

# INOX: Açúcar & Álcool

## Avaliação do ciclo de vida e custeio do ciclo de vida de evaporadores para usinas de açúcar

Life cycle assessment and life cycle cost of sugar plants evaporators

### Resumo

As usinas de açúcar no Brasil utilizam aço-carbono, um material de baixo custo, mas com pequena resistência à corrosão. Os aços inoxidáveis são os materiais mais adequados para a sua substituição, entretanto eles são considerados caros. Foi realizada a avaliação ambiental e financeira de tubos para evaporadores de usinas de açúcar construídos em aço-carbono e, comparativamente, com os aços inoxidáveis do tipo AISI 304, 444 e 439. Para a avaliação ambiental, foi utilizada a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que mostrou que os aços inoxidáveis são ambientalmente mais eficientes. Para a avaliação financeira, foi utilizado o Custeio do Ciclo de Vida (CCV), que mostrou que os tubos em aços inoxidáveis são opções de investimento mais interessantes. O período de tempo dessas avaliações foi igual há trinta anos. Os resultados obtidos mostram que a ACV e o CCV devem ser usados em conjunto, pois mostram que produtos mais seguros ambientalmente podem vir a ser opções de investimentos também mais interessantes.

**Palavras-chave:** ACV - Avaliação do Ciclo de Vida, CCV - Custeio do Ciclo de Vida, tubos para evaporadores, usinas de açúcar, aço-carbono, aço inoxidável, seleção de materiais, sustentabilidade.

### Abstract

*The evaporators of sugar plants in Brazil have used carbon steel intensively because of it is, a low priced material, which possesses inferior corrosion resistance. The materials more indicated for the substitution of carbon steel are stainless steels, however, they are considered expensive. The environmental and financial performances of evaporator pipes constructed with carbon steel and with types AISI 304, 444 and 439 stainless steel were evaluated. For the environmental evaluation, the Life Cycle Assessment (LCA) methodology was used and it, revealed that stainless steel is more environmentally efficient than carbon steel. The life cycle costing (LCC) technique was the tool chosen for the financial evaluation and it showed that stainless steel is a better investment option compared to carbon steel. The results also indicate that LCA and LCC methodologies must be used together. Therefore, it can be seen that safer environmental products can come to be the most profitable investment options.*

**Keywords:** Life Cycle Assessment - LCA, Life Cycle Costing - LCC, pipes, evaporators, sugar plant, carbon steel, stainless steel, materials selection, sustainability.

Lino José Cardoso Santos

Consultor  
E-mail: linojose@uol.com.br

Jorge Alberto S. Tenório

Escola Politécnica - USP  
E-mail: jtenorio@usp.br

### 1. Introdução

As usinas fabricantes de açúcar ainda convivem com uma prática industrial ultrapassada, que vem a ser o uso maciço de aço-carbono, um material de baixo custo, mas com pequena resistência à corrosão. Os materiais mais adequados para a

substituição do aço-carbono são os aços inoxidáveis, com excelentes características mecânicas e inércia química (Sugar, 2006). Os aços inoxidáveis são, entretanto, materiais de custo mais elevado.

Em uma usina de açúcar, dois conjuntos de equipamentos são fundamentais aos seus resultados: o sistema de moagem ou de difusão e os evaporadores.

Nos evaporadores, cabe salientar a importância dos tubos de troca térmica, onde o caldo de cana em concentração é aquecido por vapor.

O presente trabalho avaliou o desempenho ambiental e o financeiro de tubos para evaporadores de usinas de açúcar fabricados com aço-carbono e com os aços inoxidáveis AISI 304, 444 e 439. Para essas comparações, foram utilizadas a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (Chehebe, 1998) e a técnica de Custeio do Ciclo de Vida (CCV) (Matern, S. 2002), respectivamente.

## 2. Material e métodos

### 2.1 Avaliação do ciclo de vida (ACV)

Na elaboração desse estudo, foram utilizados os procedimentos estabelecidos pelas normas ABNT NBR ISO 14040, ABNT NBR ISO 14041, ABNT NBR ISO 14042 e ABNT NBR ISO 14043, a seguir detalhados.

#### 2.1.1 Definição de objetivo e escopo

O objetivo desse estudo de ACV 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, compará-los com os aços inoxidáveis AISI 304, 444 e 439. Para os aços AISI 304 e 444, foram usados tubos com 1,20 e 1,50 mm de espessura, respectivamente. Para o aço AISI 439, foram usados tubos com 1,50 mm de espessura. Esses tubos possuem um 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 desse estudo a pequena durabilidade dos tubos em aço-carbono, a inexistência de estudos comparativos de ACV de equipamentos para usinas de açúcar construídos com diferentes tipos de aços e o fato de a avaliação ambiental desses equipamentos ainda não ser comum no processo de decisão dos usineiros quanto a investimentos ou reformas.

O público-alvo desse trabalho são os empresários, profissionais, pesquisadores e acadêmicos do setor açucareiro e do setor siderúrgico.

Cada evaporador, em estudo, passou a ser chamado de “sistema de produto”. Como a função de um evaporador é evaporar a água presente no caldo de cana clarificado, foi escolhida, como unidade funcional dessa ACV, a massa de água igual a  $20 \cdot 10^6$  t (ou 20 Mt).

Para o cálculo da superfície de troca térmica desses evaporadores, foram adotadas as seguintes considerações:

- Taxa de evaporação de um evaporador com cinco efeitos igual a  $30 \text{ kg} / \text{h} \times \text{m}^2$  (Dunod, E., 1977).
- Período anual efetivo da safra de cana de açúcar igual a 210 dias.
- Período de tempo do estudo igual a trinta anos.

Com esses dados, foi calculada a superfície de troca térmica.

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

Como superfície de troca térmica entende-se a superfície interna dos tubos. Com esse valor de superfície de troca térmica foi adotado um evaporador com cinco efeitos, sendo o primeiro com  $2.000 \text{ m}^2$  e os demais com  $600 \text{ m}^2$  de superfície de troca térmica cada um.

Para o cálculo das quantidades de tubos desse evaporador, no primeiro efeito, foram usados tubos com 4.000mm 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. Dessa 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. Esses 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 nos aços inoxidáveis, predominou a experiência da Usina Pumaty S.A., em Pernambuco, que utiliza tubos em aço AISI 304 com 1,60 mm de espessura desde 1974, sem evidência significativa de desgaste.

Para os aços inoxidáveis, foi considerada a troca de 1% dos tubos a cada seis anos, devido, exclusivamente, às falhas no mandrilamento.

A Tabela 1 apresenta dados relativos aos diferentes tipos de tubos em análise, bem como as massas de tubos utilizadas no período de trinta anos (Santos, 2007).

#### 2.1.2 Sistemas de produtos dos tubos em diferentes tipos de aços

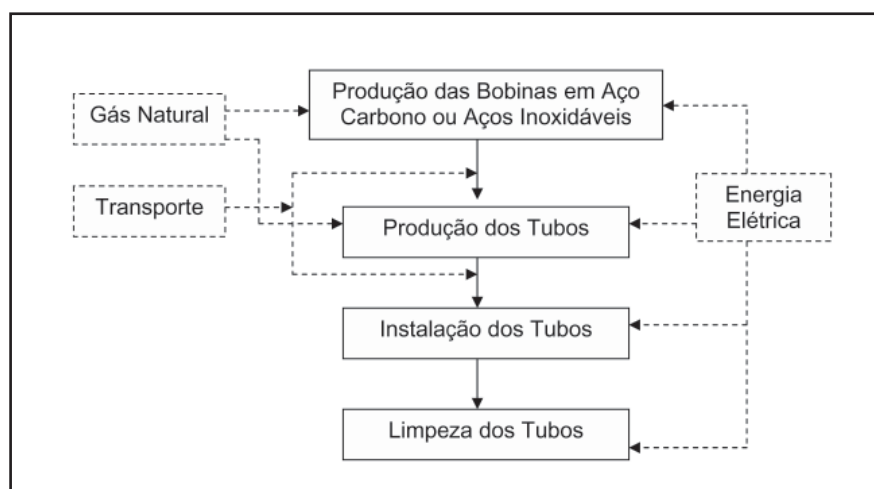
Em um estudo de ACV, devem ser considerados todos os aspectos ambientais relacionados ao material de interesse, tais como a extração das matérias-primas da natureza, o transporte, o beneficiamento, a produção, o uso, a reciclagem, a desativação, etc.

Nesse trabalho, foram considerados os seis subsistemas mais significativos relacionados aos tubos usados em evaporadores de usinas de açúcar. A Figura 1 apresenta um fluxograma representativo para os subsistemas considerados (Santos, 2007).

Nessa Figura, os subsistemas informados, em caixas assinaladas por linhas cheias, referem-se ao fluxo principal do

**Tabela 1** - Parâmetros característicos dos diferentes tipos de tubos.

PARÂMETROS	TIPOS DE TUBOS						
	Aço-C	AISI 304		AISI 444		AISI 439	
Espessura da Parede (mm)	2,65	1,20	1,50	1,20	1,50	1,50	
Superfície Interna para Troca Térmica (m <sup>2</sup> /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 <sup>3</sup> )	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 1º 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 dos Tubos por Vida Útil (t)	101,6	44,6	56,1	43,8	55,0	54,1	
Massa dos Tubos Usados em 30 Anos (t)	508,0	46,8	58,9	46,0	57,8	56,8	

**Figura 1** - Fluxograma dos sistemas de produtos dos tubos em diferentes tipos de aços.

sistema de produto, enquanto que os assinalados em linhas tracejadas representam os subsistemas auxiliares, que podem ser comuns a mais que um subsistema principal.

### 2.1.3 Inventário do ciclo de vida (ICV)

O ICV tem, como objetivo, quantificar todos os aspectos ambientais representativos relativos às entradas e saídas de um sistema de produto, às categorias de impacto e às fronteiras e relacionar esses dados à unidade funcional.

Como os sistemas de produto apresentam estruturas semelhantes, a coleta dos dados foi feita por subsistema.

#### 2.1.3.1 Subsistemas produção de bobinas de aço-carbono e de aços inoxidáveis

Para a produção de bobinas de aço-carbono, foi utilizado o ICV para lâminas de aço-carbono fabricadas via rota de alto-forno, por 1.000 kg de produto. Esses dados foram extraídos do *Appendix 7A, B: System Expansion vs. No Allocation, BF Route for Hot Rolled Coil and HDG*, que faz parte da publicação “*World Steel Life Cycle Inventory*”, do *International Iron and Steel Institute (IISI)*, *Appendix 5, Application of the IISI LCI data to Recyclings Scenarios*, editada em 2002. Esses dados têm sido utilizados em todo o mundo como resultados “médios” mundiais (*global average*),

em projetos de melhoria de processos e de reciclagem.

Para o aço inoxidável AISI 304 foi utilizado o ICV apresentado no “*Inventory: Stainless Steel World 304 2B for 1.000 kg Product*”, que faz parte do estudo *LCI/LCA of stainless steel: ISSF HLE Project 2003/2004, ISSF*.

Os dados de ICV das bobinas dos aços 444 e 439 foram calculados a partir dos valores apresentados no “*Inventory: Stainless Steel World 430 2B for 1.000 kg Product*”, que faz parte do estudo citado anteriormente, com os acertos de composição necessários e, também, com as devidas correções para alguns aspectos ambientais, tomando, como base, informações disponíveis na literatura especializada (Kirk-Othmer, 1991).

#### 2.1.3.2 Subsistema produção dos tubos

Na fabricação desses tubos, foram usados dados representativos de uma indústria localizada na grande São Paulo. Esses dados foram:

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

#### 2.1.3.3 Subsistema instalação dos tubos

A fixação dos tubos, nos espelhos superior e inferior da calandra, é realizada com o auxílio de um mandril movido a energia elétrica. O consumo energético foi:

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

Essa diferença deve-se à maior resistência mecânica dos tubos em aço-carbono e à deformação, em função da sua maior espessura.

### 2.1.3.4 Subsistema limpeza dos tubos

Para a limpeza mecânica de um evaporador com 18.480 tubos, são necessários:

- 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. Essa diferença deve-se ao maior polimento interno dos tubos em aço inoxidável.

### 2.1.3.5 Subsistema gás natural

O gás natural entra como fonte de energia e como emissor de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub>. Nesse trabalho, foi considerado um gás natural com 2% V/V de N<sub>2</sub>, 70 mg/m<sup>3</sup> de S e um poder calorífico igual a 57,6 MJ/kg. Foi admitida a combustão completa do gás natural.

### 2.1.3.6 Subsistema transporte

Foi considerada a transferência das bobinas de aço das siderúrgicas até a fábrica de tubos localizada na grande São Paulo e o transporte dos tubos até uma usina de açúcar distante 430 km de São Paulo, via transporte rodoviário. Para o transporte das bobinas, foram usadas carretas para 24 t, que percorrem 2 km/l de diesel. As bobinas de aço inoxidável são fabricadas a 770 km de São Paulo, enquanto que as de aço-carbono a 250 km.

Os tubos são transportados em caminhão tipo “truck”, que transporta 12 t e percorrem 3,2 km/l de óleo diesel.

A composição química típica do óleo diesel brasileiro é:

C: 87% ; H: 12,6% ; O: 0,04% ;

N: 0,006% e S: 0,22%.

Foi considerado que o poder calorífico inferior desse óleo diesel era igual a 12.882 kcal/l e que a sua combustão era completa.

## 2.1.4 Resultados

### 2.1.4.1 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

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 é possível comparar o desempenho ambiental de cada sistema de produto.

Nos estudos desenvolvidos pelo International Iron and Steel Institute e pelo International Stainless Steel Forum, relativos aos ICV's das lâminas de aço-carbono e dos aços inoxidáveis, foram computados mais que quarenta aspectos ambientais que atenderam às demandas de matérias-primas, emissões sólidas, líquidas e gasosas e os diferentes tipos de energias utilizadas. Independentemente desse levantamento tão completo, na avaliação dos impactos ambientais desse

estudo, foram considerados apenas nove aspectos ambientais, justamente os mais representativos ambientalmente para o setor siderúrgico e que representam mais que 90% das demandas ambientais dos sistemas de produtos considerados.

A Tabela 2 apresenta esses dados consolidados para todos os sistemas de produto (Santos, 2007).

Como “recursos naturais não renováveis consumidos”, foi considerado o somatório das quantidades de carvão metalúrgico, lignita, óleo, gás natural, calcita, dolomita e os minérios de ferro, cromo, manganês e molibdênio. “Energia Total” corresponde ao somatório das energias “renováveis” e “não renováveis”.

## 2.1.5 Discussão

A Tabela 2 permite formular uma avaliação ambiental objetiva e de fácil execução. Os dados dessa tabela mostram que o sistema de produto tubos em aço-carbono com 2,65 mm de espessura, quando comparado com os valores relativos aos sistemas de produto tubos em aços inoxidáveis, emite, aproximadamente, mais que:

- 4,2 vezes a quantidade de CO<sub>2</sub>.
- 2,8 vezes a quantidade de NO<sub>x</sub>.
- 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.
- 5,3 vezes a quantidade total de energia.

Os sistemas de produtos tubos em aço-carbono e tubos em aços inoxidáveis AISI 444 e AISI 439 emitiram quantidades semelhantes de óxidos de enxofre. O primeiro sistema de produto, entretanto, mostrou-se menos impactante ao meio

**Tabela 2** - Avaliação ambiental dos sistemas de produto tubos em aço-carbono e aços inoxidáveis AISI 304, 444 e 439.

Aspecto Ambiental	Unidade	Tipos de Tubos					
		Aço-C	AISI 304		AISI 444		AISI 439
		2,65	1,20	1,50	1,20	1,50	1,50
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	t	1.370	311	390	265	337	338
Óxidos de Nitrogênio (NO <sub>x</sub> )	t	2,38	0,78	0,98	0,71	0,89	0,87
Materiais Particulados	t	1,07	0,35	0,44	0,28	0,35	0,35
Óxidos de Enxofre (SO <sub>x</sub> )	t	1,45	2,31	2,93	1,11	1,40	1,40
Materiais Suspensos	kg	108,0	2,0	2,5	6,6	8,3	8,2
Resíduos Totais	t	956	167	210	68	86	84
Energia Total	10 <sup>6</sup> MJ	16,1	2,9	3,7	2,5	3,0	3,2
Recursos Naturais não Renováveis Consumidos	t	1.550	124	157	117	140	142
Água Usada Total	10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	85,6	51,3	51,5	51,4	51,6	51,6

ambiente, quando comparado com os sistemas de produto tubos em aço inoxidáveis AISI 304, ao emitir a metade das quantidades desse poluente.

É importante salientar que as emissões de óxidos de enxofre dos sistemas de produtos relativos aos tubos em aços inoxidáveis informadas nesse estudo estão superestimadas. Isto se deve ao fato de que a produção dos aços inoxidáveis consome mais energia elétrica que a produção do aço-carbono e de que a matriz energética dos países nos quais esses dados foram coletados tem uma predominância da termoeletricidade, esta gerada a partir de carvão mineral de baixa qualidade, com teor elevado de enxofre.

## 2.2 Custeio do Ciclo de Vida (CCV)

O objetivo do CCV é oferecer ao engenheiro, empresário e homem público uma ferramenta gerencial para seleção de materiais ou produtos, ferramenta esta que contabilize os custos totais do sistema em análise, desde a sua concepção até o fim de sua vida útil, ou seja, *ao longo do seu ciclo de vida* (Matern, S., 2002). Nessa abordagem, são considerados os custos relativos ao projeto, a aquisição, a produção, o transporte, a instalação, a operação, as manutenções, a desativação, a reposição, o reuso ou a reciclagem dos materiais residuais, os valores obtidos pela venda desses materiais, bem como o que se deixou de ganhar em termos financeiros ou dano ao público usuário pelas horas não trabalhadas. O somatório de todos esses custos permitirá selecionar a alternativa mais adequada econômica e financeiramente. Como o ciclo de vida de um sistema pode durar décadas, todos os custos incorridos nesse período precisam de ser tratados dentro do conceito do custo do dinheiro no tempo (Gitman, 1997).

### 2.2.1 Elaboração do inventário

De forma semelhante à ACV, foi montado um inventário que considerou os principais componentes de custo in-

corridos ao longo do período de tempo adotado para esse estudo, que foi de trinta anos.

Os componentes de custo considerados foram:

- Preços dos tubos.
- Transporte dos tubos.
- Instalação e substituição dos tubos nos evaporadores.
- Limpeza dos tubos.
- Venda da sucata.

Para todos esses componentes de custo, foram considerados valores levantados em março de 2007.

Os valores relativos aos itens *a*, *b* e *e* foram fornecidos por uma usina de açúcar de grande porte localizada a 430 m da cidade de São Paulo.

Uma vez que os diferentes componentes de custo foram projetados para trinta anos, eles foram corrigidos no tempo pela inflação. Como essas análises financeiras precisam de comparar cenários homogêneos, todos os gastos e receitas foram trazidos ao valor presente (VP) (Núcleo Inox, 1999). Para isto foi utilizada a taxa nominal de juros, já que uma quantidade de dinheiro não gasta em um determinado momento poderia ter sido aplicada no mercado financeiro. Em março de 2007, a previsão de inflação medida pelo Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) era igual a 3,8% e a taxa nominal de juros medida pela Selic era de 11,5%.

## 2.2.2 Resultados

A Tabela 3 apresenta os valores presentes para os diferentes componentes de custos relativos aos diferentes sistemas de produto, também chamados nos meios financeiros de unidades (Santos, 2007). Na elaboração dessa Tabela, foi utilizado o conceito de fluxo de caixa, no qual os desembolsos são apresentados entre parênteses (valor negativo), enquanto que as receitas correspondem a crédito (valor positivo).

Foi utilizado, nessa Tabela, o conceito de fluxo de caixa. Os desembolsos são apresentados entre parênteses (valor negativo). As receitas correspondem a crédito (valor positivo).

## 2.2.3 Discussão

A Tabela 3 relaciona os valores presentes para as unidades que compõem esse estudo, discriminadas pelos componentes de custo utilizados. A última coluna à direita,  $VP_L$ , apresenta o somatório dessas atualizações financeiras ao tempo zero do estudo, para cada unidade. Esses valores representam a oportunidade relativa para cada tipo de tubo, ou seja, a unidade que apresentar o maior  $VP_L$  se constituirá a melhor opção de escolha para investimento.

**Tabela 3** - Valores presentes relativos às unidades e aos componentes de custo em estudo.

UNIDADES	VALOR PRESENTE (R\$)					
	Compra dos Tubos	Transporte dos Tubos	Instalação / Substituição dos Tubos	Limpeza dos Tubos	Venda Sucata	Valor Presente Líquido ( $VP_L$ )
Tubos Aço Carbono, 2,65 mm	(801.761,00)	(22.703,00)	(323.628,00)	(453.242,00)	58.518,00	(1.542.816,00)
Tubos Inox 439, 1,50 mm	(800.841,00)	(8.000,00)	(83.029,00)	(282.067,00)	5.696,00	(1.168.241,00)
Tubos Inox 444, 1,20 mm	(861.827,00)	(7.540,00)	(81.613,00)	(276.361,00)	4.613,00	(1.222.728,00)
Tubos Inox 444, 1,50 mm	(1.069.915,00)	(9.412,00)	(83.029,00)	(282.067,00)	5.791,00	(1.438.783,00)
Tubos Inox 304, 1,20 mm	(1.209.032,00)	(9.339,00)	(81.613,00)	(276.361,00)	41.676,00	(1.534.669,00)
Tubos Inox 304, 1,50 mm	(1.517.359,00)	(11.731,00)	(83.029,00)	(282.067,00)	52.422,00	(1.841.764,00)

### 3. Conclusões

O presente trabalho teve, como objetivos, fazer comparações dos desempenhos ambiental e financeiro de um sistema de evaporação para usinas de açúcar, cujos tubos de troca térmica foram construídos em aço-carbono com 2,65 mm de espessura, e, comparar tais equipamentos com os aços inoxidáveis AISI 304, 444 e 439. Para os dois primeiros aços inoxidáveis, foram usados tubos com 1,20 mm e 1,50 mm de espessura, respectivamente. Para o aço AISI 439, foram usados tubos com 1,50 mm. O diâmetro externo de todos os tubos era igual a 38,10 mm. O período de tempo dessa análise foi de trinta anos.

Algumas conclusões puderam ser tiradas, as quais estão apresentadas a seguir.

- 1) O sistema de produto tubos em aço carbono com 2,65 mm de espessura apresentou um desempenho ambiental inferior aos sistemas de produtos tubos em aços inoxidáveis AISI 304, 444 e 439, nas espessuras de 1,20 e 1,50 mm, pois 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.
  - 4,5 vezes a quantidade de resíduos totais.
- 2) O sistema de produtos tubos em aço-carbono consumiu mais que:
  - 11 vezes o total de recursos naturais não renováveis.
  - 1,8 vezes a quantidade de água.
  - 5 vezes a quantidade de energia primária total.
- 3) Os tubos fabricados em aço-carbono e em aços inoxidáveis AISI 444 e 439 emitiram quantidades semelhantes de óxidos de enxofre.
- 4) Os tubos fabricados em aço-carbono são menos impactantes ao meio ambiente, quando comparados com os tubos fabricados em aço inoxidável AISI 304, quanto à emissão de óxidos de enxofre, já que emitiram a metade desse poluente, aproximadamente.
- 5) Os tubos fabricados com os aços inoxidáveis 439 e 444 apresentaram-se como opções de investimento mais interessantes que os tubos fabricados em aço-carbono, já que apresentaram custos trazidos ao valor presente ( $VP_L$ ) menores, nas seguintes proporções:
  - Tubos em aço AISI 439 com 1,50 mm igual a 0,76.
  - Tubos em aço AISI 444 com 1,20 mm igual a 0,79.
  - Tubos em aço AISI 444 com 1,50 mm igual a 0,93.
- 6) Os tubos fabricados com aço-carbono e os tubos fabricados com o aço inoxidável AISI 304 com 1,20 mm de espessura são opções de investimento semelhantes.
- 7) Os tubos fabricados com aço inoxidável 304 com 1,50 mm de espessura são opções de investimento menos atraentes que os tubos em aço-carbono com 2,65 mm de espessura, já que apresentaram custos trazidos ao valor presente ( $VP_L$ ) 1,19 vezes maior.

- 8) As metodologias de ACV e CCV devem ser usadas em conjunto, pois mostram que produtos mais seguros ambientalmente podem vir a ser opções de investimento também mais interessantes, quando avaliadas ao longo do ciclo de vida do produto ou material em avaliação.
- 9) Os resultados desse trabalho mostraram que a substituição dos tubos em aço-carbono dos evaporadores das usinas de açúcar por tubos fabricados com os aços inoxidáveis AISI 439, 444 e 304 contribuirá para a sustentabilidade das usinas de açúcar.

### 4. Agradecimentos

Esse estudo foi realizado com a colaboração do Núcleo de Desenvolvimento Técnico Mercadológico do Aço Inoxidável - NÚCLEO INOX.

### 5. Referências bibliográficas

- CHEHEBE, J. R. B. *Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14.000*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1998.
- DUNOD, E. *Manual da engenharia açucareira*. São Paulo: Mestre Jou, 1977.
- GITMAN, L.J. *Princípios de administração financeira*. (7.ed.) São Paulo: Harbra, 1997. 841 p.
- INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE. *Application of the IISI data to recycling scenarios: appendix 5*. Brussels: IISI. 2002. (Life cycle inventory methodology report).
- INTERNATIONAL STAINLESS STEEL FORUM. Brussels. 2005. *LCI and LCA data to stainless steel production*. Disponível em: <[www.extranet.worldstainless.org/worldstainless/portal/categories/lci\\_lca/](http://www.extranet.worldstainless.org/worldstainless/portal/categories/lci_lca/)>. Acesso em: 11/06/2006.
- KIRK-OTHMER. *Encyclopedia of chemical technology*. New York: Wiley Interscience, 1991. v. 6, 15, 16, 17, 22 e 24.
- MATERN, S. *Life cycle cost LCC: a new approach to materials selection: engineering and economy*. Avesta Sheffield, Information 9763. Disponível em: <[www.avestashelfield.com](http://www.avestashelfield.com)>. Acesso em: 13/05/2002.
- NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO TÉCNICO MERCADOLÓGICO DO AÇO INOXIDÁVEL. *Manual de aplicação da metodologia LCC: life cycle costing*. São Paulo: Núcleo Inox, 1999. 12 p.
- SANTOS, L. J. C. S. *Avaliação do ciclo de vida e custeio do ciclo de vida de evaporadores para usinas de açúcar*. 2007. (Tese de Doutorado). Disponível na internet: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-08012008-151424/>
- SUGAR ENGINEERS' LIBRARY. *Sugar factory tubes for heating, evaporating and crystallising*. Disponível em: <[www.sugartech.co.za](http://www.sugartech.co.za)>. Acesso em: 20/05/2006.

Artigo recebido em 03/08/2009 e aprovado em 19/01/2010.