

ANÁLISE TERMOECONÔMICA DO SETOR DE UTILIDADES DE UMA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS

Marcos Sandrini

Corn Products Brasil – Dep. de Manutenção. R. Francisco Manoel da Cruz, 11. Zona Industrial, Balsa Nova, PR., CEP 80.650-000
sandrini@cornproducts.com.br

José Antonio Velásquez

Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR – Dep. de Engenharia Mecânica. R. Imaculada Conceição, 1155, Prado Velho, Curitiba, PR, CEP 80215-901
velasqz@rla01.pucpr.br

Resumo. Este trabalho descreve as análises exergética e termoeconômica do departamento de produção e distribuição de vapor de uma planta de moagem de milho. Dados históricos médios estão sendo usados para quantificar as irreversibilidades principais e computar custos exergéticos para cada fluxo. A partir destes resultados foram propostas modificações, resultando em três alternativas de estrutura produtiva para o departamento de utilidades. Foram administradas análises termoeconômicas para cada um destes casos propostos, calculando-se os custos exergéticos e econômicos. A avaliação final das alternativas foi feita usando dois critérios econômicos — a taxa de retorno interna e o valor presente líquido. Os resultados mostram o efeito econômico e o potencial para reduzir o consumo de combustível para cada esquema produtivo proposto.

Palavras chave: Análise exergética, análise termoeconômica, sistemas de geração e distribuição de vapor.

1. Introdução

Em tempos de globalização, a necessidade das empresas de se tornarem mais competitivas não é apenas resultado do desejo de maximizar seus lucros, mas é, principalmente, uma questão de sobrevivência. Oferecer produtos com excelência em qualidade, que atendam às expectativas dos clientes, não é mais um diferencial no mercado e sim um quesito mínimo por ele exigido. Um dos efeitos da globalização é o grande número de oferta, com empresas podendo comercializar seus produtos em qualquer canto do mundo. É inegável que o mercado global tornou-se enorme, porém a concorrência cresceu na mesma proporção.

No contexto de economia fechada, uma prática tradicionalmente adotada pelas empresas para aumentar seus lucros era a de aumentar os preços. Entretanto, essa prática é proibitiva nos tempos atuais, quando o mercado é extremamente competitivo e com grande oferta de produtos. Descartada a hipótese de aumentar preços, a alternativa natural para aumentar os lucros é a de reduzir custos. No passado, a redução de custos era, freqüentemente, mal-entendida como a redução do número de funcionários (principalmente nos períodos de crise). Esta idéia também já, há muito tempo, está superada. Em épocas de crise, a receita não é enxugar quadros e sim aproveitar a oportunidade de baixa na produção para reciclar conhecimentos; visto que o patrimônio intelectual de uma empresa é o seu maior patrimônio e os seus detentores são os funcionários da empresa. Pode-se pensar, então, em reduzir os preços dos insumos para aumentar os lucros. Também não seria muito simples, haja vista que no mercado atual as empresas fornecedoras estão trabalhando com uma margem de lucro bastante estreita. Descartadas as hipóteses de aumentar preços, reduzir preços dos insumos e enxugar o quadro de funcionários, o caminho para aumentar os lucros das empresas está na utilização dos recursos de maneira inteligente e eficiente, ou seja, otimizar os processos produtivos.

Segundo estudo publicado pela Associação Brasileira da Indústria Química, (ABIQUIM, 1999), em 1998 o consumo de energia da indústria química foi de aproximadamente $2,3 \cdot 10^8$ kJ. Desta energia, 83% foi energia térmica, ou seja, algo em torno de $1,9 \cdot 10^8$ kJ. Diante desses números, verifica-se um cenário bastante favorável e viável para investir na otimização dos processos térmicos no setor.

2. Descrição da Planta

Neste trabalho apresenta-se um estudo do setor de utilidades de uma planta de moagem de milho para a fabricação de amido de milho e de seus derivados. Para este processo, utilizam-se, basicamente, duas fontes de energia: a elétrica (fornecida pela concessionária local de energia) e a térmica (na forma de vapor de processo, produzido em caldeiras). O foco deste estudo esteve voltado para a análise do circuito de vapor e de condensado da planta, resultando na elaboração de sugestões de melhoria que, por sua vez, visam a redução dos custos do combustível utilizado para a produção do vapor.

Uma representação simplificada deste circuito de vapor e de condensado é mostrada na Fig. (1). O vapor é gerado em duas caldeiras tipo aquo-tubular. A Caldeira 1, identificada na Fig. (1), é uma caldeira fabricada pela Babcock & Wilcox CO., modelo FJ14, com pressão de trabalho de 23,3 bar e que produz vapor saturado. A capacidade nominal dessa caldeira é de 15.000 kg/h. A caldeira 2 foi fabricada pela Cobrasma, modelo FM-10-79-ME. Esta caldeira opera na pressão de trabalho de 23,3 bar e produzindo vapor saturado, sendo que sua capacidade nominal é de 30.000 kg/h. Após sair das caldeiras, uma parte do vapor é enviada ao processo de produção de amido de milho para sua utilização, e a outra parte é direcionada para uma estação de redução de pressão e posterior dessuperaquecimento, de onde sai como vapor saturado com pressão de 11,3 bar. Depois de passar por essa estação de redução de pressão, mais uma parte do vapor é enviada ao processo de produção dos derivados de milho, enquanto que o restante do vapor é direcionado a uma segunda estação de redução e dessuperaquecimento. Desta segunda estação redutora de pressão, o vapor sai como vapor saturado com pressão de 2,2 bar. Este vapor é, por fim, enviado ao processo produtivo dos derivados de milho, passando através do coletor de vapor de baixa pressão (coletor LPS).

O vapor é utilizado na planta em várias aplicações como aquecimento indireto, aquecimento direto, ejetores para geração de vácuo, entre outros. O vapor que é utilizado para aquecimento por contato indireto, chamado de primeiro condensado, é realimentado nas caldeiras, retornando pelos seguintes caminhos:

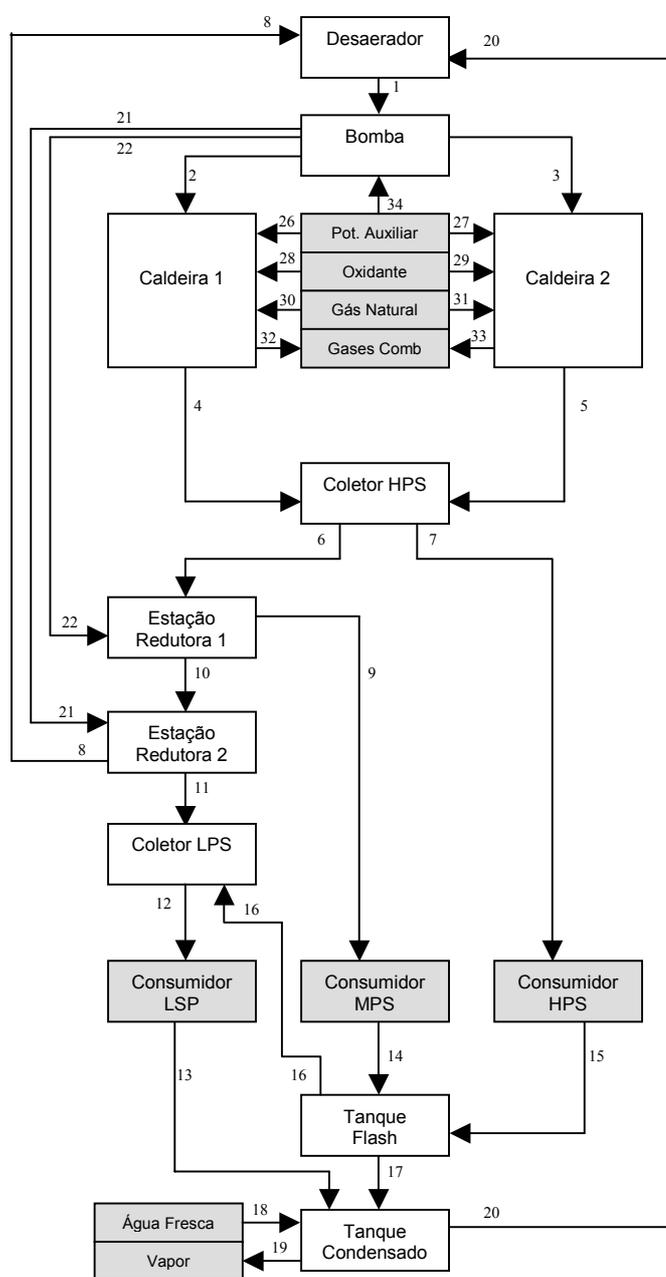


Figura 1. Fluxograma do processo.

- a) O vapor de alta pressão (23,3 bar), depois de ser parcialmente condensado no processo de produção de derivados de milho, passa através de válvulas redutoras de pressão e é transferido para o tanque *flash*, onde o condensado é separado do vapor;
- b) O vapor de média pressão (11,3 bar), depois de ser parcialmente condensado no processo de produção de derivados de milho, passa através de válvulas redutoras de pressão e é transferido para o mesmo tanque *flash* que recebeu o vapor do item anterior;
- c) O vapor de baixa pressão (2,2 bar), depois de ser condensado no processo produtivo, é transferido para o tanque de condensado geral da fábrica passando, antes, através de purgadores de vapor.

O vapor que sai do tanque *flash* segue para o coletor de vapor de baixa pressão e o condensado segue para o tanque de condensado geral da fábrica. O tanque de condensado recebe também a água de reposição (água de *make-up*) correspondente à vazão de água que não retornou do processo produtivo. Na saída do tanque de condensado, a água é transferida para o desaerador que, por intermédio da injeção de vapor, aquece o condensado até uma temperatura de 105°C para eliminação de oxigênio, evitando a corrosão dos equipamentos que compõem o sistema. Após o desaerador, o condensado é bombeado às caldeiras para geração de vapor, fechando o circuito.

3. Metodologia

Neste trabalho é mostrada uma análise termoeconômica de um sistema de vapor e condensado em uma planta de produção de amido de milho, localizada na cidade de Balsa Nova - PR. As etapas que se seguiram para a elaboração do trabalho foram:

- a) Levantamento de um diagrama do circuito de vapor e condensado que represente a situação atual da planta e determinação dos dados necessários para análise do processo (valores médios históricos);
- b) A partir da tabela de dados e do diagrama do circuito, foram conduzidos balanços de massa, de energia e de exergia, para determinar os fluxos de energia e de exergia, associados a cada corrente;
- c) Determinação dos custos exergéticos de cada corrente de matéria ou de energia, através da aplicação da teoria dos custos exergéticos (Lozano, 1993);
- d) A partir das exergias e dos custos exergéticos de cada corrente, foi avaliada a eficiência de cada equipamento e identificados os pontos passíveis de melhorias;
- e) Em seguida, baseando-se nas melhorias propostas, foram sugeridos três esquemas produtivos alternativos para o sistema de distribuição de vapor e condensado da planta sendo que, por serem excludentes, somente um deles poderia ser executado.
- f) Cada alternativa proposta foi analisada seguindo-se as etapas a – c;
- g) Após a análise de cada alternativa, foram levantados os custos econômicos de implantação de cada uma delas. Além disso, baseado na legislação brasileira para depreciação do investimento (Decreto lei 3000, 1999) foi elaborado um fluxo de caixa a partir dos custos e as receitas de cada alternativa;
- h) Através do fluxo de caixa, cada alternativa foi avaliada em relação ao risco, baseando-se na Taxa Interna de Retorno (TIR);
- i) Através do fluxo de caixa, cada alternativa foi avaliada em relação ao retorno financeiro, baseando-se no Valor Presente Líquido (VLP) e utilizando-se a Taxa Mínima Atrativa (TMA) adotada pela companhia;
- j) Como cada investimento teve seu custo particular, foi necessária a equalização dos fluxos de caixa e esta equalização mostrou qual o investimento mais adequado dentre as propostas apresentadas.

4. Engenharia Econômica

A Engenharia Econômica é definida como o conjunto de métodos e técnicas de decisão, utilizados para a escolha entre alternativas de investimento tecnicamente viáveis, sendo que as diferenças entre essas alternativas são expressas em termos monetários (Hess, 1980).

Várias são as possibilidades de se avaliar um investimento. As mais utilizadas, e que usaremos neste trabalho, são o Método do Valor Presente Líquido (VLP) e o Método da Taxa Interna de Retorno (TIR).

No Método do Valor Presente Líquido (VLP) calcula-se o valor atualizado das receitas e das despesas do fluxo de caixa de cada alternativa de investimento, empregando a Taxa Mínima Atrativa (TMA) (Casarotto, 1996). O valor característico de cada alternativa é a diferença entre os valores atuais das receitas e despesas. Se essa diferença for positiva, a taxa de retorno do capital investido é maior que a TMA. Se, entretanto, a diferença for negativa, o investimento não será atrativo, pois a taxa de retorno do capital será menor que a TMA. A melhor alternativa de investimento será, então, aquela que fornecer a maior diferença positiva entre os valores atuais das receitas e das despesas.

A taxa de retorno de um investimento é a taxa de juros que anula a diferença entre os valores atuais das receitas e das despesas de seu fluxo de caixa. Numa análise de investimentos, a escolha recai na alternativa de maior taxa de retorno. A maior taxa de retorno significa, para o investidor, o investimento de menor risco, haja vista que quanto maior a taxa de retorno, menor o tempo de recuperação do capital investido. Uma alternativa de investimento é considerada atrativa se a taxa de retorno é maior que a TMA. Nesta análise é que consiste o Método da Taxa Interna de Retorno (TIR).

5. Avaliação dos Custos Exergéticos.

Os dados utilizados na análise que se segue correspondem aos valores médios históricos de operação da planta, conforme o esquema produtivo atual. Este esquema produtivo será chamado de caso base e servirá de parâmetro de comparação para as alternativas propostas. Os dados referentes ao caso base são mostrados na Tabela 1. Para efetuar os balanços de massa, de energia e de exergia admitiu-se que o sistema opera em regime permanente e que a transferência de calor entre os equipamentos e suas vizinhanças é desprezível.

Para a análise de uma planta térmica usando a teoria dos custos exergéticos, se faz necessário desagregar o sistema em suas unidades constitutivas, e identificar as correntes de matéria e de energia associadas a cada unidade. A partir dessas informações é possível construir a matriz de incidência da planta (Valero, 1994).

Neste estudo, a planta foi desagregada definindo dez unidades, conforme mostrado na Fig. (1): desaerador, bomba, caldeira 1, caldeira 2, coletor de vapor de alta pressão, estação redutora 1, estação redutora 2, coletor de baixa pressão, tanque *flash* e tanque de condensado. Além disso, para cada unidade foram definidos os respectivos produtos (P), insumos (F) e perdas (L).

A determinação dos custos exergéticos dos fluxos de matéria e de energia foi baseada nas quatro proposições apresentadas por Lozano e Valero (Lozano, 1993). Cerqueira (1999), observa que a matriz de custos [M] é constituída por quatro sub-matrizes, definidas a partir dos quatro postulados: a sub-matriz incidência, a sub-matriz de entradas, a sub-matriz de perdas e a sub-matriz de bifurcações. Associada a cada uma destas sub-matrizes identifica-se o correspondente sub-vetor de valoração externa. Estes quatro sub-vetores constituem o vetor de valoração externa [Y]. Assim, os custos exergéticos dos fluxos de matéria e de energia são determinados resolvendo-se o sistema de equações $[M] \times [B^*] = [Y]$, onde $[B^*]$ é o vetor de custos exergéticos das correntes.

A Tabela 2 mostra os fluxos de energia e de exergia (H e B, respectivamente), o custo exergético (B^*) e o custo exergético unitário ($k^* = B^*/B$), associados a cada corrente de matéria ou de energia. Na Tabela 3 são apresentados os valores de exergia dos insumos e dos produtos (F e P, respectivamente), os custos exergéticos dos insumos e dos produtos (F^* e P^* , respectivamente) e o consumo específico de insumos ($k = F/P$), associados a cada unidade da planta.

Tabela 1. Propriedades termodinâmicas das correntes de vapor (caso base).

I	p [kPa]	T [°C]	x	m [kg/s]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg.K]
0	92	25			103,9	0,364
1	121	105		9,93	440,5	1,364
2	2333	105		4,07	442,8	1,370
3	2333	105		5,76	442,8	1,370
4	2333		1	4,07	2802	6,283
5	2333		1	5,76	2802	6,283
6	2333		1	6,13	2802	6,283
7	2333		1	3,70	2802	6,283
8	223		1	0,24	2711	7,090
9	1126		1	4,69	2782	6,545
10	1126		1	1,49	2782	6,545
11	223		1	1,30	2711	7,090
12	223		1	2,20	2711	7,090
13	223		0	1,87	519,4	1,567
14	1126		0	2,62	785,7	2,188
15	2333		0	2,96	945,4	2,521
16	223		1	0,89	2711	7,090
17	223		0	4,69	519,4	1,567
18	92	25		3,13	103,9	0,364
19	92		1	0,00	2671	7,387
20	92	92		9,69	385	1,215
21	2333	105		0,05	442,8	1,370
22	2333	105		0,05	442,8	1,370
23	223		1	0,33	2711	7,090
24	1126		1	2,07	2782	6,545
25	2333		1	0,74	2802	6,283
26				0,28	-3932	10,020
27				0,39	-3932	10,020
28				1,11		
29				1,58		
32				1,39	-2333	7,635
33				1,97	-2333	7,635

6. Análise do caso base.

Os valores da Tabela 3 mostram que os equipamentos que apresentam os maiores valores de consumo específico de insumos são as caldeiras, o tanque de condensado, a estação redutora 2, o tanque *flash*, a bomba e a estação redutora 1, nesta ordem. O alto consumo específico de insumos nas caldeiras é esperado, tendo em vista as irreversibilidades inerentes ao processo de combustão. Embora o tanque de condensado apresente valores relativamente altos de consumo específico de insumos, os custos exergéticos a ele associados são baixos, tornando os investimentos pouco atrativos. Os outros pontos, em princípio, são passíveis de melhorias.

Tabela 2. Custos exergéticos dos fluxos de matéria e energia (caso base).

j	Fluxo	B [kW]	H [kW]	B* [kW]	k*
1	Água	381	3.342	1.155	3,03
2	Água	158	1.379	496	3,13
3	Água	224	1.952	702	3,13
4	Vapor Alta Pressão	3.798	10.980	13.110	3,45
5	Vapor Alta Pressão	5.375	15.538	18.535	3,45
6	Vapor Alta Pressão	5.720	16.535	19.731	3,45
7	Vapor Alta Pressão	3.453	9.983	11.913	3,45
8	Vapor Baixa Pressão	143	618	734	5,15
9	Vapor Média Pressão	3.914	12.550	14.965	3,82
10	Vapor Média Pressão	1.248	4.003	4.773	3,82
11	Vapor Baixa Pressão	785	3.401	4.044	5,15
12	Vapor Baixa Pressão	1.323	5.732	4.679	3,54
13	Condensado	106	777	106	1,00
14	Condensado	362	1.787	362	1,00
15	Condensado	587	2.492	587	1,00
16	Vapor Baixa Pressão	538	2.331	635	1,18
17	Condensado	266	1.948	314	1,18
18	Água	0	0	0	1,00
19	Vapor (perdas)	0	0	0	0
20	Água	265	2.724	420	1,59
21	Água	2	16	6	3,13
22	Água	2	18	6	3,13
26	Gás Natural	12.532	-1.117	12.532	1,00
27	Gás Natural	17.735	-1.581	17.735	1,00
28	Ar	3	-116	3	1,00
29	Ar	4	-164	4	1,00
30	Energia Elétrica	78	78	78	1,00
31	Energia Elétrica	93	93	93	1,00
32	Gases de Combustão	111	-3.389	0	0,00
33	Gases de Combustão	157	-4.796	0	0,00
34	Energia Elétrica	56	56	56	1,00

Tabela 3. Insumos e produtos das unidades (caso base).

Unidade	F [kW]	F* [kW]	P [kW]	P* [kW]	k
Tanque Flash	949	949	804	949	1,2
Tanque de Condensado	372	420	265	420	1,4
Desaerador	408	1.155	381	1.155	1,1
Bomba	437	1.211	386	1.211	1,1
Caldeira 1	12.772	13.110	3.798	13.110	3,4
Caldeira 2	18.057	18.535	5.375	18.535	3,4
Coletor de Vapor Alta Pressão	9.173	31.644	9.173	31.644	1,0
Estação Redutora 1	5.722	19.738	5.162	19.738	1,1
Estação Redutora 2	1.250	4.779	927	4.779	1,3
Coletor de Vapor Baixa Pressão	1.323	4.679	1.323	4.679	1,0
Planta	31.557	31.557	8.690	31.557	3,6

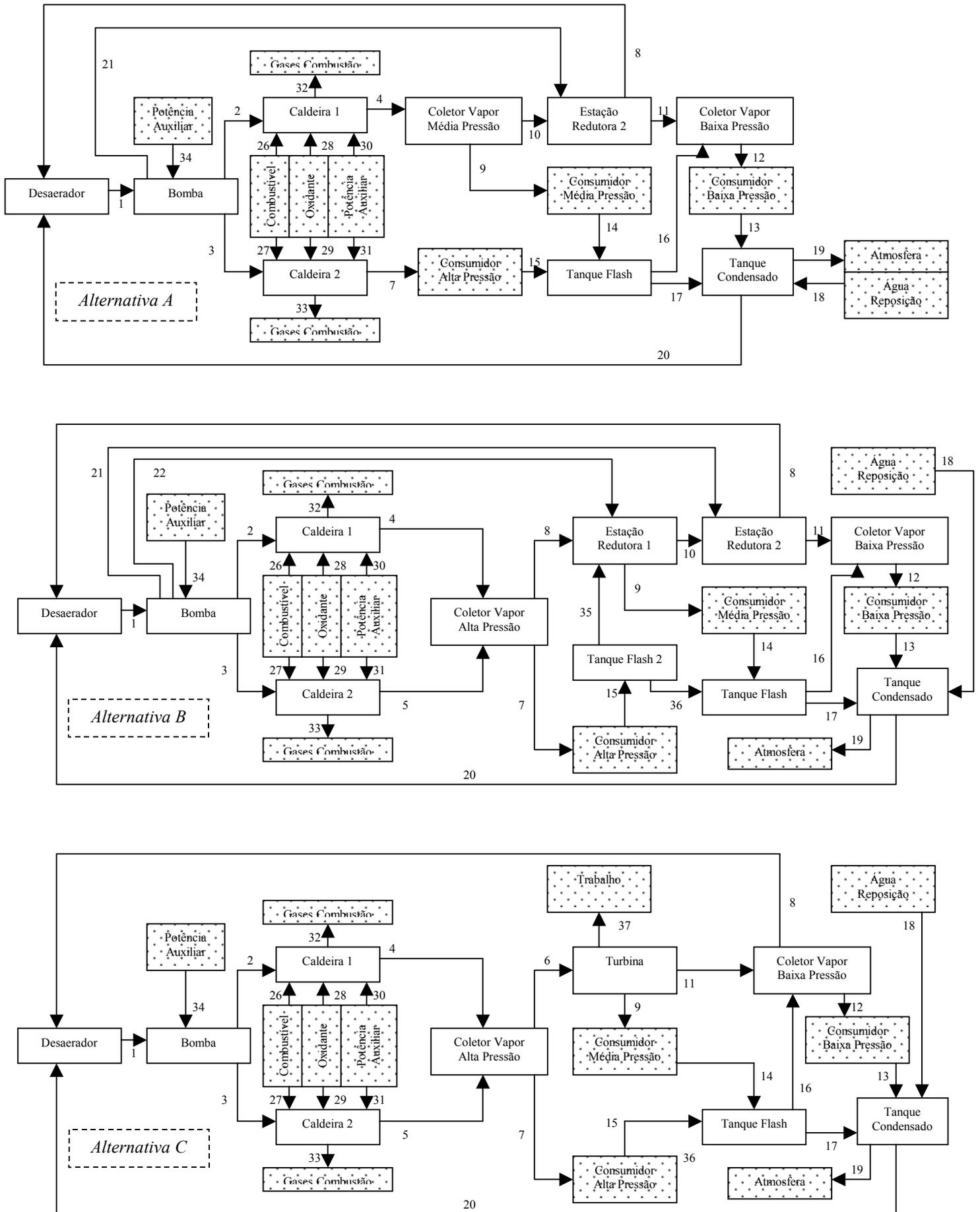


Figura 2. Fluxogramas das alternativas.

Deve ser notado, ainda na Tabela 3, que a estação redutora 1 apresenta os maiores custos exergéticos de insumos e produtos. Por isso, esta unidade merece especial atenção na busca de alternativas para a melhoria da eficiência da planta.

A partir destas observações, achou-se conveniente atuar nas estações redutoras e no tanque flash. Assim, foram sugeridas as seguintes modificações do esquema produtivo da planta, conforme figura 2:

- **Alternativa A.** Eliminar a estação redutora 1, passando a gerar o vapor de média pressão em uma das caldeiras, enquanto a outra continuaria gerando vapor de alta pressão;
- **Alternativa B.** Instalar um novo tanque *flash*, com o objetivo de receber o condensado de alta pressão e gerar vapor saturado na pressão média (11,3 bar);
- **Alternativa C.** Eliminar as estações redutoras 1 e 2, substituindo-as por uma turbina a vapor. Fazendo assim, além do efeito desejado de reduzir a pressão, gera-se potência.

7. Análise das Alternativas Propostas: Custos Exergéticos.

Os esquemas produtivos propostos foram analisados utilizando a mesma metodologia empregada para o caso base. Os resultados da aplicação da teoria dos custos exergéticos, são mostrados nas Tabelas 4-9. Para estas análises, foi admitido que, apesar das modificações efetuadas na planta, as caldeiras mantém a mesma eficiência exergética do caso base. Com o objetivo de facilitar a análise dos resultados, na Tabela 10 foram compilados os valores de insumos e produtos da planta, bem como o consumo específico de insumos da planta, tanto para o caso base como para as três alternativas analisadas. Pode-se observar nesta tabela que, em relação ao caso base, as Alternativas A e C permitem diminuir o consumo específico de insumos (melhorando, portanto, a eficiência exergética da planta), enquanto que na Alternativa B a eficiência da planta permaneceu inalterada.

Na Alternativa A, o ganho de eficiência deve-se principalmente ao fato de ter eliminado as irreversibilidades da estação redutora 1 e, também, à diminuição da quantidade de exergia que deve ser transferida ao vapor nas caldeiras (uma parte do vapor que antes era gerado a 23,3 bar agora está sendo gerada a 11,3 bar). No caso da Alternativa C, o ganho de eficiência deve-se ao fato de ter eliminado as irreversibilidades das estações redutoras e, também, pela produção de potência elétrica no grupo turbina-gerador.

7.1. Alternativa A.

Tabela 4. Custos exergéticos dos fluxos de matéria e energia (Alternativa A).

j	Fluxo	B [kW]	H [kW]	B* [kW]	k*
1	Água	381	3.342	1.090	2,86
2	Água	241	2.095	713	2,96
3	Água	144	1.254	427	2,96
4	Vapor Média Pressão	5.175	16.565	17.998	3,48
7	Vapor Alta Pressão	3.453	9.983	11.840	3,43
8	Vapor Baixa Pressão	143	618	670	4,70
9	Vapor Média Pressão	3.914	12.550	13.646	3,49
10	Vapor Média Pressão	1.248	4.003	4.352	3,49
11	Vapor Baixa Pressão	785	3.401	3.688	4,70
12	Vapor Baixa Pressão	1.323	5.732	4.323	3,27
13	Condensado	106	777	106	1,00
14	Condensado	362	1.787	362	1,00
15	Condensado	587	2.492	587	1,00
16	Vapor Baixa Pressão	538	2.331	635	1,18
17	Condensado	266	1.948	314	1,18
18	Água	0	0	0	1,00
19	Perdas	0	0	0	0,00
20	Água	265	2.724	420	1,59
21	Água	2	16	5	2,96
26	Gás Natural	17.203	-1.494	17.203	1,00
27	Gás Natural	11.318	-983	11.318	1,00
28	Ar	4	0	4	1,00
29	Ar	3	0	3	1,00
30	Energia Elétrica	78	78	78	1,00
31	Energia Elétrica	93	93	93	1,00
32	Gases de Combustão	153	-4.454	0	0,00
33	Gases de Combustão	100	-2.930	0	0,00
34	Energia Elétrica	56	56	56	1,00

Tabela 5. Insumos e produtos das unidades (Alternativa A).

Unidade	F [kW]	F* [kW]	P [kW]	P* [kW]	k
Tanque Flash	949	949	804	949	1,2
Tanque de Condensado	372	420	265	420	1,4
Desaerador	408	1.090	381	1.090	1,1
Bomba	437	1.146	386	1.146	1,1
Caldeira 1	17.525	17.998	5.175	17.998	3,4
Caldeira 2	11.557	11.840	3.453	11.840	3,3
Coletor Vapor Média Pressão	5.175	17.998	5.162	17.998	1,0
Estação Redutora 2	1.250	4.358	927	4.358	1,3
Coletor Vapor Baixa Pressão	1.323	4.323	1.323	4.323	1,0
Planta	29.809	29.809	8.690	29.809	3,4

7.2. Alternativa B.

Tabela 6. Custos exergeticos dos fluxos de matéria e energia (Alternativa B).

j	Fluxo	B [kW]	H [kW]	B* [kW]	k*
1	Água	382	3.344	1.123	2,94
2	Água	158	1.379	483	3,05
3	Água	224	1.952	684	3,05
4	Vapor Alta Pressão	3.798	10.980	13.096	3,45
5	Vapor Alta Pressão	5.375	15.539	18.517	3,44
6	Vapor Alta Pressão	5.720	16.536	19.713	3,45
7	Vapor Alta Pressão	3.453	9.983	11.901	3,45
8	Vapor Baixa Pressão	143	618	714	5,01
9	Vapor Média Pressão	3.914	12.550	14.546	3,72
10	Vapor Média Pressão	1.447	4.638	5.376	3,72
11	Vapor Baixa Pressão	932	4.039	4.668	5,01
12	Vapor Baixa Pressão	1.323	5.732	5.112	3,86
13	Condensado	106	777	106	1,00
14	Condensado	362	1.787	362	1,00
15	Condensado	587	2.492	587	1,00
16	Vapor Baixa Pressão	391	1.693	444	1,14
17	Condensado	267	1.951	303	1,14
18	Água	0	0	0	1,00
19	Perdas	0	0	0	0,00
20	Água	265	2.726	409	1,54
21	Água	2	18	6	3,05
22	Água	2	18	6	3,05
26	Gás Natural	12.532	-1.117	12.532	1,00
27	Gás Natural	17.736	-1.581	17.736	1,00
28	Ar	3	-116	3	1,00
29	Ar	4	-164	4	1,00
30	Energia Elétrica	78	78	78	1,00
31	Energia Elétrica	93	78	93	1,00
32	Gases de Combustão	111	-3.389	0	0,00
33	Gases de Combustão	157	-4.797	0	0,00
34	Energia Elétrica	56	56	56	1,00
35	Vapor Média Pressão	198	634	203	1,02
36	Condensado	376	1.857	385	1,02

Tabela 7. Insumos e produtos das unidades (Alternativa B).

Unidade	F [kW]	F* [kW]	P [kW]	P* [kW]	k
Tanque Flash	737	746	658	746	1,1
Tanque Flash 2	587	587	574	587	1,0
Tanque de Condensado	373	409	265	409	1,4
Desaerador	408	1.123	382	1.123	1,1
Bomba	438	1.179	387	1.179	1,1
Caldeira 1	12.772	13.096	3.798	13.096	3,4
Caldeira 2	18.058	18.517	5.375	18.517	3,4
Coletor Vapor Alta Pressão	9.173	31.614	9.173	31.614	1,0
Estação Redutora 1	5.920	19.922	5.360	19.922	1,1
Estação Redutora 2	1.449	5.382	1.075	5.382	1,3
Coletor Vapor Baixa Pressão	1.323	5.112	1.323	5.112	1,0
Planta	31.558	31.558	8.690	31.558	3,6

7.3. Alternativa C.

Tabela 8. Custos exergéticos dos fluxos de matéria e energia (Alternativa C).

j	Fluxo	B	H	B*	k*
1	Água	381	3.342	912	2,39
2	Água	158	1.379	397	2,51
3	Água	228	1.985	571	2,51
4	Vapor Alta Pressão	3.798	10.980	13.010	3,43
5	Vapor Alta Pressão	5.467	15.806	18.709	3,42
6	Vapor Alta Pressão	1.167	3.373	3.994	3,42
7	Vapor Alta Pressão	3.453	9.983	11.822	3,42
8	Vapor Baixa Pressão	143	618	492	3,45
9	Vapor Média Pressão	3.914	12.550	14.660	3,75
11	Vapor Baixa Pressão	927	4.019	4.424	4,77
12	Vapor Baixa Pressão	1.323	5.732	4.567	3,45
13	Condensado	106	777	106	1,00
14	Condensado	362	1.787	362	1,00
15	Condensado	587	2.492	587	1,00
16	Vapor Baixa Pressão	538	2.331	635	1,18
17	Condensado	266	1.948	314	1,18
18	Água	0	0	0	1,00
19	Perda de Vapor	0	0	0	1,00
20	Água	265	2.724	420	1,59
26	Gás Natural	12.532	-1.117	12.532	1,00
27	Gás Natural	18.041	-1.608	18.041	1,00
28	Ar	3	-116	3	1,00
29	Ar	4	-167	4	1,00
30	Energia Elétrica	78	78	78	1,00
31	Energia Elétrica	93	93	93	1,00
32	Gases de Combustão	111	-3.389	0	0,00
33	Gases de Combustão	160	-4.879	0	0,00
34	Energia Elétrica	56	56	56	1,00
37	Potência Turbina	234	234	813	3,48
38	Vapor Alta Pressão	4.646	13.430	15.904	3,42
39	Vapor Média Pressão	750	2.416	2.606	3,48
40	Vapor Baixa Pressão	165	723	575	3,48
41	Vapor Média Pressão	1.028	3.295	3.849	3,75

Tabela 9. Insumos e produtos das unidades (Alternativa C).

Unidade	F	F*	p	p*	k
Tanque Flash	949	949	804	949	1,2
Tanque Condensado	372	420	265	420	1,4
Desaerador	408	912	381	912	1,1
Bomba	437	968	386	968	1,1
Caldeira 1	12.772	13.010	3.798	13.010	3,4
Caldeira 2	18.366	18.709	5.467	18.709	3,4
Coletor Vapor Alta Pressão	9.266	31.720	9.266	31.720	1,0
Turbina	1.167	3.994	1.149	3.994	1,0
Saturador Baixa Pressão	1.193	4.424	927	4.424	1,3
Saturador Média Pressão	5.395	18.509	4.942	18.509	1,1
Coletor Vapor Baixa Pressão	1.465	5.059	1.465	5.059	1,0
Planta	31.862	31.862	8.924	31.862	3,6

Tabela 10. Quadro comparativo de insumos e produtos da planta.

	F [kW]	F* [kW]	P [kW]	P* [kW]	k
Caso base	31.557	31.557	8.690	31.557	3,63
Alternativa A	29.809	29.809	8.690	29.809	3,43
Alternativa B	31.558	31.558	8.690	31.558	3,63
Alternativa C	31.862	31.862	8.901	31.862	3,58

8. Análise das Alternativas Propostas: Avaliação dos Investimentos.

Através da análise pela teoria dos custos exergeticos foi verificado que duas das alternativas permitiriam aumentar a eficiência da planta. Levando em conta que as alternativas são excludentes e com o objetivo de auxiliar na tomada de decisões, foi realizada uma análise financeira dos investimentos necessários para implantar cada proposta. Os investimentos foram avaliados tomando-se como base projetos similares realizados na empresa Corn Products Brasil, cotações de preços junto a fornecedores, bem como recomendações apresentadas por Bejan *et al* (1996). As Tabelas 11, 12 e 13 mostram os valores levantados para cada alternativa enquanto que a Tabela 14 sumariza o resultado dos fluxos de caixa para as alternativas consideradas, onde estão consideradas as receitas e despesas como manutenção, capitais de giro e de trabalho e depreciação do investimento.

Tabela 11. Investimentos (Alternativa A).

I. Investimento em Ativo Fixo		45.000,00
A. Custos Diretos	76%	38.500,00
1. Equipamentos	0%	0,00
2. Tubulações	44%	22.000,00
3. Instrumentação e Controle (12% de A.1)	0%	0,00
4. Material Elétrico (15% de A.1)	0%	0,00
5. Construção Civil (5% de A.1)	0%	0,00
6. Mão de Obra (75% de A.2)	33%	16.500,00
B. Custos Indiretos	13%	6.500,00
1. Engenharia e Supervisão (12% de I)	11%	5.400,00
2. Miscelanea (5% de A.2)	2%	1.100,00
II. Outros Gastos	11%	5.510,00
Custos de Startup (10% de I)	9%	4.500,00
Capital de Trabalho (2% do Total do Capital Investido)	2%	1.010,00
Total do Capital Investido		50.510,00

Tabela 12. Investimentos (Alternativa B).

I. Investimento em Ativo Fixo		47.443,00
A. Custos Diretos	76%	40.500,00
1. Equipamentos	47%	25.000,00
2. Tubulações (10% de A.1)	5%	2.500,00
3. Instrumentação e Controle (12% de A.1)	6%	3.000,00
4. Material Elétrico (15% de A.1)	7%	3.750,00
5. Construção Civil (5% de A.1)	2%	1.250,00
6. Mão de Obra (20% de A.1)	9%	5.000,00
B. Custos Indiretos	13%	6.943,00
1. Engenharia e Supervisão (12% de I)	11%	5.693,00
2. Miscelanea (5% de A.1)	2%	1.250,00
II. Outros Gastos	11%	5.809,00
Custos de Startup (10% de I)	9%	4.744,00
Capital de Trabalho (2% do Total do Capital Investido)	2%	1.065,00
Total do Capital Investido		53.252,00

Tabela 13. Investimentos (Alternativa C).

I. Investimento em Ativo Fixo		380.371,45
A. Custos Diretos	76%	324.704,70
1. Equipamentos	47%	200.435,00
2. Tubulações (10% de A.1)	5%	20.043,50
3. Instrumentação e Controle (12% de A.1)	6%	24.052,20
4. Material Elétrico (15% de A.1)	7%	30.065,25
5. Construção Civil (5% de A.1)	2%	10.021,75
6. Mão de Obra (20% de A.1)	9%	40.087,00
B. Custos Indiretos	13%	55.666,75
1. Engenharia e Supervisão (12% de I)	11%	45.645,00
2. Miscelanea (5% de A.1)	2%	10.021,75
II. Outros Gastos	11%	46.576,00
Custos de Startup (10% de I)	9%	38.037,00
Capital de Trabalho (2% do Total do Capital Investido)	2%	8.539,00
Total do Capital Investido		426.947,45

Tabela 14. Comparativo financeiro das propostas

Ano	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
0	(50.510,00)	(53.252,00)	(426.947,45)
1	31.372,87	2.470,89	97.842,76
2	31.816,85	2.470,89	101.447,40
3	32.701,04	2.470,89	106.419,09
4	33.611,76	2.470,89	111.693,56
5	34.549,81	2.470,89	117.289,25
6	35.515,99	2.470,89	123.225,72
7	36.511,16	2.470,89	129.523,71
8	37.536,19	2.470,89	136.205,25
9	38.591,96	2.470,89	143.293,70
10	39.679,41	2.470,89	150.813,84
TIR	64%	(12%)	23%
VPL	R\$ 86.572,21	(R\$ 35.718,30)	R\$ 73.001,15
TMA	18%		

9. Conclusões.

Na análise pela teoria dos custos exergeticos, duas propostas apresentaram-se atrativas. Com a Alternativa A o consumo específico de insumos da planta poderia ser reduzido de 3,63 para 3,48, enquanto que com a Alternativa C esta redução seria de 3,63 para 3,58.

Na análise financeira dos investimentos (Tabela 14), a Alternativa A apresentou uma taxa interna de retorno de 64% ao ano, com um valor presente líquido de R\$ 86.572,21, enquanto que para a Alternativa C os resultados indicaram uma taxa interna de retorno de 23% ao ano e um valor presente líquido de R\$ 73.001,15. Estes resultados indicam que analisando pelo lado do risco financeiro, a Alternativa A apresenta um retorno do investimento mais rápido, ou seja, o risco financeiro é menor. Além disso, a Alternativa A apresenta o maior ganho em termos monetários (maior valor presente líquido).

Assim, os resultados acima mostram que a Alternativa A, que prevê a geração de vapor em dois níveis de pressão, é a que fornece as maiores vantagens dos pontos de vista termodinâmico e financeiro.

5. Referências

- ABIQUIM, “Consumo Energético da Indústria Química Brasileira”, São Paulo, 1999.
- Bejan A.; Tsatsaronis G.; Moran M., “Thermal Design and Optimization”, John Wiley & Sons, 1996.
- Casarotto F^o, N.; Kopittke, B. H., “Análise de Investimentos”, Editora Atlas S/A. São Paulo, 1996.
- Cerqueira, S. A., “Metodologias de Análise Termoeconômica de Sistemas”, Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 1999.
- Decreto Lei 3.000 de 26/03/1999 - RIR/99. “Tributação das Pessoas Jurídicas” (Livro 2, Parte II, Subseção II).
- Hess, G.; Marques, J. L.; Paes, L. C. R.; Puccini, A., “Engenharia Econômica”, Difusão Editorial S/A. São Paulo, 1980.
- Lozano, M. A., Valero, A. “Theory of the Exergetic Cost”. Energy, vol. 18, No. 9, pp. 939-960, 1993.
- Valero A.; Lozano M. A., “Curso de Termoeconomía”, Volume II, Universidad de Zaragoza, España, 1994.

THERMOECONOMIC ANALYSIS OF THE UTILITIES DEPARTMENT OF A FOOD PROCESSING PLANT

Marcos Sandrini

Corn Products Brasil – Maintenance Department. R. Francisco Manoel da Cruz, 11. Zona Industrial, Balsa Nova, PR., Brazil. CEP 80.650-000
sandrini@cornproducts.com.br

José Antonio Velásquez

Pontificia Universidade Católica do Paraná - PUCPR – Mechanical Engineering Department. R. Imaculada Conceição, 1155, Prado Velho, Curitiba, PR, Brazil. CEP 80215-901
velasqz@rla01.pucpr.br

Abstract. *This work describes exergetic and thermoeconomic analyses of the steam production and distribution department of a corn wet milling plant. Historically averaged data related to the process in operation at present were used in order to quantify main irreversibilities and to compute exergetic costs for each stream of matter or energy. Considering these results modifications were proposed resulting in three alternative productive structures for the utilities department. Thermoeconomic analyses were conducted for each of these proposed cases, calculating exergetic and economic costs. The final assessment of the alternative projects was made by using two economic criteria — internal return rate and liquid present value. Final results showed the economic effect and the potential to reduce fuel consumption for each proposed productive scheme.*

Keywords. *Exergy analysis, thermoeconomic analysis, steam production and distribution system.*