

# ANÁLISE EXÉRGÉTICA E TERMOCONÔMICA DA PLANTA DE UTILIDADES DE UMA REFINARIA DE PETRÓLEO

**Patrícia Alves de Araújo**

pat.araujo.poli@gmail.com

**Prof. Dr. Silvio de Oliveira Júnior**

silvio.oliveira@poli.usp.br

***Resumo.** O projeto contempla a análise de sistemas de utilidades em refinarias de petróleo de grande porte com cogeração. O trabalho tem foco na exergia da geração dessas utilidades. Foi feita a caracterização dos processos de conversão de energia existentes na planta de refino e na planta de utilidades de uma refinaria típica, assim como o estudo dos conceitos e formas de análise exérgética e termoeconômica. Com base em um fluxograma básico da planta de utilidades, foram realizados os balanços de massa, energia e custo – em base exérgica. A análise termoeconômica foi utilizada para determinação dos custos de produção dos fluxos existentes na planta. A etapa final contemplou a proposição de melhorias visando diminuir a destruição da exergia na planta. Para auxílio nos cálculos foi utilizado o software ESS – Engineering Equation Solver.*

***Palavras chave:** exergia, termoeconomica, utilidades, cogeração, refinaria.*

## 1. Introdução

A complexidade de análise de uma unidade de produção de petróleo e gás é explicada pela sua variedade de componentes e de formas de energia tais como: energia química de combustíveis, energia elétrica e energia térmica para aquecimento ou resfriamento. Cada uma atendendo a objetivos distintos e possuindo métodos de produção específicos.

A análise da eficiência energética, seja em termos globais ou para cada componente, é baseada geralmente na primeira lei da termodinâmica. O cálculo da eficiência consiste em estabelecer a razão entre a quantidade de energia associada ao efeito desejado e a quantidade de energia necessária para realizá-lo. A perda é dita como a diferença entre estas quantidades de energia. Esta abordagem é apenas quantitativa, não havendo distinção entre as diferentes qualidades dos tipos de conversão de energia.

Do ponto de vista da exergia, o cálculo da eficiência leva em conta as condições termodinâmicas do ambiente externo à unidade em que se realiza o processo global ou ao componente em que se efetua um processo específico. E o novo cálculo para a eficiência visa estabelecer a razão entre a perda da capacidade de transformação da quantidade de energia utilizada para obtenção do efeito desejado e a perda da capacidade de transformação da quantidade de energia necessária para realizá-lo. A capacidade de transformação de uma determinada quantidade de energia é medida em relação ao ambiente externo e é referida a cada uma de suas formas. Essa capacidade de transformação é denominada exergia. A vantagem desta análise é que a exergia leva as várias formas de energia à mesma base de comparação, pois a exergia que acompanha um processo possui a mesma capacidade de transformação para qualquer um deles, diferentemente da energia. Ou seja, a exergia final pode ser comparada à exergia inicial em qualquer processo. Este é o princípio básico da análise exérgica.

E dada a diversidade de componentes e de formas de energia envolvidas no caso do estudo de uma unidade de produção de petróleo e gás, a não avaliação das distintas qualidades energéticas pode mascarar os resultados e gerar tomadas de decisões equivocadas. Para evitar esse problema, a avaliação da segunda lei da termodinâmica identifica as qualidades dos processos através dos conceitos de entropia e sua geração apresentados por este postulado.

A análise exérgica, então, se torna conveniente na medida em que torna os resultados mais precisos, fornecendo condições para melhores decisões em relação a mudanças nos projetos ou condições operacionais das unidades. Ela facilita também a análise termoeconômica, que identifica diferentes opções de qualidades de energia e de processos, levando a diminuição de custos.

## 2. Descrição da Planta de utilidades

As utilidades são os sistemas projetados para suprir a energia e os fluidos auxiliares ao processo de refino de petróleo, dentre eles: vapor, ar comprimido, água de resfriamento etc.

Para simplificar o equacionamento, foi elaborada uma planta síntese das utilidades de uma refinaria típica. Nela, os equipamentos são agrupados formando equipamentos equivalentes típicos. Dessa forma, as três turbinas que acionam os turbo-geradores, por exemplo, foram agrupadas em um único equipamento equivalente, no qual as vazões de entrada e saída e potência elétrica produzida são na realidade a soma dessas variáveis relativas a cada uma dessas turbinas.

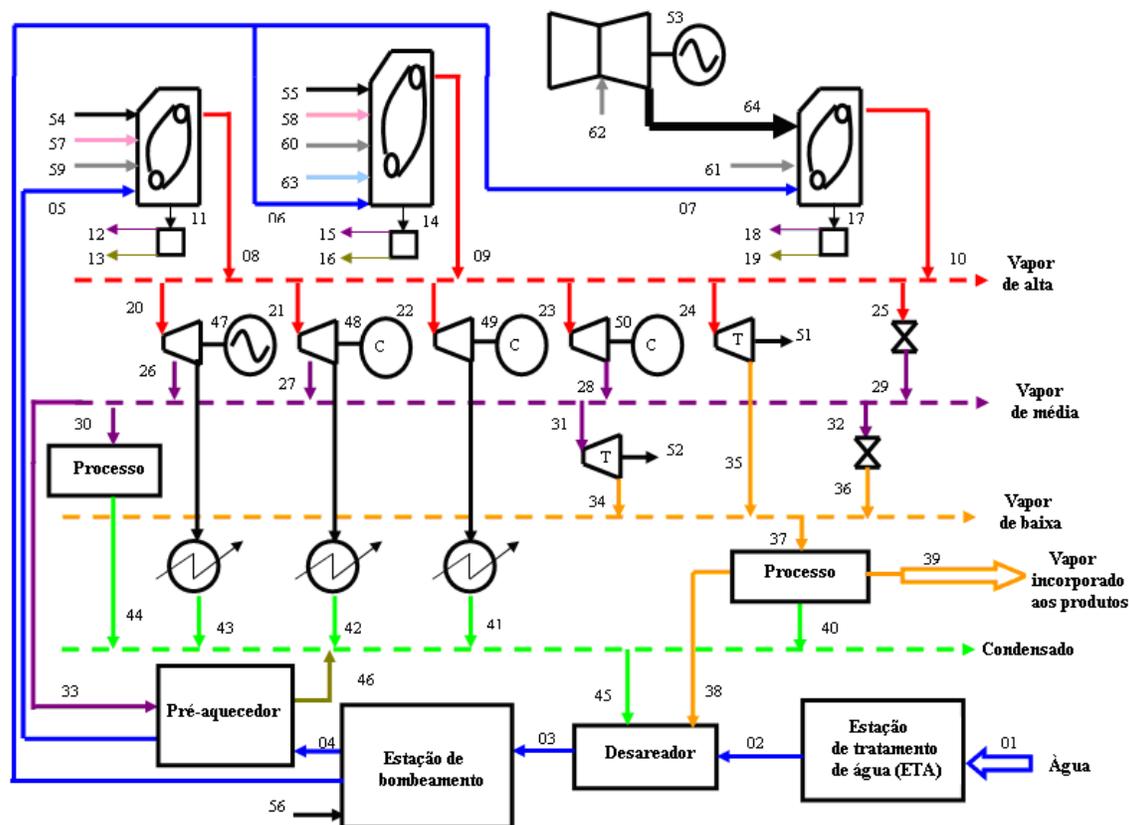


Figura 1. Planta de utilidades síntese de uma refinaria típica.

Com a seguinte legenda para os fluxos:

- 1-7: Líquido comprimido;
- 8-10,12,15,18,20-39: Vapor;
- 11,14,17: Purga;
- 13,16,19,46: Líquido saturado;
- 40-45: Condensado;
- 47-56: Potência elétrica;
- 57-58: óleo combustível;
- 59-62: gás combustível;
- 63: gás CO;
- 64: gases de escape.

Uma breve explicação pode ser dada levando em conta o caminho da água na planta. Inicialmente a água passa por um processo de tratamento, desaeração, bombeamento e pré-aquecimento (apenas para a caldeira de óleo e gás) antes da entrada nas caldeiras (geradores de vapor). Essas caldeiras queimam uma série de combustíveis para gerar vapor de alta pressão que aciona turbinas a vapor responsáveis pela geração de energia elétrica. Para complementar a demanda de vapor de alta pressão e de eletricidade existe o sistema de cogeração: uma turbina a gás gerando eletricidade e uma caldeira de recuperação gerando vapor de alta a partir dos gases exaustos da primeira e de queima de gás combustível adicional. Deve-se observar os três níveis de pressão existentes na planta: alta, média e baixa; cada um com suas finalidades na planta de refino. É interessante observar também o retorno do condensado dado pelas correntes 45 e 38.

As tabelas a seguir apresentam os parâmetros de operação com os dados típicos de processo de uma refinaria.

Tabela 1 – Estado dos fluxos de água da planta de utilidades.

Nº	Corrente	Vazão (t/h)	Pressão (kPa)	Temp. (°C)
01	líq. comp.	282,4	100	25
02	líq. comp.	282,6	100	25
03	líq. comp.	564,8	450	140
04	líq. comp.	120,6	12600	140
05	líq. comp.	120,6	12600	180
06	líq. comp.	284,3	14100	140
07	líq. comp.	160,0	14100	140
08	Vapor	117,0	8720	485
09	Vapor	276,0	8720	485
10	Vapor	158,4	8720	485
11	Purga	3,6	9120	304
12	Vapor	0,9	1370	285
13	líquido sat.	2,7	1370	200
14	Purga	8,3	9120	304
15	Vapor	2,0	1370	285
16	líquido sat.	6,3	1370	200
17	Purga	1,6	9120	304
18	Vapor	0,4	1370	285
19	líquido sat.	6,3	1370	200
20	Vapor	219,0	8720	485
21	Vapor	115,0	8720	485
22	Vapor	40,0	8720	485
23	Vapor	130,0	8720	485
24	Vapor	29,0	8720	485
25	Vapor	20,0	8720	485
26	Vapor	189,0	1370	285
27	Vapor	110,0	1370	285
28	Vapor	130,0	1370	285
29	Vapor	20,0	1370	285
30	Vapor	89,6	1370	285
31	Vapor	353,0	1370	285
32	Vapor	0	1370	285
33	Vapor	9,7	1370	285
34	Vapor	353,0	450	200
35	Vapor	29,0	450	200
36	Vapor	0	450	200
37	Vapor	382,0	450	200
38	Vapor	60,3	450	200
39	Vapor	282,4	450	200
40	condensado	39,3	450	140
41	condensado	40,0	450	140
42	condensado	5,0	450	140
43	condensado	30,0	450	140
44	condensado	89,6	450	140
45	condensado	221,9	450	140
46	líquido sat.	9,7	1370	200

Tabela 2 - Potências da planta de utilidades.

Nº	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
Potência (kW)	19200	12000	10000	12000	2900	9207	37600	-400	-691	-3300

Tabela 3 – Correntes de combustível e gases de escape.

No.	Corrente	Vazão (t/h)	Temperatura (°C)
57	Óleo combustível	6,2	165
58	Óleo combustível	2,0	165
59	Gás combustível	2,0	30
60	Gás combustível	3,5	30
61	Gás combustível	7,2	30
62	Gás combustível	9,0	30
63	Gás CO	450,0	620
64	Gases de escape	450,0	515

### 3. Metodologia

Para fazer a análise detalhada da planta devem ser realizados, para cada equipamento, balanços de massa, energia, exergia e custos (em base exergética). Além de definir as eficiências exergéticas, assim como o consumo de exergia e as irreversibilidades de cada processo.

#### 3.1 Análise Exergética

##### 3.1.1 Determinação dos fluxos de exergia total

Faz-se necessário, primeiramente, calcular os fluxos de exergia e a exergia específica de cada uma das correntes apresentadas na planta síntese. A exergia física específica de uma corrente é dada pela equação:

$$b_i = (h_i - h_o) - T_o(s_i - s_o) \quad (1)$$

O fluxo de exergia é determinado pela multiplicação da exergia específica pela vazão mássica da corrente em questão.

A exergia dos combustíveis deve considerar tanto a exergia física quanto a exergia química, conforme equação abaixo:

$$b_{comb} = b_{fis} + b_{quim} \quad (2)$$

Para a parcela da exergia física, a Eq. 1 pode ser reescrita de acordo com as considerações que se faça a respeito do combustível. Tomando como exemplo o óleo combustível, que pode ser considerado uma substância incompressível de calor específico constante, a Eq. 1 se desmembrada como:

$$b_{fis} = c_p(T - T_o) - T_o c_p \ln\left(\frac{T}{T_o}\right) \quad (3)$$

Já a exergia química dos combustíveis pode ser estimada através de uma correção do seu Poder Calorífico Inferior. O fator de correção é calculado com fórmulas baseadas na composição do combustível em questão.

Como exemplo o cálculo da exergia química do óleo combustível foi proposto por (Szargut, Morris e Steward) conforme segue na expressão abaixo:

$$b_{quim} = \beta \cdot PCI$$

$$\beta = 1,0401 + 0,1728\left(\frac{z_{H_2}}{z_C}\right) + 0,0432\left(\frac{z_{O_2}}{z_C}\right) + 0,2169\left(\frac{z_S}{z_C}\right)\left(1 - 2,0628\frac{z_{H_2}}{z_C}\right) \quad (4)$$

Onde  $z_i$  é a fração de cada componente em base mássica.

Os fluxos relacionados com trabalho mecânico e os fluxos relativos à energia elétrica (enumerados de 47 a 56), apresentam como taxas exergéticas os mesmos valores de suas potências.

### 3.1.2 Rendimentos exergéticos

O rendimento exergético estabelece a razão entre a perda da capacidade de transformação da quantidade de energia utilizada para obtenção do efeito desejado e a perda da capacidade de transformação da quantidade de energia necessária para realizá-lo. Sendo dado por:

$$(\eta_b) = \frac{\sum B_{util}}{\sum B_{comb}} \quad (5)$$

Onde  $B_{comb}$  não refere-se especificamente à exergia dos combustíveis, mas sim a toda exergia consumida pelo equipamento ou processo.

Outro parâmetro importante da análise exergética é o fator  $f_i$ , calculado para cada equipamento ou processo e definido como a razão entre a exergia consumida no equipamento e a exergia total consumida na planta:

$$f_i = \frac{\sum(B_{comb,i})}{\sum(B_{comb})} \quad (6)$$

O fator  $f_i$  permite avaliar a importância de cada módulo no consumo de exergia da planta. Ou seja, através dele, identificam-se os principais responsáveis pelo uso da exergia da instalação, direcionando assim os procedimentos de otimização do uso de insumos energéticos

### 3.2 Análise termoeconômica

A análise termoeconômica tem como finalidade a determinação dos custos dos produtos gerados, assim como dos custos das irreversibilidades (exergia destruída). De uma maneira geral, ela estuda o processo de formação de custos, tendo como base de locação dos mesmos o valor termodinâmico de cada produto.

A análise termoeconômica deve ser feita após a análise exergética detalhada do sistema, as etapas que seguem são:

- Balanço de custos para cada equipamento;
- Critérios de partição de custo para equipamentos com mais de um produto.

### 3.2.1 Balanços de custos

O balanço de custos de um equipamento ou processo é dado pela Eq. 7:

$$\sum Despesas = \sum Custos. \quad (7)$$

Sendo as despesas referentes ao custo dos insumos, ao custo de capital, da operação e da manutenção do equipamento. E as despesas referentes aos custos produtos gerados. E cada termo apresenta dimensão de custo por unidade de tempo (normalmente US\$/segundo).

Tomando um volume de controle em torno de um equipamento que consome os insumos  $a$ ,  $b$  e  $c$ , e gera os produtos  $e$ ,  $f$  e  $g$ ; e introduzindo o custo unitário médio,  $c_i$ , teremos:

$$c_a N_a + c_b N_b + c_c N_c + \dot{C}_{eq} = c_e N_e + c_f N_f + c_g N_g$$

com

$$c_i = \frac{C_i}{N_i} \quad (8)$$

Onde a grandeza  $N_i$  pode ser vazão em massa, em volume, fluxo de energia ou exergia. Neste trabalho, os custos serão tomados em base exergética.

Os custos dos equipamentos, com dimensão de custo por unidade de tempo, são obtidos através de análises econômicas que consideram a amortização, operação e manutenção dos mesmos, ou através da consideração dos custos típicos para cada equipamento. Nos casos em que o equipamento já foi amortizado, o cálculo do custo do equipamento é feito apenas considerando operação e manutenção. Neste trabalho será utilizado o cálculo do equipamento amortizado.

Nesse trabalho são considerados custos típicos para a turbina a gás e caldeira de recuperação, e para os demais equipamentos calculados pelo método proposto por BOEHM (1987). Nele, o custo de equipamentos é baseado em um custo e uma capacidade de referência, respectivamente  $C_r$  e  $S_r$ . Assim, estima-se o custo de equipamentos com características construtivas similares mas cuja capacidade, representada por  $S$ , é diferente da referência:

$$C_{eq} = C_r \left( \frac{S}{S_r} \right)^m \quad (9)$$

Os parâmetros  $C_r$ ,  $S$ ,  $S_r$  e  $m$  encontram-se na Tab. 4. O valor de  $S$ , como dito acima, é relativo à capacidade do equipamento. Para caldeiras, é representado pela capacidade de geração de vapor, enquanto que para turbinas utiliza-se sua capacidade de geração de energia elétrica.

Tabela 4 - Parâmetros para o cálculo do custo de diversos equipamentos.

Equipamento	M	$C_r$	$S_r$	S
Caldeira	0,59	340	$10^3$	$\dot{m}$ [lb/h]
Turbina a vapor	0,68	25	$10^3$	$\dot{W}$ [kW]
Condensador	0,55	3	10	$\dot{W}$ [kW]
Bomba	0,58	7,5	100	$\dot{W}$ [kW]

O custo de dos equipamentos por unidade de tempo é determinado pela Eq. 10.

$$\dot{C}_{Aq} = \frac{C_{Aq} \cdot f_a}{3600 \cdot T_{op}} \quad (10)$$

$$f_a = \frac{i}{1 - (1+i)^{-N}}$$

Onde:

- $f_a$ : Fator de amortização (adimensional);
- $i$ : Taxa de juros (% aa);
- $N$ : Tempo de vida da instalação (em anos);
- $T_{op}$ : Número de horas de operação (h/ano).

Deve-se considerar também o custo de operação e manutenção por unidade de tempo. Neste trabalho foram utilizados custos típicos de operação e manutenção para cada equipamento.

O taxa de custo de cada equipamento é então a soma do custo de aquisição com os custos de manutenção e operação, no caso da planta não amortizada; e apenas os custos de operação e manutenção no caso da planta amortizada.

Os valores de  $c_a$ ,  $c_b$  e  $c_c$  são dados de entrada (obtidos através da análise termoeconômica dos equipamentos que o fornecem ou pelo preço de compra) e os valores de  $c_e$ ,  $c_f$  e  $c_g$  são as incógnitas da equação.

Como o número de equações gerado pelo balanço de custos de cada equipamento é inferior ao número de incógnitas (que são os custos específicos dos produtos), tornam-se necessárias relações suplementares. Essas relações derivam de considerações ligadas a aspectos econômicos e são conhecidas como critérios de partição de custos.

### 3.2.2 Métodos de partição de custos

Os critérios tradicionalmente utilizados são:

- Método da igualdade;
- Método da extração;
- Método do subproduto.

Entretanto, apenas os dois primeiros serão utilizados já que no último não se utiliza a base exergetica como escala de valor.

No método da igualdade considera-se que os equipamentos ou processos em questão satisfazem todas as demandas exergeticas e, logo, os produtos têm o mesmo custo exergetico específico. Por exemplo, aplica-se esse método para uma turbina cuja geração de vapor e eletricidade são igualmente importantes para suprir as necessidades da planta. Neste caso, o rendimento exergetico da turbina é dado por:

$$(\eta_b)_t = \frac{W_e + B_{ts}}{B_{te}} \quad (11)$$

No método da extração considera-se que os equipamentos ou processos têm uma única função relevante, e logo o produto resultante dessa função é responsável por todo custo do equipamento. Tomando o exemplo de uma turbina responsável apenas por gerar eletricidade, a mesma “carrega” o custo da exergia consumida, de capital, operação e manutenção do equipamento e, o custo do vapor de saída da turbina (vapor de baixa ou de média) será igual ao custo do vapor de entrada da turbina (vapor de alta). O seu rendimento exergetico é definido como:

$$(\eta_b)_t = \frac{W_e}{B_{te} - B_{ts}} \quad (12)$$

Neste trabalho, os cálculos foram feitos de acordo com o método da igualdade, já que em uma refinaria tanto a geração de energia elétrica quanto a de vapor são produtos importantes da planta de utilidades.

### 3.3 Avaliação exergoeconômica

Com posse dos custos exergeticos de todos os fluxos, pode-se avaliar cada componente do sistema separadamente através da utilização de alguma variáveis exergoeconômicas. Essa avaliação visa a determinação de ações que diminuam os custos de operação do sistema.

#### 3.3.1 Irreversibilidade

A irreversibilidade,  $I_i$ , quantifica a exergia destruída no processo ou equipamento. A irreversibilidade é calculada pela subtração dos recursos consumidos (combustível) pelos produtos gerados, ambos avaliados em termos de suas exergias. Ou seja,  $I_i$  de cada processo é calculada pela subtração entre o denominador e o numerado utilizados na cálculo do seu rendimento, conforme a equação abaixo:

$$\dot{I}_i = \sum \dot{B}_{comb} - \sum \dot{B}_{produtos} \quad (13)$$

É interessante também o cálculo da taxa de irreversibilidade,  $r_i$ , de cada equipamento, que correspondem à razão entre a irreversibilidade gerada no equipamento e a irreversibilidade total do sistema.

$$r_i = \frac{\dot{I}_i}{\dot{I}_{total}} \quad (14)$$

#### 4. Resultados

O rendimento exergético total da planta é dado pela expressão abaixo e seu valor calculado é de 31%.

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{m}_{39}(b_{39} - b_1) + W_{47} + W_{48} + W_{49} + W_{50} + W_{51} + W_{52} + W_{53} - W_{54} - W_{55} - W_{56}}{b_{\text{óleoComb}}(\dot{m}_{57} + \dot{m}_{58}) + b_{\text{GásComb}}(\dot{m}_{59} + \dot{m}_{60} + \dot{m}_{61} + \dot{m}_{62}) + b_{\text{GásCO}}\dot{m}_{63}} \quad (15)$$

As tabelas abaixo apresentam os resultados da análise exergética e termoeconômica, com os custos gerados para todos os fluxos através do método da igualdade.

Tabela 5 - Custos mássicos dos fluxos.

Fluxos	Custos específicos pelo método da igualdade (US\$/ton)	Fluxos	Custos específicos pelo método da igualdade (US\$/ton)
1	0,00	27	22,62
2	0,05	28	22,70
3	3,26	29	30,49
4	5,27	30	24,14
5	6,87	31	24,14
6	5,36	32	24,14
7	5,36	33	24,14
8	41,84	34	21,47
9	24,97	35	20,87
10	31,75	36	24,14
11	11,85	37	21,43
12	32,12	38	21,43
13	5,13	39	21,43
14	7,07	40	2,12
15	19,17	41	2,39
16	3,06	42	1,79
17	8,99	43	2,01
18	24,38	44	2,12
19	3,90	45	2,12
20	30,49	46	3,86
21	30,49	64	3,86
22	30,49	condensado	2,12
23	30,49	vapor de baixa	21,43
24	30,49	vapor de média	24,14
25	30,49	vapor de alta	30,49
26	25,37		

Tabela 6 - Custos médios das correntes de água e energia elétrica.

Fluxos principais	Custo médio pelo método da igualdade (US\$/MWh)
condensado	101,1
vapor de baixa	103,8
vapor de média	91,1
vapor de alta	79,5
eletricidade gerada	96,2

Tabela 7 – Parâmetros de desempenho dos equipamentos da planta.

Componente	Rend. exergético (%)	Fator f	Exergia destruída (kW)	Taxa de irrev. (%)
Caldeira principal	42,91	0,20	56489	17,90
Caldeira de CO	51,65	0,38	93646	29,67
Caldeira de Recuperação	46,97	0,24	64422	20,41
Turbina a Gás	54,09	0,23	54470	17,26
Turbina a vapor 1	83,19	0,17	14129	4,48
Turbina a vapor 2	93,48	0,09	2877	0,91
Turbina a vapor 3	93,11	0,10	3438	1,09
Turbina a vapor 4	79,82	0,02	2246	0,71
Turbina a vapor 5	87,69	0,18	11517	3,65
Turbina a vapor 6	70,60	0,03	4513	1,43
Est. de bomb.	50,41	0,03	7511	2,38
Pré-aquecedor	94,08	0,01	322	0,10
<b>Planta de utilidades</b>	<b>30,97</b>	<b>-</b>	<b>315580</b>	<b>100,00</b>

## 5. Proposição de melhorias

Dadas as altas taxas de exergia destruída na caldeira de CO, na caldeira de recuperação, da caldeira de óleo e gás e da turbina a gás, esses equipamentos devem ser alvo da análise de melhorias que visem aumentar seus rendimentos.

Abaixo seguem algumas propostas de melhorias para diminuir o grau de destruição da exergia nesses equipamentos, visando a otimização dos processos de conversão de energia. Ressalta-se que uma etapa de avaliação da viabilidade de cada proposta é imprescindível antes de sua implementação.

### 5.1 Pré-aquecimento de água

Na planta estudada, apenas a caldeira principal recebe água pré-aquecida. Fazer com que os fluxos 6 e 7 (entrada de água na caldeira de CO e na caldeira de recuperação) passem também pelo pré-aquecedor de água causaria um aumento do rendimento das mesmas.

### 5.2 Aproveitamento do resíduo asfáltico nas caldeiras de óleo

A queima de resíduo asfáltico nas (RASf - óleo ultraviscoso muito pesado, subproduto da Unidade de Desafaltação na planta de refino, de baixo valor comercial) acarretaria uma maior economia operacional dos óleos combustíveis mais leves que têm maior valor no mercado dos derivados.

### 5.3 Turbo-expansor na UFCC

O projeto de um turbo-expansor para aproveitamento da energia dos gases no reator da UFCC (Unidade de Craqueamento Catalítico Fluidizado) já existe em algumas refinarias do Japão (país com as mais modernas refinarias do mundo, de acordo com a SBA – Solomon Brothers Association). Com ele, a energia dos gases provenientes da UFCC é convertida em energia mecânica (turbina) e energia elétrica.

### 5.4 Redução de perdas de vapor

O sistema de retorno de condensado recupera o líquido saturado condensado na rede de vapor e representa considerável economia na vazão de água de alimentação de caldeiras. Esse fator de recuperação pode ser aumentado para aliviar o sistema de produção de água desmineralizada da Estação de Tratamento de Água (ETA) e reduzindo o custo operacional dessa unidade.

## 6. Conclusões

Os valores gerados dos custos de eletricidade e vapor são elevados devido ao valor elevado do gás natural (8 US\$/MWh) usado como referência e a baixa eficiência exergética calculada para a planta (31% aproximadamente).

A discrepância entre os custos em US\$/MWh gerados para o condensado e os fluxos de vapor de baixa, média e alta pressão é devida à diferença entre os valores exergéticos de cada fluxo. O fluxo de menor valor exergético (condensado) apresentou o maior custo exergético unitário, como esperado.

As caldeiras e a turbina a gás apresentaram valores elevados para o fator  $f$ , indicando que esses equipamentos consomem juntos quase a totalidade da exergia fornecida pela planta. Suas taxas de irreversibilidade também foram elevadas, apresentando as principais origens da destruição de exergia.

A caldeira de CO apresentou uma alta taxa de irreversibilidade, sendo responsável por quase 30% de toda destruição de exergia do sistema, em comparação a 18% da caldeira principal e 20% da caldeira de recuperação. É interessante fazer a análise da taxa de irreversibilidade em contrapartida à análise do rendimento exergético, já que a caldeira de CO apresenta o melhor rendimento dentre as três. Essa aparente contradição é facilmente explicada quando se analisa o valor da exergia produzida e consumida em cada equipamento. Apesar da razão entre esses dois valores (cálculo do rendimento) ser maior, a grandeza de ambos é o dobro daquela verificada para as demais caldeiras; logo a diferença entre eles (cálculo da irreversibilidade) é maior. Isso também pode ser verificado através do fator  $f$  desse equipamento, que indica que o mesmo consome 38% da exergia total cedida pela planta.

Através do método de avaliação exergética foi possível avaliar a performance termodinâmica da planta de utilidades de uma refinaria típica de petróleo, assim como o desempenho de cada um de seus componentes. A introdução de fatores que caracterizam a influência de cada equipamento na planta (fator  $f$  e taxa de irreversibilidade) fornecem o mapeamento dos locais de consumo e destruição da exergia, respectivamente.

A termoeconomia possibilitou a determinação dos custos de todos os fluxos existentes na planta, mas também introduziu uma arbitrariedade na escolha do método de cálculo utilizado (no caso, método da igualdade). Com base nos valores gerados, pode-se analisar a estrutura de formação de custos, identificando os processos que tornam a produção onerosa.

De uma maneira geral, a análise exergética e a termoeconomia mostraram-se ferramentas poderosas na difícil tarefa de otimização dos sistemas térmicos, na medida em que possibilitaram a identificação das ineficiências dos processos de conversão de energia, assim como a quantificação do impacto dessas ineficiências nos custos das utilidades. A utilização da planta síntese, com o estudo detalhado de cada um de seus componentes, facilita a atribuição de responsabilidades dos mesmos nessas ineficiências, tornando mais racional a proposição de melhorias que visem a otimização da planta como um todo.

## **7. Recomendações para estudos futuros**

### **7.1 Estudo de externalidades**

Na análise termoeconômica tradicional, como a realizada nesse trabalho, os custos ambientais não são incluídos diretamente e acabam sendo pagos, de forma indireta, pela sociedade devido à degradação ambiental. Esses custos são conhecidos como externalidades ou custos ambientais, e podem também ser quantificados.

Os custos com danos ambientais são tais como a contibuição para chuva ácida e para o efeito estufa, a degradação da qualidade do ar, etc. Uma adequada compreensão desses custos permite uma avaliação econômica mais realista. A metodologia para estabelecer os custos ambientais é baseada nas avaliações de emissões dos combustíveis.

Através desse estudo, fontes alternativas de energia poderiam competir economicamente com fontes tradicionais na aplicação da termoeconomia, o que não acontece na maioria dos estudos, nos quais essas fontes acabam por serem consideradas menos vantajosas economicamente.

## **8. Referências**

<http://www.anp.gov.br/petro/petroleo.asp> (consulta em 27 de outubro de 2008).

BOEHM R. F., "Design analysis of thermal system", John Wiley & Sons Inc, New York, 1987.

COELHO, S. T., Mecanismos para implementação da Cogeração de Eletricidade a partir de Biomassa – Um modelo para o Estado de São Paulo, Tese de Doutorado, Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

FURTADO, R. C., The Incorporation of Environmental Custs into Eletric Power System Planning in Brazil. (Tese de Doutorado) Imperial College, Londres, 1996.

GALLO, W. L. R., GOMES, C. M., 2003, "Exergoeconomic Analysis of a Combined Cycle with Industrial Cogeneration". In: Proceedings of the 16th Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impacts of Energy Systems– ECOS 2003, Copenhagen, Dinamarca.

SZARGUT, J., MORRIS, D.R., STEWARD, F.R., 1988, Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes. New York/Berlin, Hemisphere/Springer.

## **9. Direitos autorais**

O autor é o único responsável pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## **ANÁLISE EXÉRGÉTICA E TERMOECONÔMICA DA PLANTA DE UTILIDADES DE UMA REFINARIA DE PETRÓLEO**

**Patrícia Alves de Araújo**

e-mail: patricia.araujo@poli.usp.br

**Prof. Dr. Silvio de Oliveira Júnior**

e-mail: silvio.oliveira@poli.usp.br

**Abstract.** The project includes the analysis of utilities systems in petroleum refineries with cogeneration systems. The work focuses on the exergy generation of these utilities. For that, there were a study and a characterization of the conversion processes of energy existing in the refining and in the utilities plant, as well as a study of the concepts of exergy and termoeconomic analysis. Based on a basic flowchart for the utilities plant, the calculations of the assessments were made (mass, energy and cost balances – in a basis of exergy). The termoeconomic analysis was used in order to determinate the cost of production of main utilities employed in that refinery. And, aiming to reduce the exergy waste, followed the proposal of improvements. All the calculations were made with the software ESS - Engineering Equation Solver.

**Keywords.** *exergy analysis, termoeconomic analysis, utilities, refinery, cogeneration.*