

ANÁLISE TERMOECONÔMICA DA USINA TERMOELÉTRICA DE DRAX OPERANDO COM CARVÃO MINERAL PULVERIZADO

Silva, Dagoberto Cássio, dagoberto@varginha.cefetmg.edu.br¹
Silva, Rogério José, rogeriojs@unifei.edu.br²

¹CEFET-MG - Campus VIII - Rua Presidente Antonio Carlos, 356, Varginha-MG, Cep37000-002

²Universidade Federal de Itajubá, IEM – Inst. de Eng. Mecânica - Av. BPS, 1303, Itajubá-MG, 37500-903

Resumo: O crescente aumento da demanda de energia elétrica no mundo, aliado às preocupações de ordem ambiental, e a conservação de fontes de energia vêm exigindo atenção para o uso racional de insumos e projetos mais eficientes e ambientalmente menos impactantes. As reservas mundiais de carvão mineral, sua disponibilidade e preço mantêm a sua utilização em larga escala. No caso da geração termoeétrica, o carvão mineral ainda é o principal energético utilizado. Assim, há a necessidade de estudos contínuos que objetivem à melhoria e otimização das unidades de geração, visando aumentar sua eficiência, reduzir o consumo de carvão por kW gerado e, por consequência, reduzir também as emissões de CO₂. Este trabalho apresenta uma análise termoeconômica da Usina Termelétrica Drax, a qual queima carvão mineral pulverizado em suas caldeiras. O complexo de Drax, localizado em Yorkshire na Inglaterra, é constituído de 6 unidades gerando cada uma 660 MWe. A partir das características gerais do esquema funcional e do diagrama funcional com agregação de equipamentos, realizou-se um estudo termoeconômico da instalação baseado na Teoria do Custo Exergético. Com a configuração da unidade em função do nível de agregação, dividiu-se a mesma em 17 subsistemas, e as propriedades termodinâmicas dos 44 fluxos calculados, definindo-se os fluxos que constituem recursos, produtos e resíduos. Através das proposições da Teoria do Custo Exergético obteve-se a matriz de incidência representativa da instalação e, com o uso de equações auxiliares, realizada a montagem da matriz de incidência expandida. A partir do vetor de valoração externa e com o uso do método de inversão de matrizes, foram obtidos os custos exergéticos e custos exergéticos unitários dos fluxos constituintes da Unidade de Drax. Com os valores determinados calcularam-se: os rendimentos energéticos e exergéticos, as irreversibilidades, as frações da irreversibilidade total e os parâmetros exergéticos. Com o vetor de valoração referente aos custos de capital, combustível, operação e manutenção, obtiveram-se os custos exergoeconômicos dos fluxos da unidade de Drax, para quatro cenários com alteração dos custos do carvão mineral e de financiamento. Os resultados gerados pela análise termoeconômica possibilitaram localizar e quantificar os equipamentos menos eficientes e que merecem maior atenção no projeto de uma nova instalação e na operação de uma unidade de geração termelétrica.

Palavras-chave: Análise Termoeconômica; Exergia; Usinas Termoeletricas; Carvão Mineral.

1. INTRODUÇÃO

O crescente aumento da demanda de energia elétrica no mundo, aliado às preocupações de ordem ambiental, e a conservação de fontes de energia vêm exigindo atenção e esforços para o uso racional de insumos e projetos mais eficientes e ambientalmente menos impactantes. As reservas mundiais de carvão mineral, sua disponibilidade e preço mantêm a sua utilização em larga escala. No caso da geração termoeétrica, o carvão mineral continua sendo o principal energético utilizado. Assim, há a necessidade de estudos contínuos que objetivem à melhoria e otimização das unidades de geração, visando aumentar sua eficiência, reduzir o consumo de carvão por kW gerado e, por consequência, reduzir também as emissões de CO₂ para a atmosfera. Este trabalho apresenta a análise termoeconômica realizada na unidade 6 do complexo Drax, a qual queima carvão mineral pulverizado em suas caldeiras. O complexo de Drax, localizado em Yorkshire na Inglaterra, gera cerca de 4000 MWe, sendo 660 MWe gerados em cada uma das seis unidades do complexo. Neste trabalho a análise termoeconômica utilizada, a qual combina a análise exergética e princípios econômicos, cuja conexão se faz através da Teoria do Custo Exergético de Valero et al. (1986, 1987), permitiu avaliar termodinamicamente cada equipamento da unidade Drax 6 e seus custos monetários de geração elétrica para cenários com quatro condições financeiras diferentes e três custos distintos do carvão mineral utilizado.

2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA UNIDADE TERMELÉTRICA DRAX 6

No trabalho de Silva (2004) são mostradas as condições de operação para a unidade térmica Drax 6, conforme dados apresentados na Tabela 1. A partir do esquema geral da unidade com seus principais componentes e o fluxograma das linhas de vapor, água de alimentação, gases de combustão, combustível e corrente elétrica, elaborou-se o diagrama funcional, adotado com o nível de agregação considerado para o estudo termoeconômico, de acordo com a Figura 1.

Tabela 1. Características gerais da unidade térmica Drax 6.

Condição	Valor
Pressão do vapor na saída do superaquecedor	16,65 MPa
Temperatura do vapor na saída do superaquecedor	568°C
Pressão na válvula “stop” antes da turbina de alta pressão	15,96 MPa
Pressão do vapor na entrada do reaquecedor	4,34 MPa
Temperatura do vapor na entrada do reaquecedor	371°C
Pressão do vapor na saída do reaquecedor	4,13 MPa
Temperatura do vapor na saída do reaquecedor	568°C
Vazão mássica de vapor na saída do superaquecedor	563 kg/s
Vazão mássica do vapor na saída do reaquecedor	466 kg/s
Temperatura da água de alimentação na saída do 9º aquecedor	254°C
Pressão da água de alimentação na saída do 9º aquecedor	19,4 MPa
Pressão de vácuo no condensador	5,37 kPa
Pressão de descarga da bomba de condensado	3,78 MPa
Pressão de descarga da bomba de alimentação da caldeira	22,0 MPa
Temperatura de entrada dos gases no preaquecedor de ar	335°C
Temperatura de saída dos gases do preaquecedor de ar	120°C
Temperatura do ar na entrada do preaquecedor de ar	32°C
Temperatura do ar na saída do preaquecedor de ar	291°C
Vazão de ar preaquecido na entrada da caldeira	335,7 m ³ /s
Variação de pressão no ventilador de insuflamento de ar da caldeira	475 mmca
Eficiência global do ventilador de ar da caldeira	70,0 %
Consumo do blend de carvão pulverizado na caldeira	72,917 kg/s
Poder calorífico inferior do blend de carvão pulverizado	27000 kJ/kg
Consumo de ar preaquecido na caldeira	216,53 kg/s
Número de aquecedores de superfície da linha de baixa pressão	05
Número de aquecedores de superfície da linha de alta pressão	03
Potência de eixo da turbina de acionamento da bomba de alta	17380 kW
Vazão de ar do ventilador de ar forçado	335,7 m ³ /s
Pressão na saída do ventilador de ar forçado	4,75 kPa
Variação de entalpia na bomba de baixa pressão	6,10 kJ/kg
Variação de entalpia na bomba de alta pressão	25,72 kJ/kg
Variação de temperatura da água de resfriamento	10°C

2.1 Determinação das Propriedades Termodinâmicas

Para o cálculo das pressões das linhas de extrações considerou-se a pressão na válvula antes da entrada na turbina de alta pressão, a pressão do condensador e o número de aquecedores mais um para a determinação da variação de temperatura, ΔT , necessárias à obtenção das pressões de sangrias para iguais diferenças de temperatura.

Para as temperaturas e pressões na linha de água de alimentação da caldeira considerou-se a temperatura da água de alimentação na saída do 9º aquecedor, a temperatura da água de alimentação na saída da bomba de condensado e o número de aquecedores para cálculo do ΔT de temperatura que será igual entre os aquecedores de superfície e o desaerador.

A variação de pressão entre os aquecedores de superfície na linha de baixa pressão calculou-se a partir do ΔP de pressão, entre a pressão na saída do 5º aquecedor, a pressão na saída da bomba de condensado e o número de aquecedores da linha, considerando-se: $P_{10} = P_{28} = P_{34} = P_{41}$.

A variação de pressão entre os aquecedores de superfície na linha de alta pressão calculou-se a partir do ΔP de pressão, entre a pressão na saída do 1º aquecedor, a pressão na saída da bomba de alta e o número de aquecedores da linha.

Os fluxos referentes aos pontos 29, 30, 31, 32, 33, 39, 40 e 41 foram tomados como líquidos saturados nas pressões de extrações dos aquecedores nos quais esses fluxos entram. As demais propriedades foram determinadas através de cálculos termodinâmicos, com rendimento da turbina de alta pressão de 85 % e do conjunto turbina intermediária e de baixa pressão estimado em 90 %, devido ao projeto especial das pás do rotor. No caso da turbina de contrapressão de acionamento da bomba de alta com potência de 17.380 kW, considerou-se que o fluxo expandido seguisse diretamente ao condensador, a pressão do ponto 19 igual à pressão do condensador e o rendimento estimado em 75%, chegando-se

assim ao valor da vazão mássica do fluxo 7. A vazão mássica de água de resfriamento, o calor dissipado ao meio ambiente, assim como as vazões mássicas dos fluxos de extrações nas turbinas foram calculadas fazendo-se um balanço de massa e energia nos aquecedores da água de alimentação e no condensador, considerando-se regime permanente e estado estacionário. A variação de pressão no condensador foi admitida igual a 15 mca e o rendimento da bomba estimado em 75% por possuir mais de um estágio de compressão.

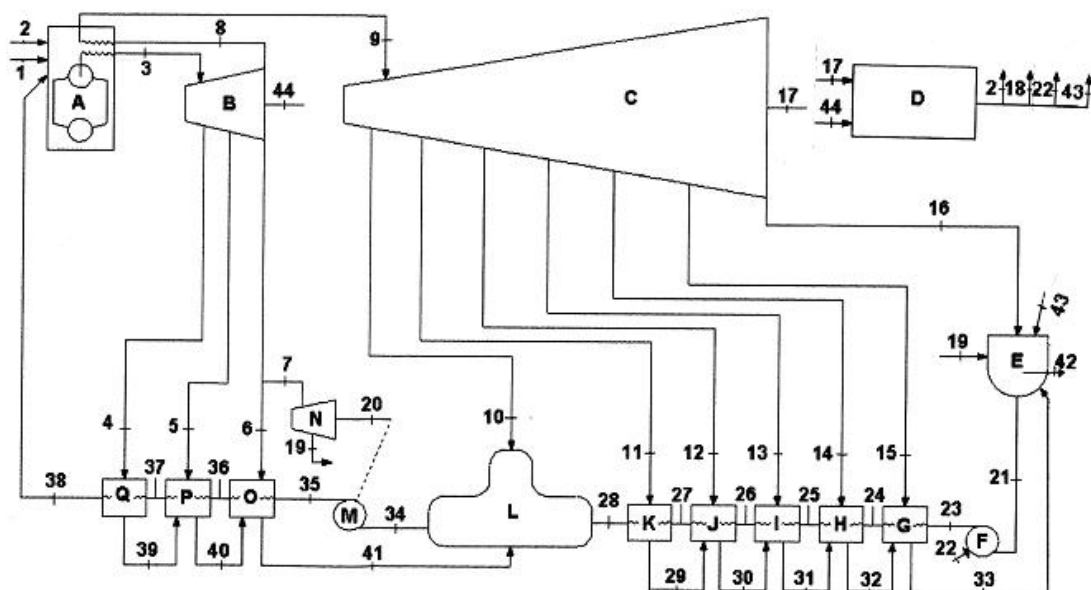


Figura 1. Configuração da unidade térmica Drax 6

A- caldeira, B- turbina de alta pressão, C- turbina intermediária e de baixa pressão, D- gerador, E- condensador mais bomba de resfriamento, F- bomba de baixa pressão, G- 1º aquecedor, H- 2º aquecedor, I- 3º aquecedor, J- 4º aquecedor, K- 5º aquecedor, L- 6º aquecedor (desaerador), M- bomba de alta pressão acionada por turbina, N- turbina de acionamento da bomba de alta pressão, O- 7º aquecedor, P- 8º aquecedor e Q- 9º aquecedor.

2.2 Exergia dos Fluxos

A exergia total de cada ponto da Figura 1 foi determinada através da Eq (1):

$$B_j = \dot{m} \times b_j, \quad (1)$$

em que b_j corresponde à exergia específica, admitindo-se as condições de referência:

$$T_0 = 25^\circ\text{C} \text{ e } P_0 = 0,1 \text{ MPa, que correspondem a } h_0 = 105,1 \text{ kJ/kg e } s_0 = 0,3667 \text{ kJ/kgK.}$$

A exergia total do combustível foi calculada em função da vazão mássica queimada na caldeira e do poder calorífico inferior médio do *blend* de carvão betuminoso pulverizado de valor 27.000 kJ/kg, o qual foi extraído do documento de estudo Indicative BATNEEC (*Best Available Techniques Not Entailing Excessive Cost, 2002*) da AES Drax Power Ltda e do rendimento térmico da unidade estimado em 40 %.

A exergia do ventilador de corrente forçada foi calculada com $\Delta P = 0,475$ mca, massa específica $\rho = 0,645 \text{ kg/m}^3$, temperatura $T = 291 \text{ }^\circ\text{C}$, vazão de ar de $335,7 \text{ m}^3/\text{s}$ e rendimento estimado em 70%. Os valores numéricos da energia total e exergias específicas e totais, assim como as demais propriedades calculadas neste trabalho são apresentadas na Tabela 2. Vale ressaltar que os valores de entalpia e entropia foram obtidos através do programa computacional do livro Moran & Shapiro 2. edição.

3. ESTRUTURA LÓGICA DA UNIDADE TERMELÉTRICA

A determinação da estrutura lógica da unidade térmica que se constitui da matriz de incidência (A), conforme Teoria do Custo Exergético, é obtida a partir da definição F-P-R na Tabela 3. Nesta definição não se considerou o fluxo de resíduo (cinzas) no coletor da caldeira e nem os fluxos de perdas na chaminé e gerador, já que não prejudicam o resultado da análise. O consumo de exergia necessário para a eliminação do resíduo no condensador (calor dissipado ao meio ambiente), fluxo 42, foi considerado como insumo entrando no condensador, fluxo 43, que corresponde à energia elétrica utilizada pelo conjunto moto-bomba da torre de resfriamento para circulação da água pelo condensador, a irreversibilidade interna como a própria exergia do insumo, F, no condensador.

Para a utilização do sistema linear ($\mathbf{A} \times \mathbf{B}^* = \mathbf{Y}^*$), no qual \mathbf{Y}^* representa o vetor de valoração externa, fez-se necessário a transformação da matriz de incidência, que especifica as conexões entre fluxos de entrada e saída e os

subsistemas, A (nxm) em uma matriz de incidência expandida A (mxm) e isso foi levado a cabo obtendo-se (m-n) equações auxiliares através da aplicação das regras de atribuição de custos postuladas pela TCE. A Tabela 4 apresenta essas equações auxiliares e a respectiva proposição associada a TCE.

Tabela 2. Propriedades termodinâmicas dos fluxos da unidade térmica Drax 6.

Fluxo	Tipo	m	T	P	h	s	b	E	B	x
		kg/s	°C	MPa	kJ/kg	kJ/kg/K	kJ/kg	kW	kW	%
1	Comb.	72,917						1968759	1968759	
2	E. Elet.	216,53						2235,44	2235,44	
3	Vapor	563	565	15,96	3482	6,537	1538,15	1960366	865978,79	
4	Vapor	30	501,8	10,67	3368,95	6,563	1417,35	101068,5	42520,5	
5	Vapor	26,41	435,8	6,86	3252,24	6,593	1291,7	85891,66	34113,8	
6	Vapor	18,8	369,4	4,19	3133,35	6,627	1162,68	58906,98	21858,38	
7	Vapor	20,96	369,4	4,19	3133,35	6,627	1162,68	65675	24369,8	
8	Vapor	466,83	371	4,34	3136	6,616	1168,61	1463978,88	545542,21	
9	Vapor	466,83	565	4,13	3591	7,258	1432,29	1676386,53	668635,94	
10	Vapor	13,77	480,1	2,41	3417,3	7,283	1251,14	47056,22	17228,2	
11	Vapor	19,32	389	1,27	3232,53	7,316	1056,81	62452,48	20417,57	
12	Vapor	18,38	296,3	0,61	3052,95	7,352	866,23	56113,22	15921,31	
13	Vapor	17,62	200,8	0,25	2867,6	7,397	667,47	50527,11	11760,82	
14	Vapor	16,9	107,4	0,09	2691,55	7,451	475,33	45487,2	8033,08	
15	V. U.	16,3	65,47	0,025	2511,96	7,509	278,45	40944,95	4538,73	95,5
16	V. U.	364,54	34,17	0,0053	2320,1	7,577	66,33	845769,25	24179,94	89,9
17	P.eixo							528036,14	528036,14	
18	P. Elet.							660000	660000	
19	Cond.	20,96		0,0053	2304,34	7,526	65,77	48298,97	1378,54	89,3
20	P.eixo							17380	17.380	
21	Cond.	474,02	34,17	0,053	143,04	0,493	0,1536	67803,82	72,81	
22	P. Elet.							2901	2901	
23	Água	474,02	34,8	3,78	149,16	0,501	4,0386	70704,82	1914,38	
24	Água	474,02	59,16	3,50	250,53	0,819	10,645	118756,23	5045,94	
25	Água	474,02	83,52	3,23	352,06	1,1147	24,06	166883,48	11404,92	
26	Água	474,02	107,88	2,95	454,16	1,3922	43,461	215280,92	20601,38	
27	Água	474,02	132,24	2,68	557,2	1,6549	68,22	264123,94	32337,64	
28	Água	474,02	156,6	2,41	661,53	1,9056	97,84	313578,45	46378,12	
29	Água	19,32	159,33	0,607	672,31	1,9352	99,8	12989,03	1928,14	
30	Água	37,7	128,04	0,25	537,75	1,6131	61,22	20273,17	2308	
31	Água	55,32	96,75	0,09	405,17	1,2698	30,95	22414	1712,15	
32	Água	72,22	65,46	0,025	273,83	0,8991	10,07	19776	727,25	
33	Água	88,52	34,17	0,0053	143,04	0,4935	0,1536	12661,9	13,6	
34	Água	563	180,96	2,41	767,73	2,1463	132,31	432232	74490,53	
35	Água	563	185,5	22,0	796,7	2,178	151,83	448542,1	85480,3	
36	Água	563	205,32	21,13	884,45	2,3513	187,94	497945,35	105810,22	
37	Água	563	229,68	20,26	993,84	2,5765	230,22	559531,92	129613,86	
38	Água	563	254	19,4	1106,2	2,7965	277,02	622790,6	155962,26	
39	Água	30	284,49	6,86	1260,1	3,1091	337,76	37803	10132,8	
40	Água	56,41	253,2	4,19	1101	2,8224	264,1	62107,41	14897,9	
41	Água	75,21	221,91	2,41	952,01	2,5353	200,67	71600,67	15092,4	
42	Resíduo								842859,74	
43	P. Elet.							3933,43	3933,43	
44	P.eixo							184844,96	184844,96	

Da proposição 1 da TCE geraram-se dezessete equações, correspondentes aos dezessete subsistemas constituintes da unidade, os quais caracterizaram a matriz de incidência A (17x44). Das outras equações indicadas na Tabela 4 produziram-se mais vinte e seis equações auxiliares. Os vinte e seis valores, x_i , para a formação da matriz de incidência expandida A (44x44) são os seguintes:

Tabela 3. Definição F (insumo), P (produto) e R (resíduo) para a unidade térmica Drax 6.

Equipamento	F	P	R
Caldeira	1+2	(3-38)+(9-8)	
Turbina de alta pressão	3-4-5-6-7-8	44	
Turbinas interm. e de baixa pressão	9-10-11-12-13-14-15-16	17	
Gerador	17+44	2+18+22+43	
Condensador mais Torre de resfriamento	16+19+33+43-21	Equipamento dissipativo	42
Bomba de baixa pressão	22	23-21	
1º Aquecedor	15+32-33	24-23	
2º Aquecedor	14+31-32	25-24	
3º Aquecedor	13+30-31	26-25	
4º Aquecedor	12+29-30	27-26	
5º Aquecedor	(11-29)	28-27	
6º Aquecedor - Des aerador	10+28+41	34	
7º Aquecedor	6+40-41	36-35	
8º Aquecedor	5+39-40	37-36	
9º Aquecedor	(4-39)	38-37	
Bomba de alta pressão	20	35-34	
Turbina da bomba de alta	(7-19)	20	

$$-x_1 = -\frac{B_{22}}{B_{43}} = -0,139; \quad -x_2 = -\frac{B_2}{B_{18}} = -0,0034; \quad -x_3 = -\frac{B_3 - B_{38}}{B_9 - B_8} = -5,768; \quad -x_4 = -\frac{B_3}{B_4} = -20,366;$$

$$-x_5 = -\frac{B_3}{B_5} = -25,385; \quad -x_6 = -\frac{B_3}{B_6} = -39,618; \quad -x_7 = -\frac{B_3}{B_7} = -35,535; \quad -x_8 = -\frac{B_3}{B_8} = -1,587;$$

$$-x_9 = -\frac{B_4}{B_{39}} = -4,196; \quad -x_{10} = -\frac{B_5}{B_{40}} = -2,290; \quad -x_{11} = -\frac{B_6}{B_{41}} = -1,448; \quad -x_{12} = -\frac{B_7}{B_{19}} = -17,678;$$

$$-x_{13} = -\frac{B_9}{B_{10}} = -38,810; \quad -x_{14} = -\frac{B_9}{B_{11}} = -32,748; \quad -x_{15} = -\frac{B_9}{B_{12}} = -41,996; \quad -x_{16} = -\frac{B_9}{B_{13}} = -56,853;$$

$$-x_{17} = -\frac{B_9}{B_{14}} = -83,235; \quad -x_{18} = -\frac{B_9}{B_{15}} = -147,318; \quad -x_{19} = -\frac{B_9}{B_{16}} = -27,652; \quad -x_{20} = -\frac{B_{11}}{B_{29}} = -10,590;$$

$$-x_{21} = -\frac{B_{12}}{B_{30}} = -6,898; \quad -x_{22} = -\frac{B_{13}}{B_{31}} = -6,869; \quad -x_{23} = -\frac{B_{14}}{B_{32}} = -11,046; \quad -x_{24} = -\frac{B_{15}}{B_{33}} = -333,730;$$

$$-x_{25} = -\frac{B_{16} + B_{19} + B_{33} + B_{43}}{B_{21}} = -405,24; \quad -x_{26} = -\frac{B_{18}}{B_{22}} = -227,508.$$

4. ANÁLISE TERMOECONÔMICA

4.1 Análise Exergética

Através do sistema matricial ($\mathbf{B}^* = \mathbf{A}^{-1} \times \mathbf{Y}^*$) determinaram-se, utilizando-se o software MATHEMATICA, os custos exergéticos (B^*) dos fluxos constituintes da unidade térmica Drax 6 e o custo exergético unitário (K^*). Da definição F-P-R da Tabela 3, feita segundo a funcionalidade do equipamento (Gallar e Valero, 1988), pode-se obter a exergia do insumo (F) e do produto (P), e o custo exergético do insumo ($\mathbf{F}^* = \mathbf{A}_F \times \mathbf{B}^*$) e do produto ($\mathbf{P}^* = \mathbf{A}_P \times \mathbf{B}^*$) de cada equipamento da unidade térmica, conforme Tabela 5.

Tabela 4. Equações auxiliares para a unidade térmica Drax 6.

Equipamento	Prop.	Equação
Caldeira	5	$B^*_{1} = B_1$
	3a	$(B^*_{9} - B^*_{8}) / (B_9 - B_8) - (B^*_{3} - B^*_{38}) / (B_3 - B_{38}) = 0$
Turbina de alta pressão	2	$B^*_{3} / B_3 - B^*_{4} / B_4 = 0$
	2	$B^*_{3} / B_3 - B^*_{5} / B_5 = 0$
	2	$B^*_{3} / B_3 - B^*_{6} / B_6 = 0$
	2	$B^*_{3} / B_3 - B^*_{7} / B_7 = 0$
	2	$B^*_{3} / B_3 - B^*_{8} / B_8 = 0$
Turbinas (interm. e de baixa)	2	$B^*_{9} / B_9 - B^*_{10} / B_{10} = 0$
	2	$B^*_{9} / B_9 - B^*_{11} / B_{11} = 0$
	2	$B^*_{9} / B_9 - B^*_{12} / B_{12} = 0$
	2	$B^*_{9} / B_9 - B^*_{13} / B_{13} = 0$
	2	$B^*_{9} / B_9 - B^*_{14} / B_{14} = 0$
	2	$B^*_{9} / B_9 - B^*_{15} / B_{15} = 0$
	2	$B^*_{9} / B_9 - B^*_{16} / B_{16} = 0$
Gerador	3a	$B^*_{2} - B_2 - B^*_{18} / B_{18} = 0$
	3a	$B^*_{18} - B_{18} - B^*_{22} / B_{22} = 0$
	3a	$B^*_{22} - B_{22} - B^*_{43} / B_{43} = 0$
Condensador mais bomba de resfriamento	2	$(B^*_{16} + B^*_{19} + B^*_{33} + B^*_{43}) / (B_{16} + B_{19} + B_{33} + B_{43}) - B^*_{21} / B_{21} = 0$
1º aquecedor	2	$B^*_{15} / B_{15} - B^*_{33} / B_{33} = 0$
2º aquecedor	2	$B^*_{14} / B_{14} - B^*_{32} / B_{32} = 0$
3º aquecedor	2	$B^*_{13} / B_{13} - B^*_{31} / B_{31} = 0$
4º aquecedor	2	$B^*_{12} / B_{12} - B^*_{30} / B_{30} = 0$
5º aquecedor	2	$B^*_{11} / B_{11} - B^*_{29} / B_{29} = 0$
Turbina ac. da bomba	2	$B^*_{7} / B_7 - B^*_{19} / B_{19} = 0$
7º aquecedor	2	$B^*_{6} / B_6 - B^*_{41} / B_{41} = 0$
8º aquecedor	2	$B^*_{5} / B_5 - B^*_{40} / B_{40} = 0$
9º aquecedor	2	$B^*_{4} / B_4 - B^*_{39} / B_{39} = 0$

Tabela 5. Exergias e custos exergéticos dos insumos e produtos dos equipamentos da unidade térmica Drax 6.

Equipamento	F (kW)	F* (kW)	P (kW)	P* (kW)
A	1970994,4	1975040	833110	1975040
B	197574	500369	184845	500371
C	566556	1419000	528036	1419000
D	712881	1919370	669070	1919370
E	29432,7	122180	0	0
F	2901	8116,55	1841,57	8116,54
G	5252,38	13155,1	3131,56	13155,1
H	9017,98	22586,5	6358,98	22586,6
I	12356,7	30948,8	9196,46	30948,7
J	15541,5	38924,8	11736,3	38924,8
K	18489,4	46309,1	14040,5	46309
L	78698,7	241749	74490,5	241749
M	17380	58264,7	10989,8	58264
N	22991,3	58264,7	17380	58264,7
O	21663,9	54890,3	20329,9	54890
P	29348,7	74380,8	23803,6	74381
Q	32387,7	82076,1	26348,4	82076

Os rendimentos energéticos, exergéticos, irreversibilidades e frações de irreversibilidades percentuais calculados para cada equipamento constituinte da instalação Drax 6 são apresentados na Tabela 6.

Na Tabela 7 são apresentados os parâmetros exergéticos, dados pelas porcentagens de irreversibilidades geradas em cada equipamento em relação ao total de insumo introduzido no sistema global ($\delta_i = I_i / F_T$), custos exergéticos unitários dos insumos ($K^*_{F_i} = F^*_{i} / F_i$), custos exergéticos unitários dos produtos ($K^*_{P_i} = P^*_{i} / P_i$) e os fatores exergéticos ($r_i = F_i / F_T$).

Tabela 6. Rendimentos, custos exergeticos unitários, irreversibilidades e fração de irreversibilidade percentual dos equipamentos da unidade térmica Drax 6.

Equipamento	η_e (%)	η_b (%)	K	I (kW)	Ψ_i (%)
Caldeira (A)	78,64	42,26	2,453	1137884,18	86,94
Turbina de alta pressão (B)	100	93,56	1,069	12729,00	0,97
Turbinas (interm. e de baixa pressão) (C)	100	93,20	1,073	38520,00	2,94
Gerador (D)	93,85	93,85	1,065	43811,00	3,35
Condensador mais Torre de resfriamento (E)	-----	-----	-----	29432,70	2,25
Bomba de baixa pressão (F)	100	63,48	1,575	1059,43	0,08
1º aquecedor (G)	100	59,62	1,677	2120,82	0,16
2º aquecedor (H)	100	70,51	1,418	2659	0,20
3º aquecedor (I)	100	74,42	1,344	3160,21	0,24
4º aquecedor (J)	100	75,51	1,324	3805,20	0,29
5º aquecedor (K)	100	75,94	1,317	4448,90	0,34
6º aquecedor (desaerador) (L)	100	94,65	1,056	4208,20	0,32
Bomba de alta pressão (M)	93,84	63,23	1,581	6390,20	0,49
Turbina de ac. da bomba de alta (N)	100	75,60	1,323	5611,30	0,43
7º aquecedor (O)	100	93,84	1,066	1334	0,10
8º aquecedor (P)	100	81,11	1,233	5545,10	0,42
9º aquecedor (Q)	100	81,35	1,230	6039,30	0,46
-----	-----	-----	Total	1308760,49	-----

4.2 Análise Exergoeconômica

A partir da matriz de incidência expandida (**A**), pode-se construir outro sistema linear (**Ax** $\Pi = \mathbf{Z}$), no qual as incógnitas são os custos exergoeconômicos (Π) dos fluxos da unidade térmica e (**Z**) o vetor que contém as valorações externas. Para a realização da análise, tendo em vista a falta de informações reais a respeito dos custos dos equipamentos, considerou-se $-\mathbf{Z} = 0$, para quatro condições financeiras e três preços para o combustível carvão mineral.

Adotou-se o valor médio para o investimento de US\$1.600/kW instalado, já levando em conta os equipamentos de controle ambiental, conforme o Atlas de Energia Elétrica do Brasil (Plano Nacional de Energia 2030), e a operação e manutenção (O&M), estimada em 2,15% do custo total de instalação conforme Carvalho (1997).

Tabela 7. Parâmetros exergeticos dos equipamentos da unidade térmica Drax 6.

Equipamento	δ_i (%)	K^*_{Fi}	K^*_{Pi}	r_i (%)
Caldeira (A)	57,730	1,002	2,371	100,0
Turbina de alta pressão (B)	0,646	2,532	2,707	10,024
Turbinas (interm. e de baixa pressão) (C)	1,954	2,505	2,687	28,745
Gerador (D)	2,222	2,692	2,869	36,168
Condensador mais Torre de resfriamento (E)	1,493	4,151	0	1,493
Bomba de baixa pressão (F)	0,054	2,798	4,407	0,147
1º aquecedor (G)	0,108	2,505	4,201	0,266
2º aquecedor (H)	0,135	2,505	3,552	0,457
3º aquecedor (I)	0,160	2,505	3,365	0,627
4º aquecedor (J)	0,193	2,505	3,317	0,788
5º aquecedor (K)	0,226	2,505	3,298	0,938
6º aquecedor (desaerador) (L)	0,213	3,072	3,245	3,993
Bomba de alta pressão (M)	0,324	3,352	5,302	0,882
Turbina de ac. da bomba de alta (N)	0,285	2,534	3,352	1,166
7º aquecedor (O)	0,068	2,534	2,700	1,099
8º aquecedor (P)	0,281	2,534	3,125	1,489
9º aquecedor (Q)	0,306	2,534	3,115	1,643

Os custos de capital foram calculados a partir do valor de retorno de investimento, aplicadas as taxas de 10%, 25 anos; 15%, 20 anos; 20%, 15 anos e finalmente 10% num prazo de amortização de 10 anos, conforme Velásquez (2000) e Souza Jr. (2001). O custo de capital (C_c) foi calculado pela Eq (2):

$$C_c = (\text{investimento} \times \text{FRC}) / 8760 \text{ h/a} \times \text{FC} \times 3600 \quad [\text{US}\$/\text{s}] \quad (2)$$

sendo que o fator de capacidade (FC) foi admitido em 90% e o fator de recuperação de capital (FRC) calculado por intermédio da Eq (3):

$$FRC = i \frac{(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}; \quad (3)$$

sendo "i" a taxa de desconto para "n" anos e portanto para a unidade térmica auto-suficiente, obteve-se:

$$\text{Investimento} \rightarrow 1.600 \text{ US\$/kW} \times 669069,87 \text{ kW} = 1.070511792 \text{ (US\$)},$$

portanto: $FRC_1 = 0,11017$; $FRC_2 = 0,15976$; $FRC_3 = 0,21388$; $FRC_4 = 0,16274$

e $C_{C1} = 4,15 \text{ (US\$/s)}$; $C_{C2} = 6,02 \text{ (US\$/s)}$; $C_{C3} = 8,07 \text{ (US\$/s)}$; $C_{C4} = 6,14 \text{ (US\$/s)}$,

que correspondem ao custo de investimento a ser amortizado em Dólares por segundo de operação da unidade térmica.

Para o combustível, carvão mineral, consideraram-se os valores de US\$ 16,00/t extraído do Plano Nacional de Energia 2030 – Carvão mineral (EPE, 2006), US\$ 85,00/t baseado no mercado mundial do carvão europeu e asiático de 2009 e US\$ 109,48/t negociado nos leilões de compra de energia elétrica A-3 e A-5 de 2009 (EPE, 2009). Para o caso particular do carvão nacional admitiu-se um poder calorífico médio de 16.744 kJ/kg (CE 3300 e CE 4500), e assim, necessitou-se de uma vazão mássica maior para obter-se a mesma quantidade de energia liberada pelo *blend* de carvão betuminoso pulverizado queimado na caldeira da unidade Drax 6.

Dessa forma, obteve-se os valores:

$$C_{\text{comb(A)}} = 1,881 \text{ (US\$/s)}; \quad C_{\text{comb(B)}} = 6,198 \text{ (US\$/s)}; \quad C_{\text{comb(C)}} = 7,983 \text{ (US\$/s)} \text{ e } C_{\text{O\&M}} = 0,730 \text{ (US\$/s)}.$$

Os custos de geração em US\$/s foram calculados através da Eq (4):

$$C_g = C_C + C_{\text{comb}} + C_{\text{O\&M}} \quad (4)$$

Dessa maneira, pode-se chegar aos valores apresentados na Tabela 8. Com estes custos de geração, Tabela 8, foi possível a montagem dos vetores (**Z**) de valoração econômica externa e obtiveram-se através do software MATHEMATICA os custos exergoeconômicos finais, em US\$/MWh e em R\$/MWh para a geração de 660 MWe, referente ao ponto 18 da Figura 2, conforme Tabelas 9 e 10, na sequência.

Tabela 8. Custos de geração para os três preços médios do combustível.

Custo de geração (US\$/s)	Preço médio do combustível (US\$/t)		
	16,00	85,00	109,48
C_{g1}	6,761	11,078	12,863
C_{g2}	8,631	12,948	14,733
C_{g3}	10,681	14,998	16,783
C_{g4}	8,751	13,068	14,853

Tabela 9. Custos exergoeconômicos finais da unidade térmica Drax 6 em US\$/MWh para uma geração de eletricidade de 660 MW.

Taxa de retorno de investimento	Preços do combustível (carvão mineral)		
	US\$ 16,00/t	US\$ 85,00/t	US\$ 109,48/t
10% e 10 anos	44,77	66,85	75,99
10% e 25 anos	34,59	56,67	65,81
15% e 20 anos	44,15	66,24	75,37
20% e 15 anos	54,64	76,73	85,86

Tabela 10. Custos exergoeconômicos finais da unidade térmica Drax 6 em R\$/MWh para uma geração de eletricidade de 660 MW.

Taxa de retorno de investimento	Preços do combustível (carvão mineral)		
	US\$ 16,00/t	US\$ 85,00/t	US\$ 109,48/t
10% e 10 anos	80,18	119,73	136,10
10% e 25 anos	61,95	101,49	117,86
15% e 20 anos	79,07	118,63	134,99
20% e 15 anos	97,86	137,42	153,77

Nota: taxa de conversão do dólar para o Real de R\$ 1,7910 de 04 /03/2010.

5. CONCLUSÕES

A partir da Tabela 6 pode-se notar que o equipamento que mais gera irreversibilidades na unidade térmica é a caldeira, com um valor de 1.137.884,18 kW, que corresponde a 86,94% do total de irreversibilidades da unidade térmica Drax 6. O rendimento exergetico, de 42,26% é menor que o energético, de 78,64%. Isso se deve principalmente as ineficiências na homogeneização do combustível e ar, do controle da granulometria do carvão pulverizado no processo de combustão, no controle do excesso de ar, na troca térmica por radiação na fornalha, na troca térmica com os equipamentos convectivos e nas velocidades não corretas dos fluxos nos trocadores de calor (superaquecedores, atemperador, economizador, reaquecedores e preaquecedor de ar), também pelo grande gradiente finito de temperatura entre a água líquida pressurizada que entra na caldeira e o vapor que a deixa e possivelmente numa inadequada temperatura dos gases que deixam a caldeira causado por sujeira no circuito dos gases.

As turbinas de alta, de intermediária e de baixa pressão apresentam pouca diferença entre os rendimentos porque os seus rendimentos isoentrópicos são elevados. Quanto aos aquecedores da água de alimentação observa-se que os da linha de baixa pressão são os que apresentam os menores rendimentos exergeticos, sendo o primeiro aquecedor o que necessita de maior atenção da equipe técnica, pois seu rendimento exergetico é de apenas 59,62%. O quinto aquecedor também merece atenção devido ao fato de apresentar a maior irreversibilidade, 4.448,90 kW, entre os aquecedores da linha de baixa pressão. O nono aquecedor, da linha de alta pressão, merece cuidados por apresentar uma irreversibilidade de 6.039,30 kW que é a maior observada nos aquecedores da unidade térmica.

As bombas de baixa e de alta pressão também merecem uma atenção especial, pois seus rendimentos são respectivamente de 63,48% e 63,23%, baixos para bombas desse porte. Dos custos exergeticos unitários dos fluxos da unidade o de número 43, de energia elétrica, é o maior. Isso se deve a repercussão das irreversibilidades dos equipamentos precedentes, ao alto valor da vazão mássica de água de resfriamento necessária circular para condensar o vapor úmido que chega ao condensador, ao rotor que apresenta mais de um estágio e a energia elétrica usada no motor da bomba de circulação da torre de resfriamento que vem do gerador.

O custo exergetico unitário do produto da caldeira (ponto 3) é cerca de 2,53 vezes maior que o do combustível processado na caldeira. Essa situação também acontece no fluxo que sai do reaquecedor (ponto 9). Isso é consequência do baixo rendimento apresentado pela caldeira. Na Tabela 5 fica claro que os custos do insumo e produto da caldeira são os mais altos da unidade térmica devido à grande destruição exergetica que tem lugar nesse equipamento. Em seguida vêm os custos de insumo e produto do gerador e do subsistema composto pela turbina intermediária e turbinas de baixa pressão.

Na Tabela 6 observa-se também que é na caldeira, subsistema (A), que ocorre o maior percentual de destruição de exergia do insumo fornecido, totalizando 57,73 % de destruição do total de exergia fornecida pelo carvão mineral a caldeira. O custo exergetico unitário do insumo, K^*_{Fi} , no subsistema (E) representa o maior valor. Esse valor mostra que para cada unidade de insumo no condensador mais torre de resfriamento tem-se que gastar 4,151 vezes mais de exergia.

Com relação ao custo unitário do produto, a bomba de alta pressão, subsistema M, apresenta o maior valor. Nesse caso, são necessárias 5,302 vezes mais exergia para cada unidade de água de alimentação; pode-se notar ainda que o equipamento que processa a maior quantidade de insumo fornecido é a caldeira com um fator exergetico de 100%, seguido do gerador com 36,168% e das turbinas do subsistema (C) com 28,745%. Da Tabela 10, os custos exergoeconômicos finais de geração para os quatro cenários estudados, com investimento de US\$1.600/kW instalado e preços do carvão de R\$ 16,00/t e R\$ 85,00/t tornariam possível, neste momento da economia, a construção de uma instalação termelétrica do porte de Drax 6 gerando 660 MWe, no Sul do Brasil, utilizando o carvão nacional ou o importado da África do Sul, que deve ficar entre R\$ 70,00 e R\$ 75,00 a tonelada métrica. Mesmo com o preço do carvão em R\$ 109,48/t o cenário com taxa de retorno de investimento de 10% e 25 anos com custo de geração final de R\$ 117,86/MWh, ainda pode ser viável, conforme os leilões de compra de energia elétrica A-3 e A-5 de 2009.

Finalizando, a análise exergoeconômica vem confirmar que o fluxo de eletricidade 43, para o sistema de resfriamento, apresenta o maior custo monetário para a unidade térmica Drax 6. Um aumento na eficiência da caldeira e do gerador elétrico certamente contribuirão na diminuição do custo exergoeconômico do fluxo 43.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG pelo apoio financeiro.

7. REFERÊNCIAS

- AES Drax Power Ltd Indicative BATNEEC (Best Available Techniques Not Entailing Excessive Cost) and BPEO (Best Practicable Environmental Option) Assessment of Options for long-term Burning of Coal / Petroleum Coke Blends at Drax Power Station. July 2002. 02 dezembro 2002 <<http://www.aesdrax.co.uk/>>.
- Balanco Energético Nacional, 2009. 05 fevereiro 2010 <http://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2009.pdf>.
- Carvalho, F. R. e Nogueira, L. A. H., 1997. “Termoeconomia Aplicada ao Planejamento da Manutenção de uma Central em Ciclo Combinado” Belém: XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética, 2006. “Plano Nacional de Energia 2030 – Carvão Mineral”. 05 fevereiro 2010

- <[http://www.globalclearinghouse.org/InfraDev/assets%5C10/documents/Brazil%20-%20Plano%20Nacional%20de%20Energia%202030_Carvao%20Mineral%20-%20EPE%20\(2006\).pdf](http://www.globalclearinghouse.org/InfraDev/assets%5C10/documents/Brazil%20-%20Plano%20Nacional%20de%20Energia%202030_Carvao%20Mineral%20-%20EPE%20(2006).pdf)>
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética, Informe Técnico, 2009. “Leilões de Compra de Energia Elétrica A-3 e A-5 de 2009: Preços do Combustível par Cálculo do CVU de Empreendimentos Termoeletrônicos”. 05 fevereiro 2010 <http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leil%C3%B5es%20A-1_A-3_A-5%202009/EPE-DEE-IT%20006-2009%20r1_150509.pdf>.
- Gallar, J. e Valero, A., 1988. “Estudio Termoeconómico de una Planta Simple de Cogeneración”. VIII Congreso Nacional sobre Planificación, Ahorro y Alternativas Energéticas. Pp. 449 – 459. Zaragoza. Universidad de Zaragoza. Dpto. Ingeniería Mecánica. 20 dezembro 2001 <<http://www.teide.cps.unizar.es>>.
- Silva, D.C., 2004. Análise Termoeconômica de uma Usina Termelétrica a Carvão Mineral. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.
- Velázquez, S. G., 2000. “Cogeração de Energia no Segmento de Papel e Celulose: Contribuição à Matriz Energética Brasileira”. Dissertação de Mestrado. Programa interunidades de Pós-Graduação em energia, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Valero, A., Lozano, M. A. e Munoz, M., 1986. “A General Theory Exergy Saving I”. On the exergetic cost. ASME. AES, Vol. 2 – 3. Computer Aided Engineering and Energy Systems. Vol. 3: Second Law Analysis and Modelling. Ed. R. A. Gaggioli, ASME Book No. HO341C, pp. 9 – 16. New York. Universidad de Zaragoza. Dpto. Ingeniería Mecánica.
- Valero, A., Lozano, M. A. e Munoz, M., 1986. “A General Theory Exergy Saving II”. On the Thermoeconomic cost. ASME. AES. Vol. 2 – 3. Computer Aided Engineering and Energy Systems. Vol. 3: Second Law Analysis and Modelling. Ed. R. A. Gaggioli, ASME Book No. HO341C, pp. 9 – 16. New York. Universidad de Zaragoza. Dpto. Ingeniería Mecánica.
- Valero, A., Gallar, J. e Munoz, M., 1987. “The Exergetic Cost and Related Concepts: An Application to a Simple Cogeneration Plant”. ASME. Second Law Analysis of Thermal Systems. Eds. M. J. Moran and E. Sciubba, ASME Book no. Ioo236, pp. 123 – 130. New York. Universidad de Zaragoza. Dpto. Ingeniería Mecánica.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

THERMOECONOMIC ANALYSIS OF THE DRAX THERMOELECTRIC PLANT OPERATING WITH POWDERED COAL

Silva, Dagoberto Cássio, dagoberto@varginha.cefetmg.edu.br¹
Silva, Rogério José, rogeriojs@unifei.edu.br²

¹CEFET-MG - Campus VIII - Rua Presidente Antonio Carlos, 356, Varginha-MG, Cep37000-002

²Universidade Federal de Itajubá, IEM – Inst. de Eng. Mecânica - Av. BPS, 1303, Itajubá-MG, 37500-903

ABSTRACT: *The crescent increase of the electric Power demand in the world, allied to the concerns of environmental order, and the conservation of sources of energy is demanding attention for the rational use of fuel and more efficient designs and less environmental impact. The world reservations of mineral coal, your readiness and price maintain your use in wide scale. The thermoelectric generation the mineral coal remains the primary energy used. Like this, there is the need of continuous studies that seek the improvement and optimization of the units of generation, seeking to increase your efficiency, to reduce the consumption of coal for generated kW and for consequence to reduce the emissions of CO₂ also. This work presents the thermoeconomic analysis of the Drax Thermoelectric Plant, which burns coal powdered mineral in your boilers. The complex Drax, located in Yorkshire, in the England, constituted of 6 units generating each a 660 MWe. Starting from the general characteristics, of the functional outline, and of the functional diagram with aggregation of equipments, a study thermoeconomic of the installation was accomplished based on the Theory of the Exergetic Cost. With the configuration of the unit in function of the aggregation level, this was divided in 17 subsystems and the thermodynamic properties of the 44 flows calculated, defining the flows that constitute resources, products and residues. Through the propositions of Exergetic Cost's Theory was obtained the matrix of representative incidence of the installation, and with the use of auxiliary equations made the assembly of the incidence expanded. Starting from vector of external assessment it expresses and with the use of the inversion method of matrix, it was obtained the exergetic costs and unit exergetic costs of the flows constituent of the unit of Drax, for four sceneries with alteration of the costs of the mineral coal and of financing. With the obtained values they were calculated: the efficiencies energetics and exergetics, irreversibilities, the fractions of the total irreversibility and the exergetics parameters. With the vector of external economic assessment regarding the capital costs, fuel, operation and maintenance, they were calculated the costs exergoeconomic it was possible to locate and to quantify the less efficient equipments and that deserve larger attention in the design of a new installation and in the operation of an unit of generation thermoelectric.*

Keywords: Thermoeconomic Analysis; Exergy; Thermoelectric Power Plant; Coal.