

AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE EVAPORADORES PARA USINAS DE AÇÚCAR

ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF EVAPORATORS FOR SUGAR MILLS

Lino José Cardoso Santos

Engenheiro Químico, Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Consultor. São Paulo – SP, Brasil.

linojose@uol.com.br

Jorge Alberto Soares Tenório

Engenheiro Metalurgista, Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Professor Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

RESUMO

As usinas de açúcar no Brasil utilizam intensamente tubos para evaporadores construídos em aço carbono, um material de baixo custo, mas com pequena resistência a corrosão, o que acarreta a sua substituição em poucos anos. O material mais adequado para a substituição do aço carbono é o aço inoxidável, de excelentes características mecânicas e inércia química, sendo, entretanto, considerado um material caro. Este trabalho avaliou o desempenho ambiental de tubos para evaporadores de usinas de açúcar construídos em aço carbono e, comparativamente, com os aços inoxidáveis AISI 304, 444 e 439. Para este estudo foi utilizada a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) até a etapa de avaliação de impacto ambiental. O período de avaliação destes sistemas foi de trinta anos. Os resultados deste estudo mostraram que os tubos fabricados em aço carbono apresentaram maior impacto ambiental que os tubos em aços inoxidáveis

Palavras chave: Avaliação do ciclo de vida, evaporadores usinas açúcar, aços inoxidáveis, aço carbono, sustentabilidade.

ABSTRACT

The sugar plants in Brazil have been used intensely evaporators pipes constructed with carbon steel, a material of low price but with small corrosion resistance, what it causes its substitution in few years. The material more indicated for the substitution of carbon steel is the stainless steel, because it has an excellent mechanical and chemical characteristics, however, it is considered an expensive material. This work evaluates the environmental performance of evaporators pipes constructed with carbon steel and with AISI 304, 444 and 439 stainless steels. The evaluation time was thirty years. From the LCA results, there were concluded that the steel carbon pipes presented more environmental impact performance than 304, 444, and 439 stainless steel.

Keywords: Life cycle assessment, sugar mills evaporators, stainless steels, carbon steel, sustainability.

INTRODUÇÃO

O setor de açúcar e álcool etílico no Brasil tem experimentado grande crescimento. Contribui para isto, tanto o álcool etílico, um biocombustível cada vez mais consumido em todo o mundo, quanto o açúcar, com exportações também crescentes, principalmente após a redução dos subsídios agrícolas ao açúcar de beterraba na União Europeia (RORIZ, 2006).

A área industrial produtora de açúcar, um alimento, ainda convive com uma prática industrial ultrapassada que vem a ser o uso maciço de aço carbono, um material de baixo custo, mas com pequena resistência a corrosão. O material mais adequado para a substituição do aço carbono é o aço inoxidável, com excelentes características mecânicas e inércia química (CARBÓ, 2001). Os aços inoxidáveis são, entretanto, materiais de custo mais elevado.

Em uma usina de açúcar, o sistema de evaporação ou evaporadores é um dos equipamentos de maior importância para o seu adequado desempenho energético e de produtividade. Nos evaporadores, cabe salientar a importância dos tubos de troca térmica, onde o caldo de cana a ser concentrado é aquecido por vapor. Esses tubos, quando em aço carbono, começam a ser trocados a partir da segunda safra. Enquanto isso, os tubos construídos em aço inoxidável podem durar décadas.

O presente trabalho avaliou o desempenho ambiental de tubos para evaporadores de usinas de açúcar fabricados em aço carbono e, comparativamente, com os aços inoxidáveis AISI 304, 444 e 439 (a designação AISI não mais será repetida neste texto). Para esta comparação foi utilizada a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) até a avaliação de impacto ambiental (SANTOS, 2007).

AVALIAÇÃO AMBIENTAL

Na elaboração deste estudo foram utilizados procedimentos estabelecidos pelas normas ABNT NBR ISO 14040, ABNT NBR ISO 14041, ABNT NBR ISO 14042 e ABNT NBR ISO 14043 (ABNT 2004, 2005), a seguir detalhados.

Definição de objetivo e escopo

O objetivo deste trabalho foi a avaliação ambiental de um evaporador para usinas de açúcar com cinco efeitos, cujos tubos foram fabricados em aço carbono com 2,65 mm de espessura e, comparativamente, com os aços inoxidáveis 304, 444 e 439. Para os aços 304 e 444 foram usados tubos com 1,20 e 1,50 mm de espessura, respectivamente. Para o aço 439, foram usados tubos com 1,50 mm de espessura. Estes tubos possuíam diâmetro externo igual a 38,10 mm. Como os evaporadores são equipamentos de grande durabilidade, foi adotado um período de avaliação de trinta anos.

Justificaram a realização deste estudo a pequena durabilidade dos tubos em aço carbono, a inexistência de estudos comparativos de avaliação ambiental de equipamentos para usinas de açúcar construídos com diferentes tipos de aços, e o fato de a avaliação ambiental ainda não fazer parte do processo de decisão dos empresários do setor de açúcar quanto a investimentos ou reformas.

O público alvo deste trabalho são os empresários, profissionais, pesquisadores e acadêmicos do setor açucareiro e do setor de inox.

A função do sistema de produto desta ACV é evaporar parte da água presente no caldo de cana clarificado. A massa de água a ser evaporada pelo evaporador em estudo, igual a $20 \cdot 10^6$ t (ou 20 Mt), foi escolhida como unidade funcional.

Para o cálculo da superfície de troca térmica de um evaporador capaz de atender à unidade funcional estabelecida, foram adotadas as seguintes considerações:

Taxa de evaporação de um evaporador com cinco efeitos igual a 30 kg/h/m^2 (DUNOD, 1977);

Período anual efetivo da safra de açúcar igual a 210 dias;

Período de tempo do estudo igual a trinta anos.

Com estes dados foi calculada a superfície de troca térmica:

$$\text{SUPERFÍCIE TROCA TÉRMICA (m}^2\text{)} = 20 \cdot 10^6 \text{ t} / 210(\text{dias/ano}) \times 24 \text{ (h/dia)} \times 30 \text{ (anos)} \times 0,03 \text{ (t/h/m}^2\text{)} = 4.400 \text{ m}^2$$

Como superfície de troca térmica entende-se a superfície interna dos tubos (DUNOD, 1977). Com este valor de superfície de troca térmica foi adotado um evaporador com cinco efeitos, sendo o primeiro ou pré-evaporador com 2.000 m^2 e os demais quatro efeitos com 600 m^2 de superfície de troca térmica.

Para o cálculo das quantidades de tubos deste evaporador, no primeiro efeito foram usados tubos com 4.000 mm de comprimento total e nos demais efeitos, tubos com 3.000 mm. Foram considerados espelhos com 31,75 mm de espessura e altura de mandrilamento igual a 10 mm. Desta forma, o comprimento útil para troca térmica dos tubos passou a ser 3.916,5 e 2.916,5 mm, respectivamente.

Como vida útil “média” para os tubos fabricados em aço carbono e nos aços inoxidáveis foram adotados os períodos de seis e trinta anos, respectivamente. Estes valores foram obtidos após inúmeras visitas a usinas de açúcar no período de 2004 a 2006, bem como contatos com professores e pesquisadores do setor de açúcar. Para os tubos em aço inoxidáveis, predominou a experiência da Usina Pumaty S.A., em Pernambuco, que utiliza tubos em aço 304 com 1,60 mm de espessura, desde a safra de açúcar de 1974, sem evidência significativa de desgaste.

Para os aços inoxidáveis foram consideradas trocas de 1% dos tubos a cada seis anos devido, exclusivamente, às falhas na fixação dos tubos aos espelhos (falhas no mandrilamento).

A Tabela 1 apresenta os dados relativos aos diferentes tipos de tubos em análise, bem como os fluxos de referência dos sistemas de produto, calculados a partir dos dados e considerações citadas anteriormente (SANTOS, 2007).

Tabela 1 – Parâmetros básicos relacionados aos sistemas de produto

PARÂMETROS		SISTEMAS DE PRODUTO					
		Aço-C	304		444		439
Espessura da Parede (mm)		2,65	1,20	1,50	1,20	1,50	1,50
Superfície Interna para Troca Térmica (m ² /m)		0,1030	0,1122	0,1103	0,1122	0,1103	0,1103
Massa por Metro Linear (kg/m)		2,32	1,11	1,37	1,09	1,35	1,32
Densidade (g/cm ³)		7,8	8,1		7,8		7,7
1º Efeito	Nº Tubos	4.958	4.551	4.630	4.551	4.630	4.630
	Massa do Efeito (t)	46,0	20,2	25,4	19,8	24,8	24,5
2º - 5º Efeitos	Nº Tubos	7.989	7.334	7.461	7.334	7.461	7.461
	Massa dos 4 Efeitos (t)	55,6	24,4	30,7	24,0	30,2	29,6
Número total de Tubos		12.947	11.885	12.091	11.885	12.091	12.091
Massa Total do Sistema (t)		101,6	44,6	56,1	43,8	55,0	54,1
Fluxo de Referência (t)		508,0	46,8	58,9	46,0	57,8	56,8

FONTE: SANTOS (2007)

Sistemas de Produtos dos Tubos em Aço Carbono e Aços Inoxidáveis

Este estudo de avaliação ambiental considerou seis sistemas de produtos, tendo em vista os tipos de aços em análise e as espessuras dos tubos mais frequentemente utilizadas no setor açucareiro. A Figura 1 apresenta um fluxograma representativo para estes sistemas de produtos (SANTOS, 2007).

Os subsistemas informados em caixas assinaladas por linhas cheias referem-se ao fluxo principal do sistema de produto, enquanto que os assinalados em linhas tracejadas representam os subsistemas auxiliares.

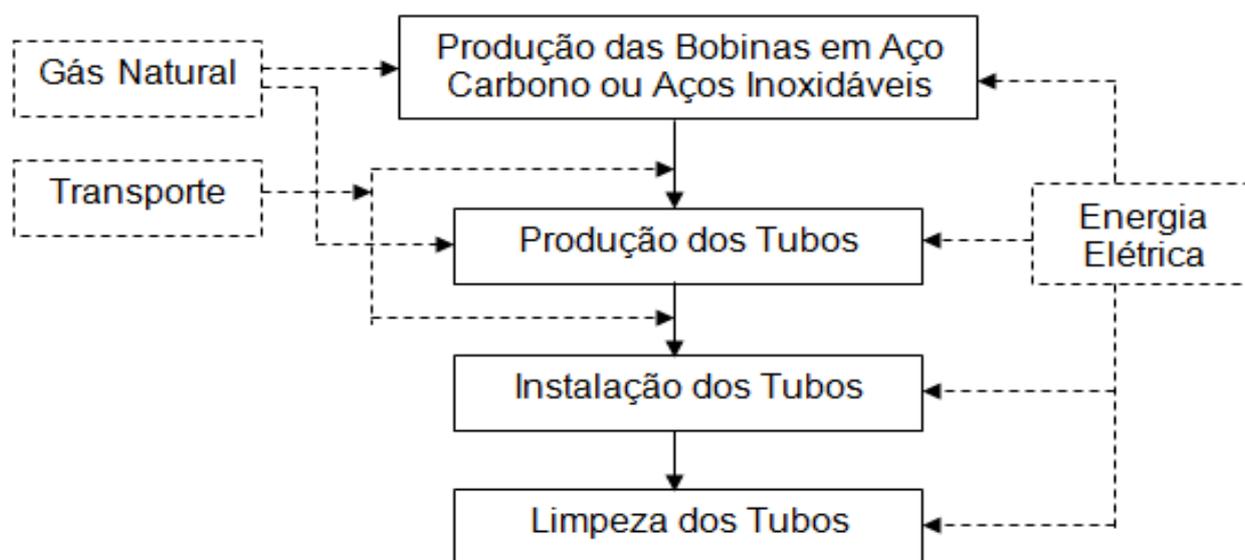


Figura 1 – Fluxograma do sistema de produto dos tubos em aço carbono ou dos tubos em aço inoxidável

FONTE: SANTOS (2007)

Fronteiras dos Sistemas de Produtos

Os seis sistemas de produtos em avaliação apresentaram estruturas semelhantes, o que justificou uma abordagem em conjunto com relação às fronteiras adotadas. As fronteiras adotadas foram (SANTOS, 2007):

Nos subsistemas relativos à produção das bobinas de aços foram considerados os subsistemas relacionados à obtenção das matérias-primas e energia, produção de ferro gusa e demais etapas de processo que antecedem à produção das bobinas. As bobinas foram produzidas em uma usina siderúrgica integrada, localizada a 250 km da grande São Paulo;

No subsistema produção dos tubos foi excluído o subsistema laminação, já que as lâminas para a produção destes tubos foram recebidas nas suas espessuras definitivas e laminadas (para os aços inoxidáveis);

No subsistema energia elétrica foram consideradas apenas as quantidades consumidas. A construção de usinas, operação, transporte e a cogeração de energia elétrica não foram considerados;

No subsistema transporte foram excluídos os subsistemas relacionados à produção dos veículos e à construção das estradas de rodagem utilizadas. Os tubos foram transportados via estrada de rodagem até uma usina de açúcar distante 430 km de São Paulo.

Como fronteira temporal foi considerado o período 2004 a 2006, no qual os dados foram coletados.

Procedimentos de Alocação

Nos subsistemas produção das bobinas de aço carbono e dos aços inoxidáveis, as fronteiras dos mesmos foram ampliadas de forma a incluir as funções adicionais aos coprodutos. Para os demais subsistemas foi considerado que eles não geraram coprodutos ou cargas ambientais a serem alocadas.

Inventário do ciclo de vida (ICV)

O ICV tem como objetivo quantificar as entradas e saídas de um sistema de produto, considerando os diferentes aspectos ambientais representativos e quantificáveis, as categorias de impacto e as fronteiras, relacionando-os à unidade funcional (SANTOS, 2007).

Coleta dos Dados

Como os sistemas de produto apresentavam uma estrutura semelhante, a coleta dos dados foi feita por subsistemas.

Subsistema produção das bobinas de aço carbono

Para este subsistema foi utilizado o ICV para lâminas de aço carbono fabricadas via rota de alto forno, por 1000 kg de produto (IISI, 2002).

Subsistemas produção das bobinas dos aços inoxidáveis

Para o aço 304 foi utilizado o ICV por 1000 kg de produto (ISSF, 2005).

Os dados de ICV das bobinas dos aços 444 e 439 foram calculados a partir dos valores apresentados para o aço 430 2B por 1000 kg de produto (ISSF, 2005), com os acertos de composição necessários e ajustes das entradas e saídas para alguns aspectos ambientais, tomando como base informações disponíveis na literatura especializada (KIRK-OTHMER, 1991).

Subsistema produção dos tubos

Na fabricação desses tubos foram usados dados representativos de uma indústria localizada na grande São Paulo (Informações coletadas em visita à firma PERSICO PIZZAMIGLIO S. A., em 2006).

Estes dados foram:

- Perda na produção de tubos em aço carbono: 18%;
- Perda na produção de tubos em aço inoxidável: 6%;
- Consumo energia elétrica: 329,0 MJ / 1000 tubos e,
- Consumo gás natural: 24,0 kg / 1000 tubos.

Subsistema instalação dos tubos

A fixação dos tubos nos espelhos superior e inferior da calandra foi realizada com o auxílio de um mandril movido a energia elétrica. O consumo energético foi (Dados obtidos na Usina de Açúcar Vale do Rosário, em 2005):

- Para 1000 tubos em aço carbono: 7.950 MJ; e,
- Para 1000 tubos em aço inoxidável: 6.912 MJ.

Esta diferença deveu-se à maior resistência mecânica dos tubos em aço carbono à deformação.

Subsistema limpeza dos tubos

Foi usado como referência para a limpeza mecânica de um evaporador com cinco efeitos, os dados relativos a um evaporador com 18.480 tubos, onde são necessários, por limpeza:

- 120.000 L de água tratada;
- 558 MJ de energia elétrica.

Para os tubos em aço carbono e nos aços inoxidáveis foi admitida uma frequência de limpeza de dez e quinze dias, respectivamente. Esta diferença deveu-se ao maior polimento interno dos tubos em aço inoxidável, o que contribui para a menor retenção de incrustações (ROSÁRIO, 2005).

Subsistema gás natural

O gás natural entra como fonte de energia e agente redutor. Na sua combustão completa são emitidos CH₄, SO₂ e NO₂. Neste trabalho foi considerado um gás natural com 2% V/V de N₂, 70 mg/m³ de S e um poder calorífico igual a 57,6 MJ/kg (WHITE MARTINS, 2007).

Subsistema transporte

Neste subsistema foi considerada a transferência das bobinas de aço das usinas até a fábrica de tubos localizada na grande São Paulo e o transporte dos tubos até uma usina de açúcar distante 430 km dessa cidade, via transporte rodoviário. As bobinas de aço carbono foram fabricadas a 250 km de São Paulo, enquanto que as de aços inoxidáveis a 770 km. Para o transporte das bobinas foram usadas carretas para 24 t, que percorrem 2 km/L de óleo diesel. Os tubos foram transportados em caminhão tipo “truck”, que carregam 12 t e percorrem 3,2 km/L de óleo diesel.

A composição química típica do óleo diesel utilizado é:

C: 87% H: 12,6% O: 0,04% N: 0,006% e S: 0,22%

O poder calorífico inferior para a combustão completa desse óleo diesel é igual a 12.882 kcal/L (BRASIL, 2002).

Avaliação de impacto ambiental

Concluída a fase de ICV, todos os dados referentes aos subsistemas foram agrupados por sistema de produto. Os resultados relativos a cada sistema de produto foram consolidados em uma nova planilha, onde foi possível comparar o desempenho ambiental de cada sistema de produto (SANTOS, 2007).

Nos estudos desenvolvidos pelo Internacional Iron and Steel Institute (IISI, 2002) relativos aos ICVs das lâminas de aço carbono foram computados quarenta e dois aspectos ambientais que atenderam às demandas de matéria-prima, emissões sólidas, líquidas e gasosas e os diferentes tipos de energia utilizados. Independentemente deste levantamento tão completo, na avaliação ambiental foram considerados apenas sete aspectos ambientais, justamente os mais representativos ambientalmente para o setor siderúrgico. Os aspectos ambientais selecionados foram:

- Dióxido de carbono (CO₂);
- Óxidos de nitrogênio (NO_x);
- Materiais particulados;
- Óxidos de enxofre (SO_x);
- Materiais suspensos;
- Resíduos totais; e,
- Energia total.

Como os subsistemas relativos à produção das bobinas de aços contribuem quali/quantitativamente com 90 %, aproximadamente, dos aspectos ambientais avaliados neste estudo, eles foram mantidos nesta avaliação (IISI, 2002 e ISSF, 2005). Os autores deste estudo acrescentaram mais dois, a saber:

- Somatório dos recursos naturais não renováveis consumidos (carvão metalúrgico, lignita, óleo, gás natural, calcita, dolomita e minérios de ferro, cromo, manganês e molibdênio);
- Água utilizada.

A Tabela 2 apresenta os aspectos ambientais consolidados para todos os sistemas de produtos estudados. Esta Tabela permite formular uma avaliação ambiental objetiva e de fácil compreensão. Os dados desta tabela mostram que o sistema de produto tubos em aço carbono, quando comparado com os valores “médios” relativos aos sistemas de produto tubos em aços inoxidáveis, emitiu mais que:

- 4,2 vezes a quantidade de CO₂;
- 2,8 vezes a quantidade de NO_x;
- 3,1 vezes a quantidade de materiais particulados;
- 13 vezes a quantidade de materiais suspensos;
- 4,5 vezes a quantidade de resíduos totais.

De forma semelhante, o sistema de produto tubos em aço carbono consome mais que:

- 11,4 vezes a quantidade de recursos naturais não renováveis;
- 1,7 vezes a quantidade total de água utilizada; e,
- 5,3 vezes a quantidade total de energia.

O sistema de produto tubos em aço carbono revelou-se menos impactante ao meio ambiente quando comparado com os sistemas de produto tubos em aço inoxidável 304, ao emitir a metade das quantidades de óxidos de enxofre, aproximadamente (foi cortada uma frase deste parágrafo que estava duplicada).

Os sistemas de produtos tubos em aço carbono e em aços inoxidáveis 444 e 349 emitiram quantidades semelhantes de óxidos de enxofre.

É importante ressaltar que as emissões de óxidos de enxofre dos tubos fabricados com aços inoxidáveis informadas neste estudo estão superestimadas com relação à realidade brasileira, já que a matriz energética dos países em que estes dados foram coletados, a saber: Estados Unidos, Canadá, Europa e Ásia (ISSF, 2005), tiveram uma predominância da termoeletricidade, gerada a partir de carvão mineral com alto teor de enxofre.

CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou a comparação de desempenho ambiental dos tubos para evaporadores construídos em aço carbono e em aços inoxidáveis, por meio da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida.

Os resultados desta avaliação ambiental mostraram que o sistema de produto dos tubos em aço carbono ocasiona impactos ambientais maiores que os sistemas de produtos dos tubos em aços inoxidáveis AISI 304, 444 e 439, já que:

1) Emitiu mais que:

- 4,2 vezes a quantidade de dióxido de carbono;
- 2,8 vezes a quantidade de óxidos de nitrogênio;
- 3,1 vezes a quantidade de materiais particulados;
- 13 vezes a quantidade de materiais suspensos; e,
- 4,5 vezes a quantidade de resíduos totais.

2) Consumiu mais que:

- 11 vezes o total de recursos naturais não renováveis;
- 1,8 vezes a quantidade de água utilizada; e,
- 5 vezes a quantidade de energia primária total.

3) Os sistemas de produtos tubos em aço carbono e aços inoxidáveis AISI 444 e 439 emitiram quantidades semelhantes de óxidos de enxofre

4) O sistema de produto tubos em aço carbono é menos impactante ao meio ambiente apenas quando comparado com o sistema de produto tubos em aço inoxidável AISI 304 quanto à emissão de óxidos de enxofre, já que emitiu menos que a metade deste poluente. É importante salientar que as emissões de óxidos de enxofre dos tubos em aços inoxidáveis informadas neste estudo estão superestimadas, já que a matriz energética dos países em que os dados foram coletados tem uma predominância da termoeletricidade, gerada a partir de carvão mineral que contém enxofre (ISSF, 2005).

Os resultados deste estudo mostraram que a avaliação ambiental deve ser usada na seleção de materiais que contribuem para a sustentabilidade ambiental de projetos do setor industrial açucareiro.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com a colaboração do Núcleo de Desenvolvimento Técnico do Aço Inoxidável – NÚCLEO INOX, atual Associação Brasileira do Aço Inoxidável – ABINOX.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida - princípios e estrutura. Rio de Janeiro, ABNT, 2001.
- _____. NBR ISO 14041: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: definição de objetivo e escopo e análise de inventário. Rio de Janeiro, ABNT, 2004.
- _____. NBR ISO 14042: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: avaliação do impacto do ciclo de vida. Rio de Janeiro, ABNT, 2004.
- _____. NBR ISO 14043: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: interpretação do ciclo de vida. Rio de Janeiro, ABNT, 2005.
- BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Condições padrões de medição –20°C, 101,325 kPa. Portaria ANP Nº 104, de 08.07.2002. **Diário Oficial da União - República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 09 jul. 2002.
- CARBÓ, H. M. In: **Aço inoxidável: aplicações e especificações**. São Paulo: Núcleo Inox, 2001. Disponível em: http://www.nucleoinox.com.br/new/downloads/Acesita_Aplica_Especificica.pdf Acesso em: 04 de fevereiro de 2007.
- DUNOD, E. **Manual da engenharia açucareira**. São Paulo: Mestre Jou, 1977.
- INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE - IISI. **World Steel Life Cycle Inventory – Worldwide LCI Database for Steel Industry Products, Report 1999-2000**. Brussels: IISI. 2002.
- INTERNATIONAL STAINLESS STEEL FORUM. – ISSF. **LCI and LCA data to stainless steel production**. Brussels: ISSF 2005. Disponível em: www.extranet.worldstainless.org/worldstainless/portal/categories/lci_lca/. Acesso em: 11 de julho de 2006.
- KIRK-OTHMER ENCYCLOPEDIA OF CHEMICAL TECHNOLOGY. New York: Wiley Interscience, 1991.
- RORIZ, J. As novas fronteiras da cana. **Revista Dinheiro Rural**, São Paulo, v. 3, n. 17, p 24-26, mar. 2006.
- SANTOS, L. J. C. **Avaliação do ciclo de vida e custeio do ciclo de vida de evaporadores para usinas de açúcar**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia). EP, USP, São Paulo: setembro, 2007. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-08012008-151424/>
- WHITE MARTINS. Rio de Janeiro. **Gás natural**. Disponível em: <http://www.whitemartins.com.br/sites/produtosservicos/industriaiswn035725.jsp>. Acesso em: 17 de fevereiro de 2007.