análise exergética se apresenta como uma ferramenta capaz de apontar ganhos e perdas de eficiência de maneira quantitativa (Rosen et al, 2007), capaz de conciliar aspectos econômicos, ambientais 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 °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 m<sup>3</sup>/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.

$$COP = \frac{Q_{ev}}{W_{in}} \quad (3)$$

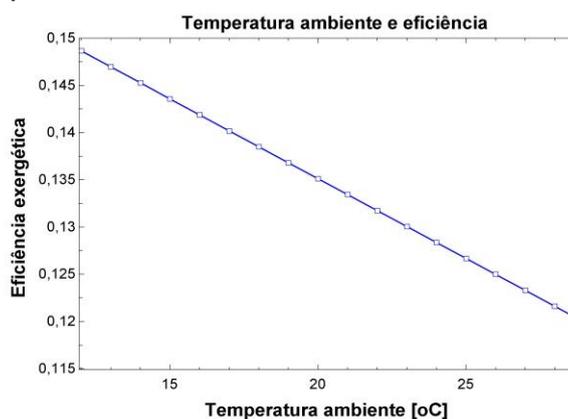
$$\eta_{ex} = COP \left[ 1 - \frac{T_0}{T} \right] \quad (4)$$

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)

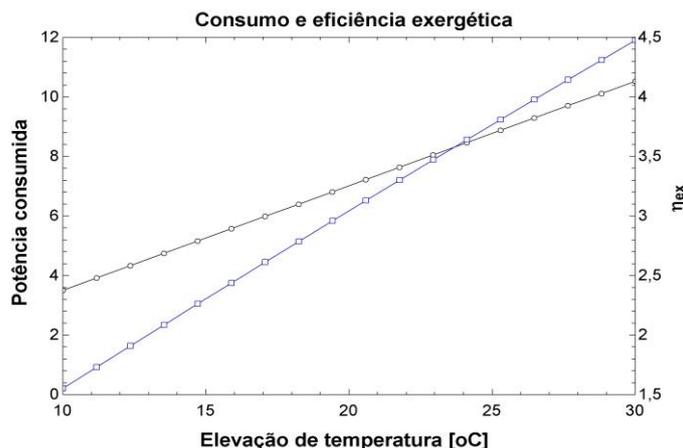


**Figura 2. Eficiência exergética em função da temperatura ambiente.**

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 CO<sub>2</sub> na queima. Observa-se que o gás natural tem produção ligeiramente menor de CO<sub>2</sub>, 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).

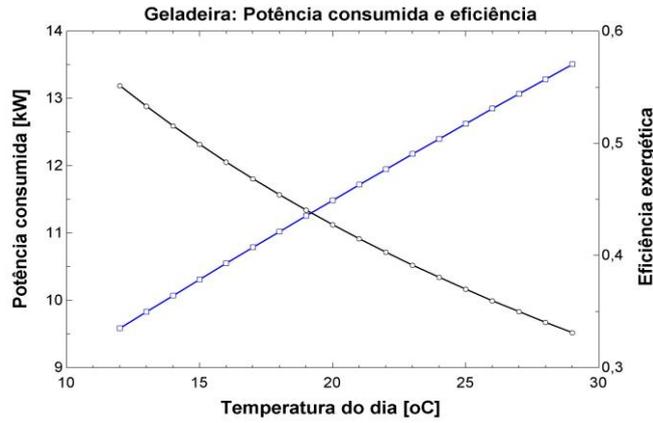


**Figura 3 Eficiência exergética e potência consumida para o chuveiro elétrico.**

#### 3.4. Itens de consumo cotidiano

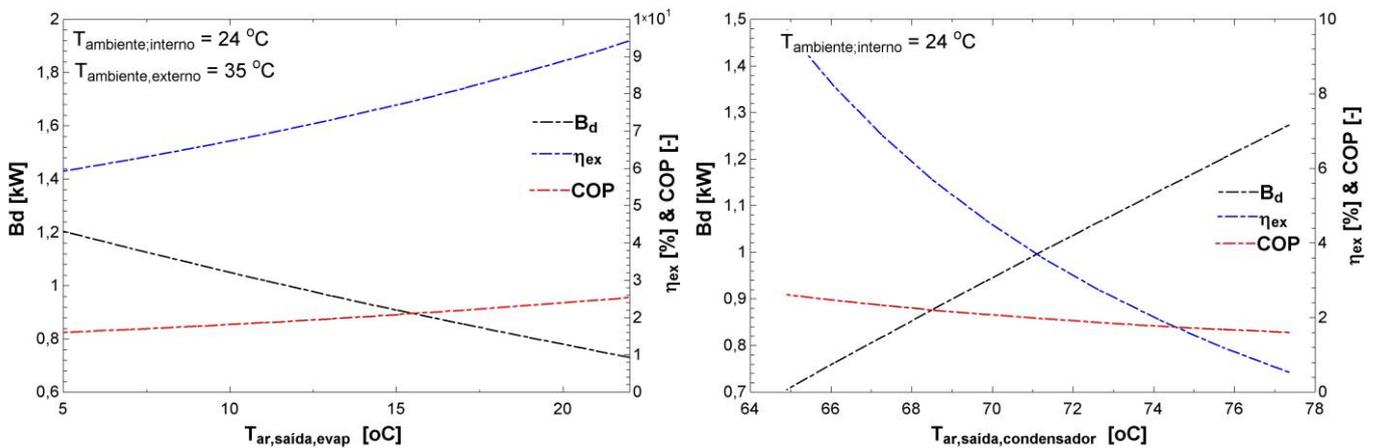
Foi estudada a influência de outros hábitos de consumo no comportamento exergético da residência, por meio do levantamento de hábitos relacionados a itens presentes no cotidiano. Para esta seção, considerou-se o consumo de alimentos e de alguns produtos de limpeza. Considerou-se a possibilidade de duas 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.

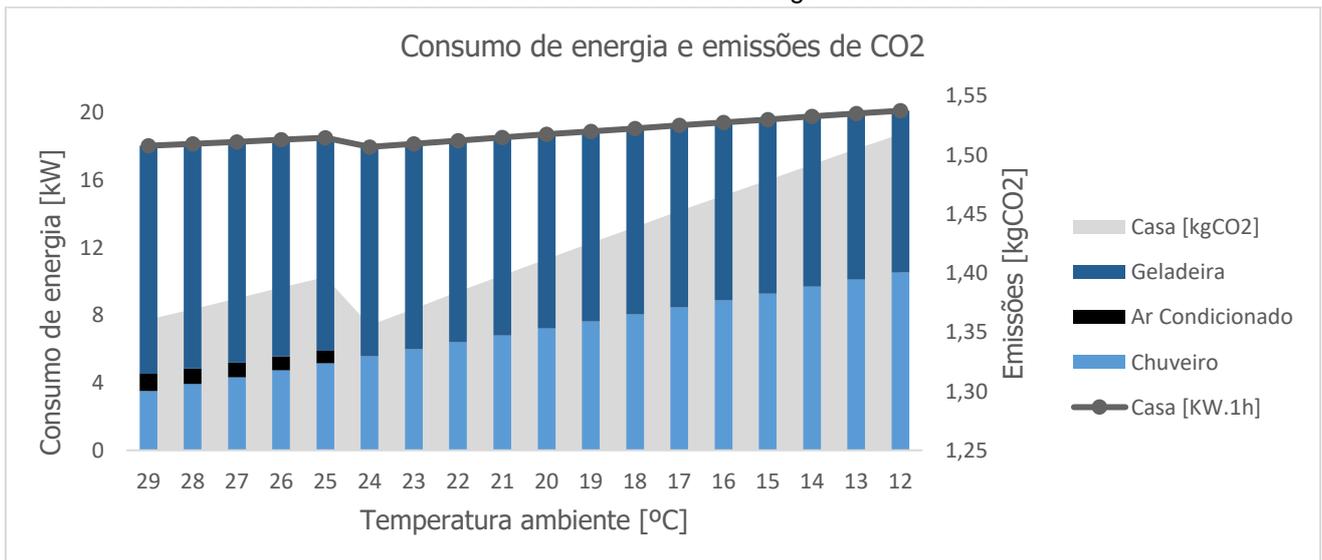


**Figura 5. Exergia destruída, eficiência e COP em função de a) temperatura do ar na saída do evaporador e b) temperatura do ar na saída do condensador.**

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:

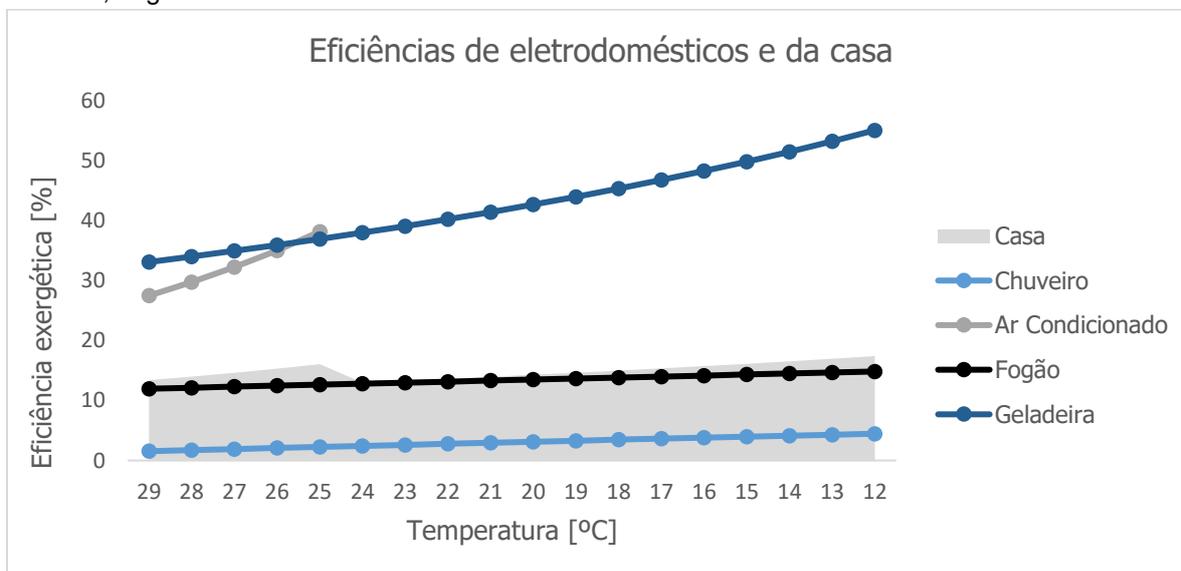


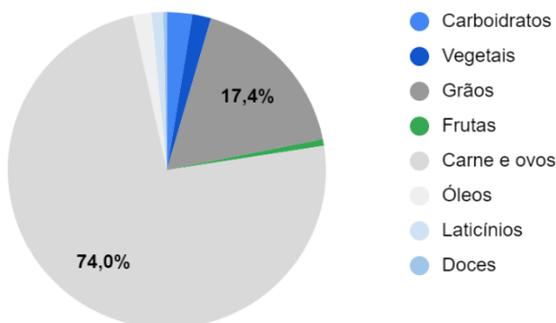
Figura 7: Eficiência exergética da casa e dos eletrodomésticos.

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)

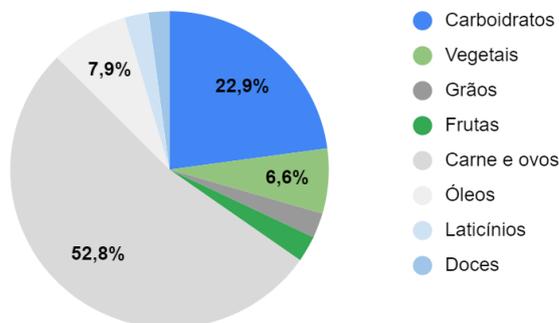


Figura 8. a) e b) Pegada de exergia e carbono para os grupos alimentares estudados.

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

Dieta	Quantia máx [g]	Quantia mín [g]	Pegada máx de CO2 [kg]	Pegada mín de CO2 [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 <sup>2</sup> - 4,7 g	6,40	0,06
Produtos para cozinha	0,24 m <sup>2</sup> - 4,7 g	1,31	0,06
Produtos para janelas	0,12 m <sup>2</sup> - 4,7 g	3,70	0,15
Fralda descartável	1 unidade (40,2 g)	173,45	8,05
<b>Total (ano)</b>		<b>811,95</b>	<b>64,01</b>
<b>Total diário</b>		<b>2,23</b>	<b>0,18</b>

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)