



TERMOECONOMIA NA DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR

Paulo Afonso Pinto de Oliveira

Carlos Daniel Ebinuma

José Luz Silveira

Departamento de Energia - UNESP - Campus de Guaratinguetá

Avenida Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333 - 12.500-000 Guaratinguetá-SP

E-mail: pafonso@feg.unesp.br

ebinuma@feg.unesp.br

joséluz@feg.unesp.br

Resumo. Embora o vapor esteja escoando em linhas isoladas, haverá sempre formação de condensado ao longo das tubulações em virtude da diferença de sua temperatura com o meio ambiente. Ao estimar esta massa de condensado em um sistema de distribuição, estabelecem-se parâmetros que podem ser utilizados como alternativas para o levantamento do custo da geração e distribuição de vapor, levando-se em consideração a localização de cada ponto consumidor no espaço físico da planta. Neste trabalho, faz-se a análise de um circuito para demonstrar os meios que possibilitam a determinação dos parâmetros estabelecidos, assim como uma aplicação ilustrando o custo do vapor em cada centro consumidor.

Palavras-chave: Condensado, Distribuição de vapor, Termoeconomia .

1. INTRODUÇÃO

Em conformidade a natureza, o vapor tão logo deixa a caldeira, começa a ceder calor ao meio ambiente. Evidentemente providências devem ser tomadas, no sentido de minimizar esta perda, para que ao atingir o ponto de consumo, o vapor esteja em condições ideais para uma perfeita troca térmica e atingir os objetivos, obtendo assim uma alta eficiência.

Nos moldes usuais, utiliza-se materiais isolantes envoltos nas tubulações, para reter a transferência de calor, a fim de manter o vapor com a máxima energia calorífica até os pontos consumidores. Apesar da alta qualidade do material isolante, uma parte do calor não é retido e, ao fluir para o meio ambiente, transforma uma fração deste vapor em condensado.

Uma análise funcional do sistema, permite uma estimativa qualitativa e quantitativa da massa de condensado, uma vez que sua geração é uma função direta da geometria de cada tubulação e também dos acessórios da qual é composta, ocasionando com isso valores diferentes de massa de condensado para uma mesma extensão de linhas. A massa de

condensado assim formada, está associada a transferência do calor ao longo das tubulações, das condições de operação do vapor e da eficiência térmica do isolamento.

Como os equipamentos que consomem vapor localizam-se em diferentes pontos da planta, há uma diversidade de linhas de distribuição possibilitando a ocorrência de ramificações, conduzindo com isso ao fato que, cada trecho da tubulação conduz vapor de dois ou mais consumidores.

Assim sendo, este trabalho tem como objetivo principal, a estimativa da massa de condensado que se forma e, através desta estabelecer uma relação que por meio de parâmetros, possibilite o levantamento de custos para cada ponto consumidor através de uma análise desde a central geradora até o seu ponto de consumo, quando se tem no início da linha de distribuição, vapor saturado.

2. MASSA DE CONDENSADO

A massa de condensado formada nas linhas de distribuição, tem como base de cálculo as propriedades do vapor saturado seco, uma vez que não é prática comum a utilização de vapor superaquecido em sistemas de aquecimento. Em se tratando de escoamento em regime permanente, a equação governante é um balanço de energia aliada com a perda de calor ao longo dos tubos, sendo esta perda intimamente ligada à eficiência do isolamento. Estando este nos padrões adequados de espessura, a perda de calor é reduzida para 25% em comparação a uma linha não isolada.

A formulação para determinação da massa de condensado, tem como evidência a eficiência térmica do isolamento aliado ao comprimento equivalente da tubulação e ao diâmetro externo, sendo este elevado a uma potência. Em associação aos valores assim descritos tem-se a equação para a massa de condensado formada em um trecho de tubulação, Oliveira P.A.P. *et al* (1998):

$$m_c = K \cdot D^{0,75} \cdot L_{eq} \quad (1)$$

sendo:

$$K = \frac{(1,037 \cdot 10^{-3}) (T_p - T_{ar})^{1,25}}{h_{lv}} \quad (2)$$

onde:

m_c - Massa de condensado [kg/s]

D - Diâmetro externo da tubulação, sem isolante [m]

L_{eq} - Comprimento equivalente da tubulação [m]

T_p - Temperatura da parede do tubo [°C]

T_{ar} - Temperatura ambiente [°C]

h_{lv} - Calor latente [kJ/kg]

A pressão de vapor é a característica principal do processo de operação na produção de vapor. Em função desta pressão, associam-se os parâmetros T_p (temperatura da parede do tubo) e h_{lv} (calor latente), que aparecem no termo “K” da “eq.(1)” e mostrado na “Eq.(2)”, equação esta que é também função da temperatura ambiente (T_{ar}).

3. QUALIDADE DO VAPOR

Em uma indústria, os equipamentos que consomem vapor localizam-se em pontos estratégicos e diferenciados no espaço físico da fábrica, de acordo com a distribuição dos prédios de produção. O custo energético para o setor de produção é uma relação direta com a massa de vapor recebida à este setor de produção. Esta massa corresponde uma avaliação quantitativa, não levando em consideração a localização do consumidor em comparação a um outro cuja distância é de maior ou menor extensão em relação à caldeira geradora de vapor. Deve-se levar em conta a análise de alguns parâmetros:

- a) As linhas de distribuição são diversificadas e ocorrem ramificações.
- b) Cada trecho de tubulação está conduzindo vapor de dois ou mais consumidores.
- c) A massa de condensado formada em cada trecho de tubulação, provém do vapor produzido na caldeira.
- d) O custo energético de um dado setor de produção, é atribuído aos consumidores que fazem uso do respectivo trecho de tubulação, que receberá o vapor desejado para este setor.

4. FORMULAÇÃO DA QUALIDADE

Tomando-se como base, o consumo individual em cada setor e as ramificações no trajeto de distribuição, é possível obter uma equação matemática para a análise qualitativa do vapor em cada prédio consumidor. Esta equação leva em consideração o trajeto de distribuição e as respectivas massas de condensado formadas, assim como o rateio do condensado entre os consumidores que utilizam destes trechos. Com isso, pode se avaliar em cada ponto de consumo, a massa recebida em termos de porcentagem em relação à produção total da caldeira. A figura 1, mostra um esquema de distribuição, mostrando os vários clientes no espaço físico da planta, para os quais se analisa a equação matemática.

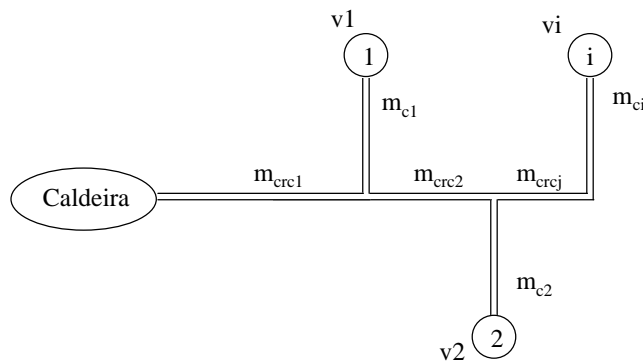


Figura 1 - Esquema de Distribuição

A equação matemática desenvolvida é assim apresentada por Oliveira, P.A.P. *et al* (1998):

$$PV_{ci} = \frac{V_i}{V_i + m_{ci} + \frac{V_i}{V_{ct}}(m_{crc})} \quad (3)$$

Sendo:

PV_{ci} - Fator de consumo do cliente i [-]

V_i - Consumo de vapor do cliente i [kg/s]

m_{ci} - Massa de condensado no ramo individual do cliente i [kg/s]

$V_{ct} = \sum_{i=1}^n V_i$ - Consumo de vapor dos “ n ” clientes [kg/s]

$m_{crc} = \sum_{j=1}^m m_{crc_j}$ - Massa de condensado nos “ m ” ramos coletivos dos quais o cliente participa [kg/s]

A equação matemática para a determinação do vapor produzido na área de utilidades é:

$$Pr_{cald} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{V_i}{PV_{ci}} \right) = \sum_{i=1}^n V_{pi} \quad (4)$$

Sendo: Pr_{cald} = Produção de vapor na caldeira [kg/s]

V_{pi} = Vapor produzido na caldeira para o cliente i [kg/s]

5. ANÁLISE DA QUALIDADE DO VAPOR

A tabela 1 mostra os valores obtidos para a distribuição de vapor em uma indústria química. Os resultados apresentam um método de cálculo para a obtenção dos parâmetros através das “Eqs (3) e (4)” e apresentam as seguintes características:

a) Balanço de Massa: O vapor produzido na caldeira para cada cliente é igual ao vapor requerido pelo cliente mais a massa de condensado que é gerada ao longo das linhas de distribuição. Conseqüentemente o vapor total a ser produzido para atender a todos os clientes é uma somatória das massa produzidas para cada clientes.

b) O fator PV_{ci} , é a relação entre a massa de vapor requerida por cliente e a massa de vapor que será produzido na caldeira para atendê-lo na quantidade desejada. De uma forma geral, “ PV_{ci} ” é uma porcentagem que deve ser aplicada ao valor produzido para cada cliente na caldeira, para que se possa obter como resultado, o valor numérico do vapor requerido para o consumo, em virtude da massa de condensado que se forma durante a distribuição.

Tabela 1 - Análise na distribuição do vapor de um circuito de 1,8 MPa

Clientes	Vapor Requerido [kg/s]	Vapor Produzido [kg/s]	Título	Condensado [kg/s]	Fator PV_{ci}
C 1	0,493	0,5168	0,993	0,0238	0,954
C 2	0,040	0,0440	0,948	0,0040	0,909
C 3	0,123	0,1466	0,971	0,0236	0,840
C 4	0,048	0,0661	0,957	0,0181	0,728

6. TERMOECONOMIA NO CONSUMO

A viabilização econômica em um sistema de distribuição, além do custo de produção, envolve também instalações e aquisições de equipamentos, como por exemplo caldeiras e

acessórios. Assim sendo, a elaboração de um método se faz necessário para a análise deste custo, uma vez que um sistema de distribuição sempre envolve vários consumidores, sendo estes localizados em vários pontos estratégicos da unidade fabril. Do ponto de vista de localização, deve-se considerar não só a taxa de vapor consumida pelos clientes, mas também o seu posicionamento físico na planta comparando-o a um outro, cuja distância é de maior ou menor extensão em relação a caldeira geradora de vapor.

Para o desenvolvimento deste trabalho, considerou-se como custo de aquisição de equipamentos, a estimativa para a compra de uma caldeira, assim como sua eventual manutenção. Não foi considerado o custo de manutenção para as linhas de distribuição, pois acredita-se que as mesmas não sofram elevada manutenção e, caso isto ocorra, as mesmas devem estar voltadas para custo da própria área.

No tocante a compra da caldeira, considerou-se também um período para amortização, sendo este correspondente ao tempo de 2, 4 ou 6 anos, que se considera como períodos ideais para um cálculo de retorno de capital. Foi considerado ainda uma taxa anual de juros de 12%.

Assim sendo, tendo como base o fator característico determinado para cada cliente consumidor conforme “Eq (3)”, e de acordo com um trabalho de Silveira et al(1992), foi possível desenvolver um método para ilustrar o custo a um sistema de distribuição que opera à pressão de 1.8 MPa, conforme ilustrado na “Eq (4)” e “Eqs (5) a (10)”, de onde se obteve alguns resultados demonstrados na tabela 2.

$$CV_i = P_{itot} \left(\frac{I_t \cdot f}{H \cdot E_{vi}} + C_{comb} + CM_{cald} \right) \quad (5)$$

$$P_{itot} = \frac{V_{pi}}{P_{rcald}} \quad (6)$$

$$f = \frac{[q^k (q - 1)]}{q^k - 1} \quad (7)$$

$$E_{vi} = Vi(h_{vi} - h_{li}) \quad (8)$$

$$q = 1 + \frac{r}{100} \quad (9)$$

onde:

- C_{comb} - Custo do combustível [US\$/kWh]
- CM_{cald} - Custo de manutenção da caldeira [US\$/kWh]
- CV_i - Custo do vapor para cliente i [US\$/kWh]
- E_{vi} - Energia do vapor i [kW]
- f - Fator de anuidade [1/ano]
- H - Horas de trabalho da caldeira
- h_{li} - Entalpia do condensado do cliente i [kJ/kg]
- h_{vi} - Entalpia do vapor para cliente i [kJ/kg]
- I_t - Investimento total [US\$]
- k - Período de amortização [anos]
- P_{itot} - Fator total para o cliente i [%]
- r - Taxa anual de juros [%]

Tabela 2 - Sistema de Distribuição à 1,8 MPa (Custo do Vapor US\$/kWh)

HTC	7000 h/ano			7500 h/ano			8000 h/ano		
	k = 2	k = 4	k = 6	k = 2	k = 4	k = 6	k = 2	k = 4	k = 6
CV ₁	0,0189	0,0170	0,0164	0,0186	0,0168	0,0163	0,0183	0,0258	0,0162
CV ₂	0,0057	0,0037	0,0031	0,0054	0,0035	0,0029	0,0051	0,0034	0,0028
CV ₃	0,0089	0,0068	0,0061	0,0086	0,0066	0,0060	0,0083	0,0065	0,0059
CV ₄	0,0074	0,0049	0,0041	0,0070	0,0047	0,0040	0,0067	0,0046	0,0039
HTC – Horas de Trabalho da Caldeira[h/ano]									

7. GASTO COM COMBUSTÍVEIS/CUSTO NO CONSUMO DE VAPOR

Levando-se em consideração o consumo individual (V_i) em associação aos parâmetros PV_{ci} e P_{itot} determinados através das “Eq (3) e (6)”, pode-se levantar meios ideais para ratear o custo do vapor gerado para um sistema de distribuição. Tomando-se como base, o período de trabalho da caldeira e os consumos individuais conforme tabela 1, estima-se o custo da produção do vapor para um circuito de distribuição, tendo como base a quantidade de combustível consumido para sua geração, o que foi estimado a uma taxa de 12 kg de vapor para cada kg de óleo consumido, sendo este a um preço de US\$ 0,094/kg. A tabela 3 ilustra portanto, o preço total na geração e distribuição do vapor, enquanto que a tabela 4 mostra valores característico do custo individual, baseado no consumo e nos parâmetros obtidos das “Eqs (3) e (6)”.

Tabela 3 - Custo na Distribuição de Vapor

Horas Trabalhadas	7000 h/ano	7500 h/ano	8000 h/ano
Produção [kg]	19 532 520	20 927 700	22 322 880
Consumo Óleo [kg]	1 627 710	1 743 975	1 860 240
Gasto com Óleo [US\$]	153 004	163 933	174 862

Tabela 4 - Gasto com Óleo por Cliente do Sistema de Distribuição

Clientes	V_i [kg/s]	PV_{ci}	P_{itot} [%]	Custo Individual Por Cliente		
				7000h/ano	7500h/ano	8000h/ano
C1	0.4930	0.954	66.67	102 008,26	109 294,56	116 580,87
C 2	0.0404	0.909	5.73	8 767,17	9 393,40	10 019,62
C 3	0.1236	0.840	18.98	29 040,30	31 114,61	33 188,91
C 4	0.0486	0.728	8.61	12 038,13	14 114,69	15 055,67

8. CONCLUSÃO

Buscou-se elaborar uma forma prática, para se fazer uma estimativa da massa de condensado que inevitavelmente ocorre em linhas de distribuição de vapor. Com isso na

utilização do balanço de massa e energia, consegue-se analisar cada trecho de tubulação e, no contexto geral, a estimativa de todo um circuito de distribuição.

Com a formulação proposta, procurou-se obter melhoria no sistema de distribuição, tendo em vista a elaboração de um método para criar uma proporcionalidade de consumo e localização entre os clientes consumidores. Fornece-se assim uma ferramenta de forma simplificada e objetiva, com parâmetros suficientes para estimar custos de produção de vapor, aliado ao método de distribuição.

Com análise individual, criaram-se parâmetros para obter os meios destinados a levantar o custo do vapor, para cada ponto consumidor. Com isso, a distribuição do consumidor no espaço físico da planta torna-se um parâmetro a se considerar, em termos de levantamento do custo de seus produtos.

REFERÊNCIAS

- Brasil. Ministério de Minas e Energia. C.N.P. 1993, “Como otimizar o uso do condensado”, /s.n.t/ 16p. . (Economia de óleo combustível, 4).
- Brasil. Ministério de Minas e Energia. C.N.P. 1993, “Consumo de vapor na indústria”, /s.n.t./ 16p.(Economia de óleo combustível, 9).
- Holman, J.P., 1983, “Transferência de calor”, Mc Graw-Hill do Brasil, São Paulo;
- Silveira, J.P.e Balestieri, J.A.P, 1992, “Economic and Technical Feasibility Study of a Combined-Cycle Cogeneration System Associated With Cellulose Plants”, proceedings of ASME Cogen-turbo, 6th international conference on gas turbines in cogeneration and utility industrial and independent Pwer Generation, IGTI, Vol 7 – p 473/476.
- Oliveira, P.A.P. e Ebinuma, C.D., 1998, Estimativa de Condensado na Distribuição de Vapor, V Congresso de Engenharia Mecânica Norte Nordeste 1998, VCEM-NNE98, Vol III - p456/460

TITLE. Termoeconomics in Steam Distribution

ABSTRACT: Although the vapor is flowing in perfectly isolated lines, there will always be formation of condensed vapor along the pipeline due to the difference of its temperature with the environment. When estimating the condensed mass in a distribution system, some parameters are setted that can be used as alternatives in calculating the generation and vapor distribution costs, taking account the location of each consuming point in the physical space of the plant. In this work, the analysis of a circuit to demonstrate the ideal means that make easier the determination of those parameters, is presented more over an application illustrating the cost of the vapor in each consuming center, is presented too.

KEYWORDS: Condesation, Steam of Distribution, Termoeconomics